



"Diseño e implementación de un sistema de medida de parámetros meteorológicos y eléctricos de módulos fotovoltaicos en una instalación exterior"

PROYECTO FIN DE CARRERA

INGENIERÍA INDUSTRIAL

Dpto. Modulprüflabor Solar World Innovations GmbH

Autora: Pilar Beltrán Relancio

Director: Johannes Kirchner (Solar World)

Ponente: Ángel Bayod (Universidad de Zaragoza)

Zaragoza, Septiembre 2010

RESUMEN

A lo largo del presente PFC realizado en SWIN, Solar World Innovations GmbH, se ha propuesto, diseñado, implementado y evaluado un sistema de medición, recogida y evaluación de datos de carácter eléctrico, térmico y meteorológico para una instalación fotovoltaica exterior. El PFC se puede separar en dos partes, dedicadas a la realización de cada uno de los sistemas de los que consta la instalación, el de medición y recogida de datos, y el de evaluación de los mismos.

El desarrollo de la primera parte ha estado dedicado plenamente al diseño e implementación de un sistema de medición y recogida de datos. Esta primera etapa comenzó con la búsqueda de documentación relacionada con el tema, posteriormente la búsqueda de los aparatos necesarios para el sistema, que se compone de una completa estación meteorológica, un armario eléctrico que acoge principalmente un trazador de línea IV, un multiplexor, un datalogger y un PC industrial, y los diversos aparatos distribuidos por distintos puntos de la instalación. Una vez determinados los aparatos, se planificó la distribución de los mismos en el espacio de la instalación. Llegados a este punto se tomó contacto con los diversos proveedores, con el fin de maximizar las condiciones del sistema, dado nuestro presupuesto, es decir obtener la mejor oferta. Una vez acordado el pedido y después del tiempo de suministro se procedió a la instalación de todo el sistema.

Los meses necesarios para la espera de los aparatos, fueron utilizados para la realización del segundo sistema, el de evaluación. Éste consiste principalmente en un conjunto de interfaces gráficas programadas con la herramienta matemática MATLAB®. Este conjunto de interfaces compone un programa que pretende facilitar al usuario la evaluación de todo tipo de datos relacionados con el estudio fotovoltaico, uno de los puntos fuertes de esta programación es que los datos pueden provenir tanto de fuentes conocidas como desconocidas. El usuario se verá guiado por un sencillo e intuitivo programa que le permitirá evaluar tanto conjuntos de módulos como módulos aislados, posibilitará el análisis de las distintas curvas características, pudiendo compararlas y trabajar con ellas. Pero además, permite analizar todos los parámetros eléctricos y térmicos que caracterizan a un módulo fotovoltaico, posibilitando a través de las gráficas la observación de tendencias y comparaciones entre módulos. Por último y como complemento al sistema de recogida de datos meteorológicos, permite el establecimiento de interrelaciones a través de las distintas representaciones entre condiciones meteorológicas y parámetros de funcionamiento de los módulos.

Todo esto posibilita finalmente una completa y exacta herramienta para el estudio en profundidad de cada uno de los parámetros de los módulos fotovoltaicos, que permancera operativa indefinidamente en Solar World Innovations GmbH.

AGRADECIMIENTOS

Me gustaría agradeceréelo a todos aquellos que han compartido conmigo todos estos años, que finalmente han dado su fruto, y que como colofón final tienen estas hojas que cierran una etapa. A las CC's, desde pequeñitas con carácter y alegría, a las Tranceras de Ejea nuevamente alegría, a los cepesianos con los que tanto estudio y no estudio he compartido, a las cepesianas Vicks, Vikykyky, Oihane y Adri, otra vez alegría y diversidad, a todas esas fantásticas personillas que he encontrado en mi ciudad, Dresden, a los dresdenianos que estos dos años han hecho que el frío alemán no fuera tan duro.

A mi familia, empezando por mi Abuela Ángeles, de quien siempre admiro su discreción y humildad, a mis tías Tere y Ángeles, no hay palabras para describir la entrega y dedicación que nos habéis brindado, esta es una de las mil veces de las que os diré Gracias. A mis hermanos, Adri gracias por tu dulzura, tu ternura y ese aliño de realidad que sólo tú sabes darle, Rachel gracias por tu fortaleza y sentido común, todo ello envuelto de una exquisita perfección, Vidalorri, en el deporte, la amistad, el trabajo... eres lo máximo, sólo espero estar a la altura.

A mis padres, que tan bien me conocéis, y tanta paciencia habéis tenido, gracias por estar ahí SIEMPRE, por enseñarme que no hay que abandonar sin luchar y que tener las cosas claras en esta vida es algo muy importante.

A mi sobri, Dieguito, te agradezco de antemano el esfuerzo que voy a hacer en servirte de ejemplo como todos ellos me han servido a mí.

Gracias

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Objetivo	1
1.2. Motivación	1
1.3. Distribución del trabajo	2
2. Sistema de recogida de datos	4
2.1. Lugar, entorno y tipo de instalación	4
2.1.1. Lugar: Freiberg	4
2.1.2. Empresa: Solar World AG	5
2.1.3. Instalación: Tejado del edificio DS1400	5
2.2. Demanda de la empresa	6
2.3. Elección de los aparatos y estudio de proveedores	8
2.3.1. Elección de los aparatos	8
2.3.2. Estudio de proveedores	9
2.4. Componentes del sistema y su distribución	11
2.4.1. Aparatos para la recogida de datos meteorológicos	11
2.4.1.a. Anemómetro	11
2.4.1.b. Veleta	11
2.4.1.c. Termómetro de temperatura ambiente	12
2.4.1.d. Psicrómetro	12
2.4.1.e. Piranómetro	12
2.4.1.f. Datalogger	13
2.4.2. Aparatos para la recogida de datos eléctricos	13
2.4.2.a. Trazador de curva IV	13
2.4.2.b. Multiplexor	14
2.4.2.c. Termómetro de temperatura del módulo	14
2.4.2.d. Sensor de radiación / Célula de Silicio	14
2.4.3. Accesorios adicionales para el montaje de los aparatos	15
2.4.4. Distribución de los componentes en el espacio de la cubierta	16
2.5. Problemas	17
2.5.1. Problemas en la planificación	17
2.5.1.a. Sombras, influencia de la parte alta del edificio	17
2.5.1.b. Bandejas de aluminio para cableado	18
2.5.1.c. Mapa viejo	19
2.5.1.d. Retraso en el suministro	20

2.5.2.	Problemas durante la instalación	20
2.5.2.a.	Pararrayos azotea	20
2.5.2.b.	Planchas de hormigón	21
2.5.2.c.	Montaje inacabado	21
2.5.2.d.	Problemas con la recepción de datos	22
3.	Sistema de evaluación de datos	23
3.1.	Explicación de los parámetros recogidos	23
3.1.1.	Intensidad de corriente del módulo fotovoltaico [A]	24
3.1.2.	Tensión del módulo fotovoltaico [V]	26
3.1.3.	Punto de máxima potencia [W]	26
3.1.4.	Factor de llenado [%]	27
3.2.	Explicación de los parámetros calculados	27
3.2.1.	Condiciones Estándar	27
3.2.2.	Rendimiento del módulo	28
3.3.	Explicación de las interfaces gráficas para usuario	29
3.3.1.	Representación curva IV	30
3.3.2.	Evaluación de un módulo	31
3.3.3.	Evaluación de más de un módulo	33
3.3.4.	Comparación de módulos	34
3.3.5.	Evaluación de las condiciones meteorológicas	34
3.3.6.	Evaluación de las interrelaciones	35
3.4.	Explicación de las principales gráficas	36
3.4.1.	Conjunto I(V) ,P(V), G(V)	36
3.4.2.	Gráficas más importantes	37
3.4.2.a.	Potencia en el punto de máxima potencia a condiciones estándar, Ppk	37
3.4.2.b.	Gráficas referidas a la intensidad de cortocircuito	38
3.4.2.c.	Gráficas referidas a la tensión de circuito abierto	39
3.4.2.d.	Gráficas referidas a la potencia del punto de máxima potencia	39
3.4.2.e.	Representaciones frente al tiempo	39
3.4.2.f.	Gráfica de la dependencia del rendimiento con la tem- peratura	39
3.4.2.g.	Gráfica a tres ejes de potencia, temperatura del módulo y la radiación	40
3.4.3.	Análisis de interrelaciones	40
3.5.	Explicación de la programación	40
3.6.	Problemas en el proceso de creación del sistema de evaluación	40
3.6.1.	Problemas en la programación	40
3.6.2.	Problemas de la instalación	41
4.	Resultados	43
4.1.	Sistema de medición y recogida	43

Índice general

4.2. Sistema de evaluación	47
5. Conclusiones	48
5.1. Conclusión	48
5.2. Trabajos futuros	48

Índice de figuras

1.1. Plan de trabajo inicial (Noviembre 2009)	2
1.2. Plan de trabajo real (Mayo 2010)	3
2.1. Esquema para la realización de las tareas	7
2.2. Principales aparatos que componen el sistema de recogida	13
2.3. Esquema conceptual sistema de medición	15
2.4. Esquema de la distribución de los aparatos	17
2.5. Ejemplo representación diagrama solar para una fila de la instalación, y proyección de sombra en la instalación	18
2.6. Plano de la azotea, trazado actual y anterior del camino	20
3.1. Recepción de datos y representación de datos del software Mencke&Tegtmeyer	23
3.2. Circuito equivalente de una célula fotovoltaica	25
3.3. Punto de máxima potencia, curva I-V y P-V	26
3.4. Esquema aclarativo de la red de interfaces gráficas para la evaluación de los datos eléctricos, térmicos y meteorológicos de los módulos fotovoltaicos	29
3.5. Interfaz que muestra las representaciones I(V), P(V), G(V), así como parámetros de importancia en el funcionamiento del módulo	30
3.6. Interfaz que muestra los datos importantes en una tabla ordenada	31
3.7. Interfaz que muestra valores calculados de importancia	32
3.8. Interfaz que muestra las representaciones más importantes de los datos meteorológicos	34
3.9. Interfaz que permite elegir los datos meteorológicos a representar	35
3.10. Interfaz que muestra las principales gráficas para hacerse una primera idea de cómo funcionan los módulos	38
4.1. Instalación de los 160 módulos fotovoltaicos en la azotea del DS1400	43
4.2. Termómetros de temperatura del módulo adheridos al Tedlar	44
4.3. Estación meteorológica sobre el DS1400	45
4.4. Armario eléctrico de la instalación	46
4.5. Breve esquema de las interfaces de evaluación	47

Índice de cuadros

2.1. Resumen de los datos técnicos de la instalación	5
2.2. Tabla aparatos para una estación meteorológica	8
2.3. Tabla aparatos para para la recolección de los parámetros eléctricos de la instalación fotovoltaica	9

1. Introducción

1.1. Objetivo

El objeto del presente Proyecto Fin de Carrera (PFC), es el diseño de un sistema de recogida y evaluación de datos meteorológicos y eléctricos para una instalación fotovoltaica exterior, así como la posterior implementación del mismo. Este sistema debe posibilitar la medición de varios módulos simultáneamente y la comparación entre ellos. Tanto el sistema de recogida y evaluación de datos, como la instalación fotovoltaica, la cuál es el objeto de medición, se encuentran en la azotea del nuevo edificio de Solar World Innovations, en Freiberg en el estado alemán de Sajonia, donde deberán permanecer operativos de manera indefinida.

El trabajo realizado puede dividirse en tres partes claramente diferenciadas, la primera comprende la creación del concepto del sistema de medición, la determinación y elección de los aparatos necesarios, la planificación de la distribución de los componentes, y el posterior pedido de éstos. La segunda, incluye el montaje y puesta en marcha de la instalación, la recogida y evaluación de los datos, y el análisis de los mismos. Por último, la tercera parte sería la dedicada a la programación de interfaces gráficas para usuario, que permiten la evaluación de los datos recogidos por el sistema diseñado, así como la evaluación de datos provenientes de otras fuentes desconocidas. Esta programación ha sido realizada a través de la herramienta matemática MATLAB®.

1.2. Motivación

Hoy en día cualquiera de nuestros actos requiere un aporte energético, esta dependencia ha incentivado el desarrollo de este sector, tanto en la búsqueda de nuevas alternativas, como en la optimización de la utilización de las fuentes ya existentes.

Las energías juegan un papel muy importante en nuestra sociedad, no sólo a nivel de usuario, sino también en los ámbitos político y socio-económico. Los recursos energéticos de un país lo hacen más potente e independiente, por lo que se trabaja incesantemente en la búsqueda de distintas alternativas.

Los sistemas fotovoltaicos tienen varias ventajas con respecto a otros métodos de obtención energética, se pueden diseñar para una gran variedad de aplicaciones y pueden

1. Introducción

ser usados ya sea de manera centralizada o para la generación de energía distribuida. Éstos no tienen partes móviles, son de tipo modular, fácilmente ampliables e incluso, en algunos casos, transportables. Durante su funcionamiento no crean ruido o contaminación, el único factor contaminante que podríamos considerar, sería la contaminación visual.

Todo el conjunto de ideas anteriormente expuestas son las que motivaron en su momento la elección de este sector de la ingeniería como mi futuro campo de trabajo. Durante mi estancia en Alemania acudí a la feria de empleo de Dresde "Bonding Messe Dresden 2009", donde tomé contacto con Solar World GmbH, a partir de un segundo encuentro con el que sería el director del proyecto Sr. Johannes Kirchner se decidió el tema del PFC. La elección de éste fue muy acertada, ya que este me ha permitido ver una aplicación real y directa del mundo laboral, tanto por el carácter del PFC, como por las actividades necesarias para la consecución del mismo, como pueden ser la toma de contacto con proveedores, el diseño y planificación, la programación, el montaje del sistema, etc.

1.3. Distribución del trabajo

El hecho de haber realizado el PFC en una empresa ha aportado un toque de realidad, reflejado en los tiempos necesarios para las tareas y como consecuencia, en la distribución del trabajo.

En la Figura 1.1 podemos observar el plan de trabajo realizado en mi primera semana, dado su desajuste a la realidad, me vi obligada a cambiarlo en varias ocasiones, en la Figura 1.2 podemos observar la última distribución de trabajo, que finalmente es la que más se asemeja a la realidad.

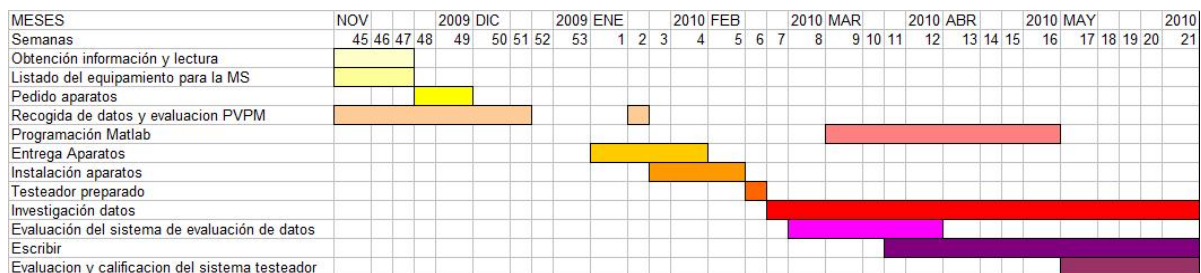


Figura 1.1.: Plan de trabajo realizado al comienzo del PFC

1. Introducción

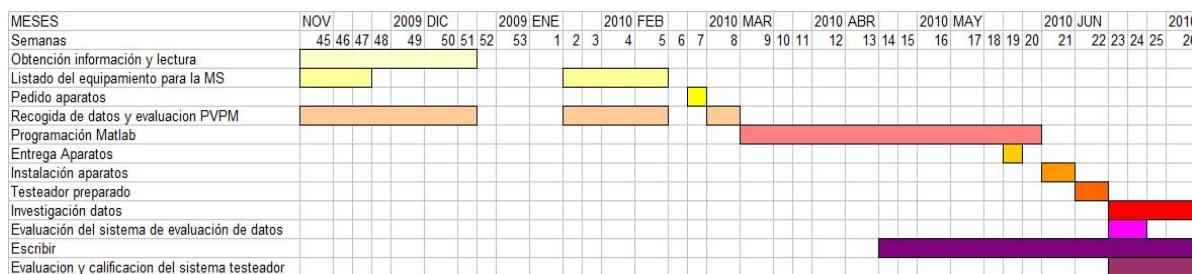


Figura 1.2.: Plan de trabajo realizado al final del presente PFC

Como ya ha sido explicado en el apartado Objetivo 1.1, tres han sido las principales tareas de este PFC, el diseño y planificación, la implementación, y la programación para la evaluación de los datos. Sin embargo, los capítulos se dividirán de manera que sea más sencillo entender los dos subsistemas que forman el sistema de medición, sistema de recogida de datos, y sistema de evaluación de datos. A continuación se expone brevemente cada uno de los capítulos de los que consta este documento:

El capítulo 1, en el que nos hallamos, consta de la presentación del proyecto, la exposición de los objetivos, la aclaración de las motivaciones que suscitan este PFC, y la presente distribución del trabajo.

El sistema diseñado consta de dos partes claramente diferenciadas, la parte que se ocupa de la recogida de datos, es decir, cada uno de los aparatos y componentes que se encargan de la obtención y almacenamiento de los datos, tema que será explicado en el capítulo 2.

El capítulo 3 se encarga de presentarnos el segundo subsistema, que es el encargado de la evaluación de los datos que llegan del subsistema de recogida, ésta se realiza a través de una serie de interfaces gráficas para usuario, que posibilitan la capacidad de evaluar los datos a personas que no estén familiarizadas con el uso y la programación en MATLAB®.

El capítulo 4 muestra una serie de resultados y un breve análisis de éstos. Para que posteriormente el capítulo 5 aglutine el total de las conclusiones de la realización de este proyecto, así como las futuras ampliaciones de este trabajo. Una vez concluida la memoria, la bibliografía utilizada cierra el presente documento.

2. Sistema de recogida de datos

2.1. Lugar, entorno y tipo de instalación

2.1.1. Lugar: Freiberg

Freiberg es una pequeña población al Este de Alemania a 400 m sobre el nivel del mar, situada en el corazón de Sajonia, entre Chemnitz y Dresde al pie de los "Montes Metálicos".

Allá por el siglo XII, el margrave Otto von Meissen fundó la ciudad, concediendo libre licencia para la búsqueda y extracción de metales preciosos, a cambio del 10 % del metal encontrado. De ahí nació el nombre de la ciudad "Freiberg", el cual viene del alemán "frei geben", dar licencia, permitir, y de "Berg", montaña.

Desde esos primeros hallazgos en el siglo XII, la ciudad se fue convirtiendo poco a poco en un importante centro de extracción minera, fue aquí donde se redactó el primer manual científico de minería y donde se fundó la primera Academia de Minería de todo el mundo, la cuál posteriormente en 1765 se establecería como la primera Universidad Minera.

A comienzos del siglo XX se dismantelaron las industrias mineras, dando paso a las modernas industrias tecnológicas, que principalmente después de la reunificación alemana convirtieron a Freiberg en un modelo para la reestructuración económica de Sajonia. En la actualidad estas empresas conforman el principal distintivo industrial de la ciudad, otorgándole así el apodo por el que en ocasiones es conocida como "Silicon Valley Sajón".

Respecto a las condiciones climatológicas se suelen caracterizar por cielos muy nubosos, con temperaturas por debajo de los 0 °C y la permanente nieve durante todo el invierno, y parte del otoño. Circunstancias que imposibilitan casi durante todo el invierno el funcionamiento de las placas fotovoltaicas, debido a que éstas se encuentran cubiertas de nieve. Durante la primavera y el verano son frecuentes las precipitaciones, por lo que el cielo está cubierto durante gran parte de este periodo, las temperaturas en esta época se encuentran entre los 8 °C y los 18 °C para la primavera y entre los 13 °C y 30 °C para el verano.

2.1.2. Empresa: Solar World AG

El presente PFC ha sido desarrollado en las instalaciones de SWIN, Solar World Innovations, en Freiberg, la población anteriormente descrita [2.1.1](#). El grupo Solar World AG se encuentra, en la actualidad, entre los tres líderes mundiales de la industria fotovoltaica. Se encarga de todas las etapas presentes en la cadena de la energía solar fotovoltaica, desde el tratamiento de silicio como materia prima hasta la entrega de proyectos llave en mano.

Cuenta con centros de producción en Alemania, Corea del Sur y Estados Unidos. En California concentra la mayor fabricación de módulos solares, mientras que en Oregón se realiza la mayor producción de obleas y células solares. Ya en Europa, en Freiberg, opera una de las plantas de producción solar más modernas e integradas del mundo.

A través de sus oficinas comerciales de Alemania, EE.UU., España, Sudáfrica y Singapur, Solar World ofrece soluciones energéticas no sólo para conexiones a red, sino que también para aplicaciones rurales, contribuyendo sustancialmente al desarrollo económico sostenible de áreas aisladas.

2.1.3. Instalación: Tejado del edificio DS1400

La instalación de la que se ocupa este PFC se encuentra en el tejado del edificio DS1400, propiedad de Solar World (Freiberg), como ya ha sido aclarado en el apartado Objetivo [1.1](#). El sistema a medir consta de 160 placas fotovoltaicas, distribuidas en 9 filas: 2 filas de 8 módulos, 2 filas de 12 módulos y 5 filas de 24 módulos cada una, acoplándose así a la arquitectura del edificio. Éste dispone de dos alturas, y el montaje se halla en la más baja de ellas, coincidente también con el sector más occidental del bloque como se verá posteriormente en la sección Sombras [2.5.1.a](#). El Cuadro [2.1](#) muestra un resumen de las características técnicas de la instalación fotovoltaica.

Cuadro 2.1.: Resumen de los datos técnicos de la instalación

Numero de paneles	160
Potencia pico por panel	Anexo III
Fabricante	Solar World
Potencia nominal de la instalación	40,7 kW
Numero de inversores	17 x 2,1kW 2 x 2,5 kW
Fabricante inversor	SMA

La instalación ha sido dispuesta de manera que, las líneas compuestas por 24 módulos,

son en realidad 3 conjuntos de 8 módulos cada uno, correspondiéndoles a cada uno de esos grupos de 8 módulos un inversor de los de menor capacidad, 2,1 kW, de modo que el inversor pueda trabajar correctamente cuando aislamos uno de esos módulos para medición. Es decir, las agrupaciones de 8 módulos podrían definirse como grupos de 7+1 módulos. Para las dos líneas compuestas por 12 placas, el inversor utilizado tiene una potencia de 2,5 kW. Los módulos instalados en la instalación son de distinta naturaleza, los hay mono y policristalinos, por lo que algunos datos de la tabla 2.1 deberán ser consultados en Anexo C.1.

2.2. Demanda de la empresa

La demanda de la empresa era un completo sistema de medición, recogida y evaluación de datos para la instalación sobre el tejado del nuevo edificio de Solar World, destinado a albergar al departamento de I+D de la empresa anteriormente nombrada.

La instalación del tejado les ofrecía un sencillo control visual y una gran accesibilidad para la medición, para completar el seguimiento de la instalación se demandaba un sistema cuyos principales objetivos eran:

- **Capacidad de obtener varios parámetros**, tanto eléctricos como meteorológicos, para la obtención de interrelaciones entre el funcionamiento del módulo y las condiciones meteorológicas.
- **Utilización del menor número de aparatos trazadores de línea posible maximizando el número de módulos medidos simultáneamente**, debido a su elevado precio.
- **Posibilidad de comparación entre módulos.**
- **Capacidad para cambiar los módulos objeto de la medición**, si un día se miden módulos de las filas A y C, poder medir en otro momento módulos de las filas B y E, por ejemplo.
- **Gran exactitud.**

El proyecto incluía no sólo la planificación y construcción del sistema de recogida de datos, sino también la evaluación de los mismos, proceso que se realizaría con la herramienta matemática MATLAB®. Las demandas realizadas por la empresa en este ámbito eran:

- **Evaluación de los datos del DS1400.**
- **Capacidad de comparación y observación de tendencias.**
- **Evaluación de las condiciones meteorológicas y establecimiento de interrelaciones.**

2. Sistema de recogida de datos

- **Capacidad para cargar grandes cantidades de datos**, pudiendo evaluar incluso años enteros.
- **Posibilidad de evaluar datos de fuentes desconocidas.**

Para facilitar la realización de todo lo anteriormente expuesto, se fijaron las tareas expuestas en la siguiente figura 2.1:

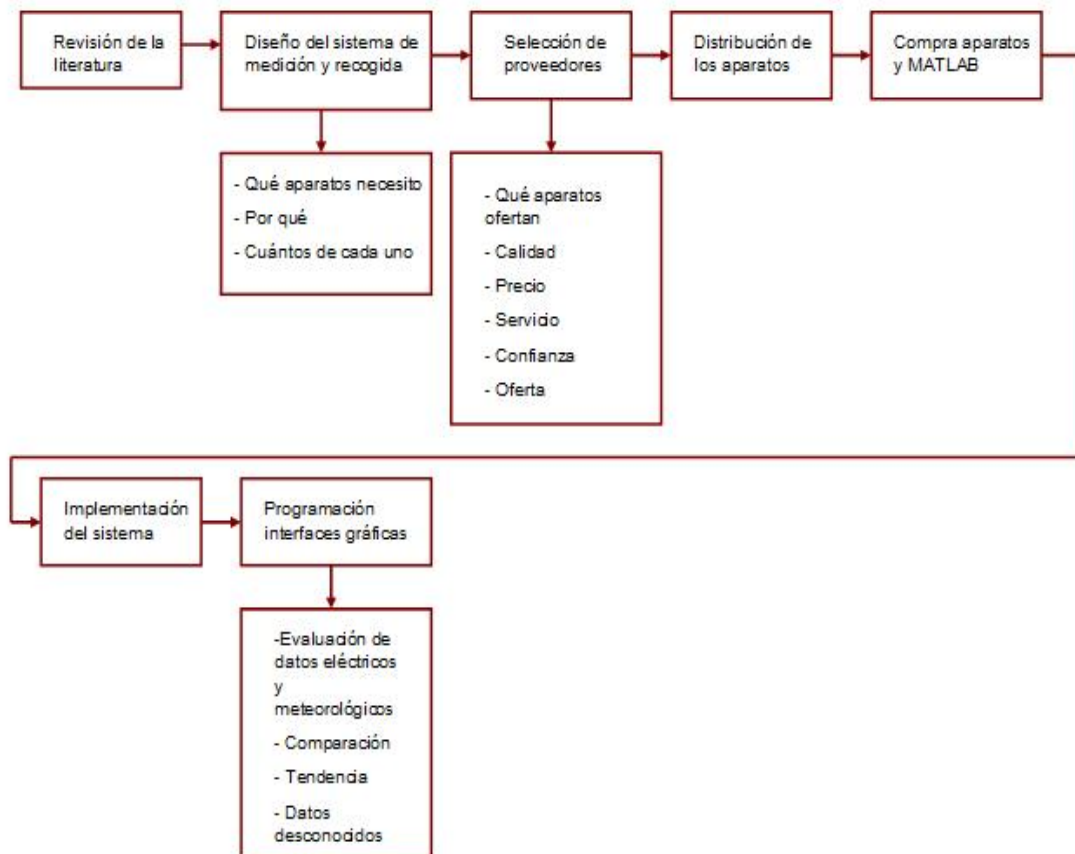


Figura 2.1.: Esquema para la realización de las tareas

El presupuesto del que se disponía eran XXXXX €.

2.3. Elección de los aparatos y estudio de proveedores

2.3.1. Elección de los aparatos

A partir de la lectura de artículos relacionados con el tema se elaboró un primer listado para los aparatos de la estación meteorológica, Cuadro 2.2 y para los aparatos para la recolección de datos Tabla 2.3.

Cuadro 2.2.: Tabla aparatos para una estación meteorológica completa

Aparato	Objeto medición	Unidades
Anemómetro	Velocidad del viento	m/s
Veleta	Dirección del viento	°
Barómetro	Presión atmosférica	hPa
Psicrómetro	Humedad relativa aire Temperatura punto de rocío	% °C
Pluviómetro	Cantidad de precipitación	l/m ²
Espectroradiómetro	Espectro de la radiación solar directa	nm
Piranómetro	Radiación solar incidente	kW/m ²
Medidores radiación UVA UVB	Radiación ultravioleta	mW/cm ²
Termómetro	Temperatura ambiente	°C
Heliógrafo	Duración de la insolación diaria	Horas

2. Sistema de recogida de datos

Cuadro 2.3.: Tabla aparatos para para la recolección de los parámetros eléctricos de la instalación fotovoltaica

Aparato	Objeto
Trazador línea I-V	Datos fotovoltaicos de carácter eléctrico y térmico
DataLogger	Recogida y almacenamiento de datos
MATLAB®	Herramienta matemática para evaluación de datos
Multiplexor	Capaz de recibir varias entradas, permite una única salida, determinada por la entrada de selección

De acuerdo a las necesidades de nuestra instalación se descartaron los siguientes aparatos:

- Pluviómetro, resultaba más interesante el estudio de la interrelación entre humedad relativa y funcionamiento del módulo, demanda ya cubierta por el psicrómetro.
- Espectroradiómetro, ya se disponía de uno antiguo con el que no se contaría en la instalación, ya que los datos no eran concluyentes para nuestro estudio.
- Heliógrafo, su precio era muy elevado, el dato de horas de sol no resultaba determinante, además de que su cálculo aproximado era bastante sencillo, cálculos que fueron realizados como se puede observar en Anexo D.2.
- Medidores de rayos UVA y UVB, se contó con ellos hasta el último momento, cuando debido a limitaciones económicas fueron considerados los aparatos más prescindibles.

Dado a la petición, anteriormente expuesta en el Apartado Demanda de la empresa 2.2, de maximizar el número de módulos a medir simultáneamente minimizando el costo, se consideró después de varias ideas que lo mejor sería implementar un multiplexor a un aparato trazador de línea. Por lo que a pesar de no ser un aparato común en este tipo de instalaciones, mejoraría considerablemente la capacidad del sistema.

2.3.2. Estudio de proveedores

La elección de los proveedores es una labor que requiere tiempo, ya que es necesario evaluar detenidamente cada una de las alternativas. Contar con buenos proveedores implica calidad, bajos costos, seguridad en el suministro... de esta manera intentamos asegurar el correcto funcionamiento de nuestro sistema.

Los factores decisivos a la hora de elegir un proveedor fueron:

2. Sistema de recogida de datos

- El precio, sobre todo en un proyecto de estas características, cuyo presupuesto está fuertemente fijado. Debemos comparar con el resto del mercado para valorar si el precio se encuentra dentro de los límites razonables para ese producto, teniendo en cuenta otros gastos adicionales, como pueden ser, el transporte, embalaje, seguros, etc.
- La calidad, en el caso que nos ocupa se puede determinar por los materiales utilizados, su durabilidad, sus características técnicas como son: resolución, exactitud, rangos de medida, conectividad. . .
- La entrega, siendo de gran importancia los plazos de entrega, y el compromiso de abastecimiento.
- Servicio de post-venta, han de evaluarse las garantías, servicio técnico, de mantenimiento, la política de devoluciones. . .
- Otros factores a tener en cuenta son: experiencia, reputación, organización, servicio al cliente. . .

Se elaboraron dos listados para los aparatos de las estación meteorológica, tomando como punto de partida a los proveedores habituales del laboratorio:

- **Clasificación por aparatos**, se lista los aparatos clasificados por empresas, modelos y sus características técnicas, tales como el campo de medida, la exactitud, la resolución, y por supuesto el precio. Esta clasificación ayuda a la hora de identificar qué aparato de todos los ofertados por todas las empresas es mejor, elección según los aparatos. El listado se puede ver en Anexo A.1.
- **Clasificación por empresas**, tras un tiempo en la búsqueda se observa que muchas de los aparatos son ofertados por las mismas empresas, ver Anexo A.2. Esta organización permite de manera más fácil identificar qué empresa sería capaz de suministrar todos o casi todos los componentes.

Y por último, un listado para los distintos aparatos trazadores de línea, ver Anexo A.3.

Finalmente se escogió al grupo Mencke&Tegtmeyer, eran capaz de suministrar todos los equipos necesarios, evitando problemas de compatibilidad, suministro, conectividad, etc. El presupuesto era adecuado e incluía el montaje y puesta en marcha de la instalación. El tiempo de suministro estimado fueron ocho semanas para la recepción y una más para el montaje, es decir nueve semanas. Una de las grandes ventajas de Mencke&Tegtmeyer era el precio, ya que para hacerse una idea de las diferencias de presupuestos Bauerdick nos ofreció un sistema diseñado por ellos, con 4 trazadores de línea, una estación meteorológica, 2 armarios climatizados , un sistema de seguimiento biaxial y un sistema de medición para NOCT, por más de cinco veces nuestro presupuesto.

2.4. Componentes del sistema y su distribución

En este apartado se describirá brevemente cada uno de los aparatos de los que finalmente consta el sistema, así como los parámetros que nos proporciona. La instalación está finalmente compuesta por dos partes bien diferenciadas:

- Recogida de datos meteorológicos, compuesta por un anemómetro, una veleta, un psicrómetro, un piranómetro y un datalogger.
- Recogida de datos fotovoltaicos, eléctricos y térmicos, compuesta por un conjunto de células de silicio para medir la radiación, de una serie de termómetros que miden la temperatura del módulo, un multiplexor y un trazador de línea IV.

2.4.1. Aparatos para la recogida de datos meteorológicos

2.4.1.a. Anemómetro

Aparato destinado a la medición de la velocidad del viento en m/s. Los anemómetros utilizados en nuestro sistema son del tipo de cazoletas, son los más utilizados por su simplicidad, exactitud y facilidad en la medición a distancia, sin embargo para rachas de vientos, tienden a recoger velocidades medias más altas a las reales.

En un principio nuestra instalación sólo iba a contar con el anemómetro que formara parte de la estación meteorológica, posteriormente se decidió que debido a la disposición del edificio, la distribución de las placas fotovoltaicas en la azotea, y considerando la influencia que tiene el viento en la temperatura del módulo, podría ser interesante instalar anemómetros en puntos determinados de la huerta, por lo que finalmente se pidieron 3 anemómetros adicionales, de una gama menor al que se colocaría en la estación meteorológica.

Para la estación meteorológica se eligió el modelo Vwind_E caracterizado por la exactitud del $\pm 3\%$ del valor medido ó 0,5 m/s para vientos de 0,5 a 50 m/s. Para los adicionales se escogió el modelo Vwind-Si con un campo de medición de 0,8 a 40 m/s; y con un error en la medición de hasta el 0,5 %. Se puede ver la ficha técnica en Anexo C.2.

2.4.1.b. Veleta

Es un dispositivo giratorio, destinado a medir la dirección del viento, en grados. Por normas de la OMM (Organización Meteorológica Mundial), tanto la veleta como el anemómetro deben ser instalados a 10 metros sobre la superficie del suelo, pero para otro tipo de estudios especiales, como podría ser el nuestro, se puede instalar según las diferentes necesidades.

2. Sistema de recogida de datos

El modelo es Rwind con un campo de medición, de 0° a 360° y una exactitud de $\pm 5^\circ$. La ficha técnica se puede observar en Anexo C.2.

2.4.1.c. Termómetro de temperatura ambiente

Instrumento de medición de temperatura ambiente, mide en $^\circ\text{C}$. El modelo utilizado es TMeteo con un rango de medición de -30 a 70 $^\circ\text{C}$, y una exactitud de $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Ficha técnica en Anexo C.2.

2.4.1.d. Psicrómetro

Aparato destinado a la medición de la humedad relativa en el aire. El psicrómetro está formado por dos termómetros, uno de bulbo seco y otro de bulbo húmedo. Este último se envuelve en un material, como por ejemplo la tela de algodón humedecida con agua, por lo que cuanto más seco es el aire, más frío por evaporación se produce, y más diferencia de temperatura hay entre los dos termómetros, el termómetro de bulbo húmedo medirá una temperatura inferior por la evaporación del agua. De la diferencia de temperatura uno puede determinar la humedad relativa del aire, así como otros parámetros. Para el correcto funcionamiento debe instalarse aislado de vientos fuertes y de la luz solar.

El modelo utilizado es el FA54 de Thermokon.

2.4.1.e. Piranómetro

Dispositivo utilizado para la medición de la radiación solar incidente. Mide la densidad de radiación solar (kW/m^2) en un campo de 180 grados.

En nuestra instalación dispondremos de dos piranómetros para medir la radiación directa, uno en el plano del suelo y otro en el plano de inclinación del módulo. Al tercero se le instalará un disco parasol, interfiriendo la radiación directa proveniente del sol, obteniendo así la radiación difusa.

$\text{Radiación Global} = \text{Radiación directa} + \text{Radiación difusa}$

Los piranómetros están constituidos por una pila termoeléctrica contenida en un alojamiento con dos semiesferas de cristal. La pila termoeléctrica se compone de una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El conjunto está pintado con un barniz negro, para absorber la radiación. El flujo de calor originado por la radiación se transmite a la termopila, generándose una tensión eléctrica proporcional a la diferencia de temperatura entre los metales de los termopares.

2. Sistema de recogida de datos

El modelo utilizado es el CMP 11, uno de las características determinantes del aparato es la tensión de salida de 7 a 14 mV para una radiación de $1000\text{W}/\text{m}^2$. Ficha técnica en Anexo C.2. El disco parasol es CM121. Todos ellos de Kipp&Zonen.

2.4.1.f. Datalogger

Es un dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo por medio de instrumentos y sensores propios o conectados externamente. En nuestro caso los sensores son externos, ya que son los sensores que conforman la estación meteorológica y los procedentes del trazador de línea. Éste está conectado al ordenador en el interior del armario eléctrico, ver Anexo G, donde los datos son recogidos. Nuestro datalogger se compone de un módulo IDL100, 4 módulos ISM111, y una ampliación de memoria SRAM de 2 MB. Ficha técnica en Anexo C.2.



Anemómetro



Veleta



Psicrómetro



Célula de referencia



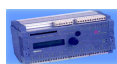
Piranómetro



Piranómetro difusa



Trazador de curva IV



Datalogger



Multiplexor

Figura 2.2.: Principales aparatos que componen el sistema de recogida

2.4.2. Aparatos para la recogida de datos eléctricos

2.4.2.a. Trazador de curva IV

Es un sistema de medición para el registro de la curva característica IV de los módulos fotovoltaicos. Permite la realización de medidas tanto en el exterior como en el interior, proporcionando los parámetros eléctricos, de radiación y temperatura que caracterizan los módulos. El modelo finalmente elegido es el PV-KLA, el aparato registra la curva IV a través del principio de carga capacitiva, es capaz de registrar simultáneamente los 4 parámetros que mide, intensidad, tensión, irradiancia y temperatura con una frecuencia de hasta 66 kHz.

2. Sistema de recogida de datos

Nuestro modelo PV-KLA, posee un rango de medida de entre 50 y 400 V, lo que nos permite medir líneas enteras hasta 8 módulos, así como de 4, 8 y 16 A. Ficha técnica en Anexo C.2.

2.4.2.b. Multiplexor

Es un dispositivo capaz de recibir 2^n entradas y transmitir las por un único medio de transmisión compartido. Para ello, serán las “n” entradas de selección, las que determinen cuál de las líneas de entrada será la que proporcione valor a la salida. Es un circuito combinacional compuesto por tantas puertas AND como líneas de entrada y una entrada de habilitación por cada una de ellas, y finalmente una puerta OR para todas las salidas de las AND.

En nuestro caso el Multiplexor realiza una función de transmisión multiplexada, ya que permite medir varios módulos simultáneamente utilizando la misma línea de conexión con el trazador de curva IV.

El multiplexor fue fabricado según nuestro pedido, en un principio se barajó la opción de solicitar un multiplexor de 20 canales, debido al precio de éste se decidió reducir el número de canales hasta un total de 12.

2.4.2.c. Termómetro de temperatura del módulo

Aparato para la medición de la temperatura del módulo fotovoltaico, se adhieren a la parte trasera del módulo. Nos permite medir uno de los parámetros más interesantes a observar en un módulo fotovoltaico.

El modelo utilizado el TModul10, se dispone de 10 unidades, caracterizados por una exactitud del 1 %, ficha técnica en Anexo C.2.

2.4.2.d. Sensor de radiación / Célula de Silicio

Aparato utilizado para medir la radiación solar, se instala en el mismo plano que las líneas fotovoltaicas, y está hecho del mismo material. Proporciona mediciones de radiación, que a pesar de no ser tan exactas como las de los piranómetros, son muy válidas debido a la orientación de la célula y la semejanza con respecto al material del módulo fotovoltaico. Cabe destacar la diferencia de precios entre estos dos aparatos, ya que el precio de una célula de silicio es entorno a 10 veces menor al de un piranómetro. La instalación dispone de 4 células de referencia, llamadas células de silicio, el modelo es Si-13TC-K. El trazador de línea lleva incluido una célula de silicio, del tipo Si-01TCext. Esta es la que nos dará la radiación general, y las otras cuatro serán distribuidas por la instalación fotovoltaica. Ficha técnica en Anexo C.2.

2. Sistema de recogida de datos

La siguiente figura 2.3 nos muestra el esquema conceptual del sistema de medición y recogida de datos.

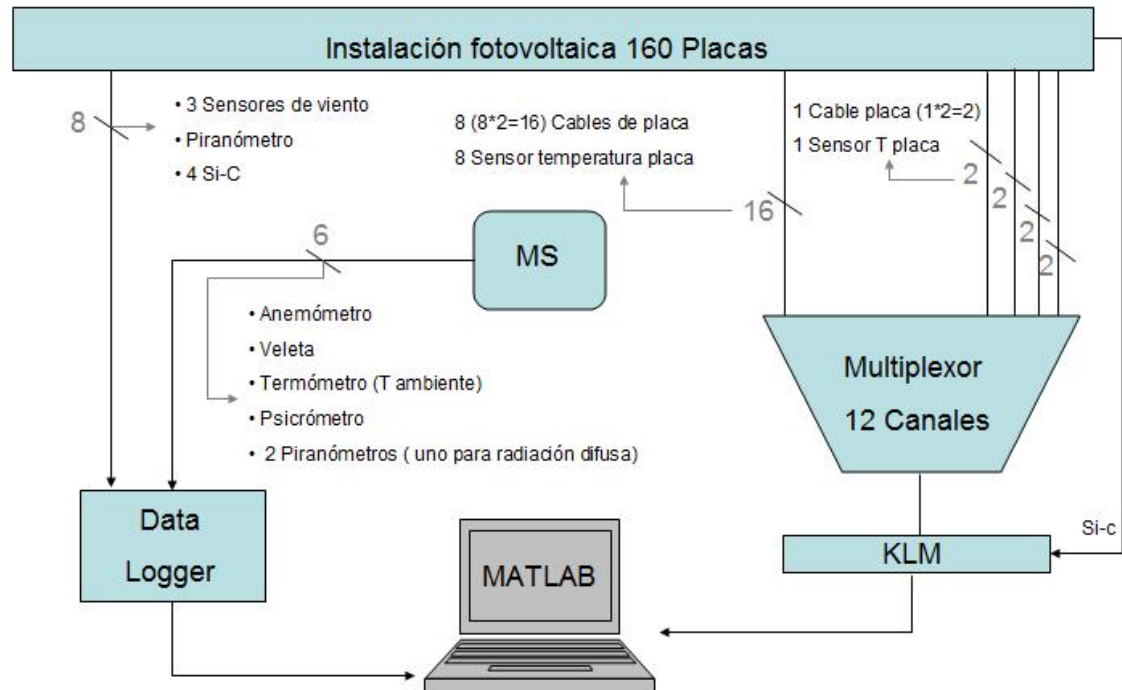


Figura 2.3.: Esquema conceptual del sistema de medición de la instalación fotovoltaica de la azotea

2.4.3. Accesorios adicionales para el montaje de los aparatos

Una parte del presupuesto a tener muy en cuenta, era la dedicada a todos los accesorios necesarios para el montaje del sistema de medición:

- Protector para el termómetro de temperatura ambiente.
- Soporte para los sensores de viento, anemómetro y veleta en la estación meteorológica.
- Soporte para los piranómetros en la estación meteorológica.
- Soporte y mástil para la estación meteorológica.
- Cableado para sensores, 500 m.
- Bandejas de cableado para toda la instalación, 210 m.
- Instalación y montaje de los sensores, cableado, y bandejas de cableado, es decir, mano de obra.

2.4.4. Distribución de los componentes en el espacio de la cubierta

Una vez determinados los aparatos que íbamos a comprar, el siguiente paso fue determinar cómo estarían distribuidos en el espacio de la azotea. La instalación de 160 placas está distribuida como ya se ha explicado en el apartado Instalación 2.1.3, y como se puede observar en la figura 2.4. En realidad, el número de placas disponibles para medición eran 20, contando con que la instalación estaba distribuida en 20x8. El conjunto de multiplexor, trazador de línea y data logger iría en un armario eléctrico con calefacción, que se colocó detrás de la instalación de manera que no interviniera en el funcionamiento de la instalación y que fuera de fácil acceso para la conexión de los cables, como se observa en la figura 2.4.

La determinación de la ubicación de la estación fue un punto conflictivo, ya que el punto que mejores condiciones ofrecía era la esquina sudoeste de la instalación, pero a su vez estos datos no se podían considerar representativos de la instalación, ya que la influencia de la parte alta del edificio tanto con respecto a las sombras como al viento era menor que en más del 80 %, además de que en tal caso la estación ejercería una sombra sobre los módulos de la primera fila. Por lo que finalmente, se llevó a la parte posterior de la instalación, colocándola en lo que se correspondería con el centro de una de las filas de 24 módulos.

Con el fin de observar la interrelación entre la parte alta del edificio y el viento, se colocaron 3 anemómetros adicionales, el primer anemómetro se colocó en la última fila de módulos, en la esquina más oriental, el segundo se colocó en la fila número 5, justo en el punto medio, y el último se colocó en la primera fila, en la esquina más occidental. Los sensores de temperatura de módulo se adherían a las partes posteriores de los módulos, objeto de medición.

Finalmente se colocaron los tres piranómetros en la estación meteorológica, teniendo así todos los valores meteorológicos referenciados a un mismo punto, a pesar de que en un principio se pensó en colocar dos de los piranómetros en uno de los módulos. Por lo que la estación meteorológica se componía finalmente de tres piranómetros, un termómetro, una veleta, un anemómetro y un psicrómetro, éste último colocado entre la carcasa exterior e interior del armario eléctrico, siendo así protegido de la lluvia.

Una de las células de referencia, sensor de radiación de silicio, fue colocada al lado de la estación meteorológica, siendo la que proporciona los datos de radiación que posteriormente veremos como G (W/m^2), las otras cuatro se colocarán en función de los módulos que se estén midiendo en esos momentos.

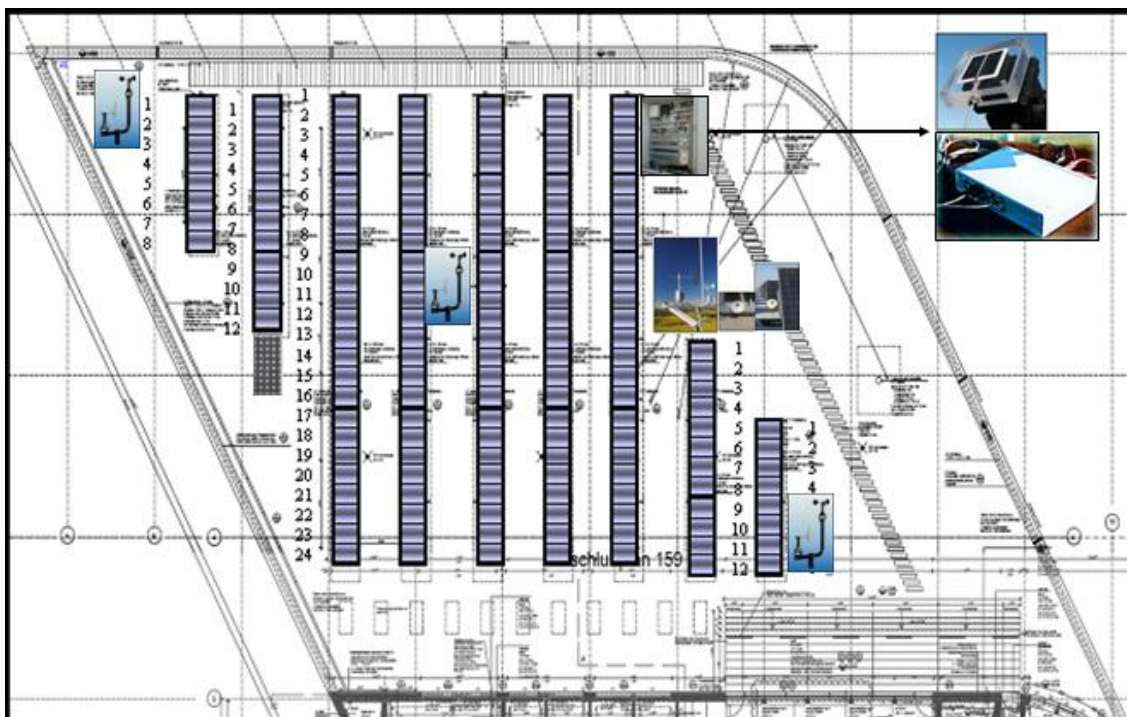


Figura 2.4.: Esquema de la distribución final de los aparatos

2.5. Problemas

A lo largo de la creación del concepto y planificación del sistema de recogida de datos surgieron varios imprevistos que se fueron solventando paralelamente a la realización de otras tareas. Este punto es bastante importante en la realización de mi PFC, ya que podría decirse que es el punto más cercano a la realización de un proyecto en una empresa en el mundo laboral real. Dada la naturaleza muy distinta de cada uno de los problemas, tratarán de ser explicados en los siguientes apartados.

2.5.1. Problemas en la planificación

2.5.1.a. Sombras, influencia de la parte alta del edificio

Como ya se ha comentado anteriormente en la sección Instalación [2.1.3](#), el nuevo edificio de Solar World Innovations en Freiberg, tiene una parte más alta en la zona más oriental del edificio. Esta parte del edificio genera una serie de sombras en nuestra instalación, ya que el sol sale por el Este y la instalación está en la azotea de la parte más occidental. Este factor es considerado negativo desde el punto de vista de aquellos módulos que son conectados a red, pero puede aportar un punto interesante a la investigación

2. Sistema de recogida de datos

considerando que podemos medir módulos de las mismas características de manera simultánea y en el mismo lugar, es decir bajo las mismas condiciones ambientales, siendo unos sombreados y otros no.

Por lo que con objeto de aportarle exactitud a este proyecto, se realizó un estudio sobre las sombras que afectarían a la instalación. Éste no estaba dentro de las tareas del proyecto, por lo que no existía ningún programa que nos permitiera hacer los cálculos automáticamente. Se siguió un sencillo método de cálculo, ver Anexo D.1. , la exactitud era la justa y necesaria como para crear una idea de la influencia de las sombras. Al mismo tiempo se realizó una estimación de las horas de sol por mes, determinando así las 6 horas idóneas para las mediciones.

En la siguiente figura 2.5 se observa un ejemplo de los diagramas solares calculados para 29 puntos de nuestra instalación.

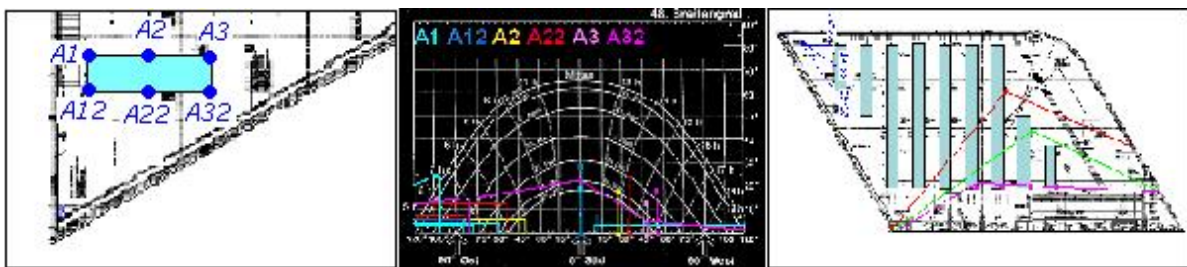


Figura 2.5.: Ejemplo representación diagrama solar para una fila de la instalación y proyección de sombra en la instalación

2.5.1.b. Bandejas de aluminio para cableado

La instalación requería de bandejas de cableado para todos aquellos cables que conectarían los distintos módulos a medir con el armario eléctrico, dada la condición de que debían poderse medir todos los módulos de la instalación, toda ella debería estar implementada con bandejas de cableado. En un principio se pensó que la instalación de éstas la haría la empresa que se encargaba de toda la instalación eléctrica del edificio, sin embargo, una semana antes de que aprobaran el presupuesto de nuestra instalación nos comunicaron que AEK no se encargaba de la instalación, ni del suministro de las bandejas que se necesitaban.

Se realizó un primer cálculo aproximado de los metros necesarios, aproximadamente 200 m, de distintas secciones, siendo éstas variables en función de que tuvieran que albergar el cableado para 1, 4, 8, 9 o 12 módulos. Pudiendo alcanzar así al menos un módulo de todos los grupos de 8 en los que se divide la instalación.

Cada una de las secciones ha sido calculada con la siguiente fórmula, siendo la sección calculada para un módulo de 5,25 cm²:

2. Sistema de recogida de datos

$S_{total} = 4 * n * S_{Mod} + n * S_{Temp} + m * S_{SiC}$, siendo:

- n : número de módulos.
- S_{Mod} : sección del cable de conexionado del módulo, este primer término se multiplica por 4, ya que se tiene 2 para el positivo y 2 para el negativo.
- S_{Temp} : sección del cable del sensor de temperatura.
- m : número de células de referencia en función del número de módulos, es decir, para los tramos de bandeja en los que contemos con medir 1, 8, 9, y 12 módulos, " m " será el total de células de referencia adicionales de las que disponemos, 4, para los tramos en los que se cuenta con medir un módulo, entonces " m " será igual a 1.
- S_{SiC} : sección del cable del sensor de radiación de silicio.

Contando todo lo hasta entonces calculado en presupuesto nos sobraban la dieciseisava parte del presupuesto, nos pusimos en contacto con AEK, respondiéndonos con una oferta que requería 3 veces más del dinero del que disponíamos. La primera de las alternativas falló, por lo que se siguió contactando con varias empresas del sector, pero ninguna se acercaba si quiera a nuestro presupuesto. La posibilidad de bandejas de cables de plástico se descartó bastante rápido, ya que son aptos para interiores, ya que en el exterior los efectos del frío, calor, lluvia, nieve, radiación...las deteriorarían con rapidez y facilidad.

Finalmente se preguntó a la empresa que nos iba a suministrar todos los aparatos, Mencke&Tegtmeyer, el presupuesto era superior al dinero del que disponíamos, por lo que surgió la idea de utilizar la mitad de las tapas de bandeja de las necesarias, y renunciar a un trazador de línea, que se había solicitado para la medición de módulos aislados. Finalmente todas las bandejas instaladas eran de secciónn, 60x100 mm.

2.5.1.c. Mapa viejo

Una vez realizado todo el pedido, y fijados los puntos en los que iba a instalarse cada aparato, y por donde iban a pasar las bandejas para el cableado de los módulos a medir, nos dimos cuenta de que los planos de la azotea habían cambiado, cambio que ya afectó a la disposición de los elementos sobre el papel, pero finalmente la empresa que construyó el camino de la azotea ni siquiera siguió el segundo plano, por lo que el camino real no se corresponde con ninguno de los planos que se poseen, como se puede observar en la figura 2.6. El cambio de trazado repercutía en los puntos donde colocaríamos el armario eléctrico y la estación meteorológica de manera muy ligera, mientras que la influencia más significativa sería sobre el trazado de las bandejas de cableado a los módulos, ya que habría que utilizar unos metros más de los calculados, finalmente se compraron 210 m.



Figura 2.6.: En verde el primer trazado del camino en la azotea, en rojo continuo y discontinuo el trazado del segundo mapa, la parte discontinua no existe, siendo el camino real el naranja en ese tramo. En morado, las bandejas de cableado actuales.

2.5.1.d. Retraso en el suministro

El pedido se realizó con fecha 19.02.2010, viernes, se contaba con un tiempo de suministro de 9 semanas, es decir, el sistema debería estar funcionando a fecha de 26.04.2010. Los retrasos sufridos en los suministros de cualquier producto son por todos conocidos, y por lo tanto tenidos en cuenta. La demora final duró hasta el 2.06.2010, es decir 5 semanas de retraso. Las consecuencias de este retraso fueron únicamente personales.

2.5.2. Problemas durante la instalación

La instalación se realizó los días 26, 27, 31 de mayo y el 1 de junio del 2010. A lo largo de esos días fueron varios los problemas que fueron surgiendo, todos los problemas eran de distinta naturaleza, pero dado al carácter real de este PFC, he considerado que son un punto muy importante a nombrar.

2.5.2.a. Pararrayos azotea

Los pararrayos instalados en la azotea tampoco aparecían en los planos de los que disponíamos. Al llegar el señor Tegtmeier y el señor Weber de la empresa Ingenierbüro Mencke&Tegtmeier, se observó que las fijaciones de los pararrayos interceptaban el camino de las bandejas para el cableado, por lo que hubo que cambiar nuevamente el

trazado de las bandejas para cables, siendo el resultado final el que se puede observar en la figura 2.6.

2.5.2.b. Planchas de hormigón

El suelo de la azotea es de grava, por lo que para la fijación de la estación meteorológica, el armario eléctrico y las bandejas de cableado se necesitaban planchas de hormigón, sin embargo, Mencke&Tegtmeyer no las habían tenido en cuenta al planificar la instalación. El camino había sido realizado con unas de 59,5 x 39,5 x 8 cm, costaban 20 €/por placa, incluido el montaje. Por lo que se estimó que saldría mejor económicamente devolverlas al proveedor y comprar unas de menor gama en la cadena alemana de bricolage, Baumarkt.

Finalmente se compraron 14 de dimensiones 49,5 x 49,5 x 5 cm. de coste 4€/unidad, 6 fueron para la estación meteorológica y 8 para el armario eléctrico. Y también se compraron 148 planchas de 29,5 x 29,5 x 3,5 cm. a 3€/unidad, para la fijación de las bandejas de cableado. Siendo en total el gasto de 500 €, considerablemente menor que los 3240€ que hubiera supuesto utilizando las planchas del camino.

2.5.2.c. Montaje inacabado

Como ya he nombrado anteriormente al comienzo de este apartado, el montaje acabó el día 1 de junio, sin embargo esta afirmación no es del todo cierta, ya que en ese momento no estaban instalados todos los aparatos y sensores. Los elementos que faltaban y las razones eran:

- Disco parasol CM 121, todavía no lo habían recibido.
- 4 Sensores de temperatura del módulo, se pidieron 10 sensores extra además de los recibidos con cada aparato trazador de línea, sólo 6 estaban en la instalación, la falta de cable impidió la instalación de los 4 últimos.
- 4 Sensores de radiación de tipo Si-C, células de referencia, éstas también fueron pedidas además de las recibidas para cada trazador de línea. No fueron instalados también en este caso debido a la insuficiencia de cable.

Al realizar la instalación del día 01.06.2010, Mencke&Tegtmeyer nos comunicaron que se realizaría una revisión a las dos o tres semanas a partir de ese momento, para comprobar el correcto funcionamiento del sistema y traer todo el cableado necesario, así como los sensores que faltaban. La revisión se realizó el 05.07.2010, fecha en la que la instalación se completó.

2.5.2.d. Problemas con la recepción de datos

Otro de los problemas relacionados con la instalación inacabada fue la recepción de una de las piezas del data logger, un ISM111, sin programar, se les había pasado por alto la programación del módulo que se encargaba del piranómetro. Recibimos una solución con fecha 17.06.2010, la cuál consistía en que nosotros reprogramáramos el módulo mandándonos ellos la licencia necesaria, la reprogramación se completó a fecha 21.06.2010.

Debido a diversas complicaciones que serán explicadas en la Sección, reprogramación, [3.6.2](#), la detección de otros problemas del sistema se demoró dos semanas y media, tiempo utilizado para solventar el problema de la reprogramación, por lo que después de ese tiempo comencé a evaluar los datos, observando que las curvas relacionadas con la I_{sc} no se correspondían a los cánones que debían seguir, los valores nunca superaban los 4,5 A, por lo que se reparó en que en el conjunto trazador de línea, multiplexor y ordenador industrial, los parámetros de I_{sc} , STC fijados no se correspondían a los reales de los módulos objeto de medición. Es decir, los parámetros no habían sido ajustados a los datos de cada uno de los módulos que medíamos.

Una vez solucionado este problema, se observó que los datos obtenidos para el rendimiento de las placas, tampoco eran adecuados lo que nos llevó a buscar, y repercutir en que los valores para P_{mpp} , U_{mpp} y U_{oc} no eran los adecuados. Este problema no fue de tan sencillo arreglo, ya que tras varias conversaciones con Mencke %Tegtmeyer, varias mediciones en la instalación, seguíamos sin encontrar en qué punto fallaba, dándonos como resultado tensiones del orden de diez veces menor a las que supuestamente debíamos obtener. El día 05.07.2010 dos trabajadores de Mencke %Tegtmeyer vinieron para completar el sistema y revisar los fallos, fue en ese momento cuando repararon en que habían colocado un aparato trazador de línea sin calibrar, ya que ellos habían realizado las pruebas en sus laboratorios con otro aparato.

3. Sistema de evaluación de datos

3.1. Explicación de los parámetros recogidos

A través del aparato trazador de línea I-V, modelo PV-KLA, y del PC, se recolectan cada 30 segundos los datos de intensidad [A] y voltaje [V] que proporcionan los módulos, así como datos de radiación [W/m^2]. Por lo que cada 30 segundos disponemos de una curva característica por módulo, este tiempo de ciclo es un parámetro que se puede variar en la configuración del sistema a través del PC. Los datos son almacenados en archivos ASCII, como los que se muestran en el lado izquierdo de la figura 3.1, en la pantalla del PC conectado al sistema en el armario eléctrico se observa la curva I-V al mismo tiempo que la G-V, lado derecho de la figura 3.1.

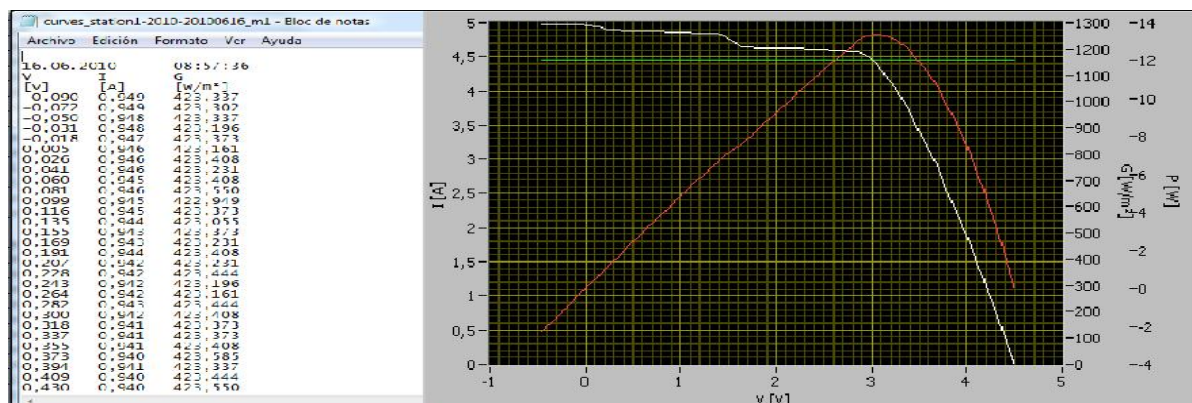


Figura 3.1.: Curva y datos software Mencke&Tegtmeyer

Para caracterizar eléctricamente un módulo fotovoltaico es necesario representar el conjunto de valores de intensidad de corriente y tensión que bajo cualquier situación de carga, irradiancia o temperatura del módulo puedan darse, para posteriormente poder cuantificar algunos parámetros que nos permitirán comparar tanto distintos módulos como distintas situaciones, observando así el comportamiento de los módulos en cada caso.

El data logger no sólo se encarga de recolectar los datos de tensión, intensidad y radiación cada 30 segundos, sino que también recoge otros datos de gran importancia, tanto de carácter eléctrico, V_{mpp} , I_{mpp} , P_{mpp} , V_{oc} , I_{sc} , FF , como meteorológico, ve-

locidad y dirección del viento, temperatura ambiente, radiación difusa, radiación en el plano del módulo, radiación normal y humedad relativa del aire.

3.1.1. Intensidad de corriente del módulo fotovoltaico [A]

La conversión de la energía solar en energía eléctrica es consecuencia del llamado efecto fotovoltaico, es necesario conocer a groso modo el desarrollo de este fenómeno para llegar a comprender correctamente el funcionamiento de una célula fotovoltaica, y en consecuencia la aparición de la intensidad de corriente eléctrica.

La mayoría de los módulos comerciales utilizan como semiconductor el silicio, por lo que se tratará de explicar el proceso a través de este elemento. El silicio, que es el segundo elemento más abundante en la corteza terrestre después del oxígeno, tiene de número atómico 14, y pertenece al cuarto grupo de la tabla periódica, por lo que posee catorce electrones, y cuatro de estos son electrones de valencia. Estos cuatro electrones son capaces de participar en las interacciones con otros elementos, o con el propio silicio. Así por ejemplo dos átomos de silicio adyacentes pueden tener en común dos electrones, generando un fuerte enlace electrostático entre los átomos, enlace que puede ser roto suministrando la suficiente energía como para elevar al electrón a un nivel superior, alcanzando así la banda de conducción, en el caso del efecto fotovoltaico la energía aportada para elevar al electrón hasta la banda de conducción proviene de los fotones de la luz solar. En este proceso no sólo el electrón será finalmente capaz de desplazarse, sino que también habrá dejado un hueco en la banda de valencia, el cuál podrá ser rellenado por otro electrón. Por lo que se generan dos portadores, un electrón en la banda de conducción, y un hueco en la banda de valencia.

Para poder obtener una corriente aprovechable, es necesario crear un movimiento coherente de portadores, por lo que se crea un campo eléctrico dentro de la célula fotovoltaica, para ello someteremos las obleas de silicio a procesos de dopado, obteniendo como resultado una zona dopada con átomos de boro, lado positivo ya que el boro tiene tres electrones de valencia, y otra con átomos de fósforo, lado negativo ya que el fósforo tiene cinco electrones de valencia, creando así la llamada estructura de diodo, caracterizada por la unión P-N, siendo P el lado positivo dopado con Boro, y N el negativo dopado con Fósforo.

Por lo que al exponer una célula fotovoltaica a la luz solar, esta se comporta como un generador de corriente, la corriente entregada a una carga por una célula solar, es el resultado de dos componentes de corriente que se oponen:

- **La corriente de iluminación**, es decir corriente fotogenerada, debida a los portadores generados por la iluminación.

$$I_{ph}=I_L$$

3. Sistema de evaluación de datos

- **La corriente de oscuridad**, corriente del diodo, debida a la recombinación de portadores que produce el voltaje externo necesario para poder entregar energía a la carga.

$$I_D = I_O(e^{\frac{eV}{kT_c}} - 1)$$

A partir del circuito equivalente de una célula fotovoltaica, figura 3.2, y de las fórmulas anteriormente expuestas, se deduce la ecuación que representa a todos los pares I-V de una célula fotovoltaica:

$$I = I_L - I_O[e^{\frac{e(V+IR_s)}{kT_c}} - 1] - \frac{V+IR_s}{R_p}$$

Siendo:

e , carga del electrón, $1,6021 \times 10^{-19}$ C.

k , constante de Boltzman.

T_c , Temperatura en grados Kelvin.

R_s , resistencia en serie del cct. equivalente.

R_p , resistencia en paralelo del cct. equivalente.

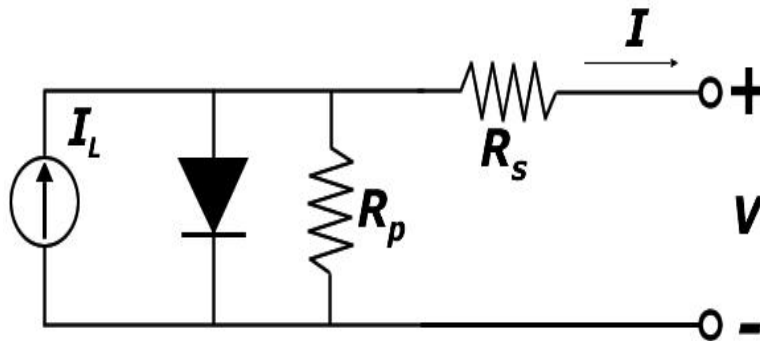


Figura 3.2.: Circuito equivalente de una célula fotovoltaica

Algunos parámetros de interés con respecto a la intensidad de corriente que circula por una célula fotovoltaica son:

- Intensidad de cortocircuito, **I_{cc}** , es la máxima intensidad que puede circular por una célula, y se alcanza poniendo ésta a cortocircuito.
- Intensidad en el punto de máxima potencia, **I_{mpp}** , es el máximo valor de intensidad para el que la potencia entregada a una carga es máxima en el funcionamiento de la célula.

3.1.2. Tensión del módulo fotovoltaico [V]

Para el voltaje existen también dos parámetros de especial importancia:

- Tensión a circuito abierto, **Voc**, es el máximo voltaje que se puede registrar en bornes de una célula, sin permitir el paso de la corriente entre los bornes, en circuito abierto.
- Tensión en el punto de máxima potencia, **Vmpp**, es el máximo valor de tensión para el que la potencia suministrada a una carga es máxima durante el funcionamiento de la célula. También es utilizada como tensión nominal. Comercialmente, los módulos se identifican por su potencia y su tensión nominal, con su marca y modelo correspondientes. La tensión nominal no se corresponde, ni debe confundirse, con la tensión a circuito abierto. Simplemente hace referencia a la idoneidad del módulo en cuestión para su utilización en sistemas con dicha tensión nominal, o tensión habitual de utilización.

3.1.3. Punto de máxima potencia [W]

Es el punto en el que se maximiza el producto de tensión por intensidad de corriente para una determinada radiación, es decir la carga para la cual la célula es capaz de entregar la máxima potencia. Este punto varía con la radiación incidente sobre la célula, debido a la dependencia de la intensidad de corriente, y al mismo tiempo a la de ésta con la radiación. Por lo que a mayor radiación obtendremos mayores potencias.

Los valores que caracterizan a este punto son la potencia, **Pmpp** [W], que es llamada en ocasiones potencia de pico o potencia nominal, y como ya acabamos de ver la intensidad **Impp**, y la tensión **Vmpp**. Este par de valores es único, es decir, sólo existe un punto en la curva I-V para el cuál la potencia es la máxima posible. Puntos que se ven claramente reflejados en las curvas características de un módulo, como se ve en la figura 3.3

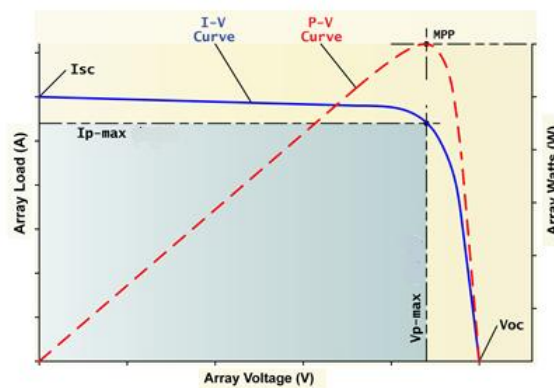


Figura 3.3.: Punto de máxima potencia, curva I-V y P-V

3.1.4. Factor de llenado [%]

El factor de llenado, Fill Factor en inglés, es un término que nos ayuda a definir la eficacia de la célula.

$$FF = \frac{P_{mpp}}{V_{oc}I_{sc}}$$

Nos permite obtener la relación entre la máxima potencia real que podemos obtener para esas condiciones con la potencia que se obtendría teniendo la máxima intensidad, I_{sc} , y la máxima tensión, V_{oc} .

3.2. Explicación de los parámetros calculados

3.2.1. Condiciones Estándar

Las condiciones estándar para la medición de módulos son:

- Temperatura 25°C
- Irradiancia 1000 W/m²
- Masa de aire espectral 1,5

La medición de potencia en condiciones estándar determina los kilovatio pico (kWp) que caracteriza a los módulos solares comercialmente. Por lo que es muy importante conocer los valores en condiciones de estándar ya que es una referencia de competitividad entre módulos.

En el caso de la instalación objeto de este PFC, los parámetros en condiciones estándar, STC, no son recibidos como parámetros, por lo que tuvieron que ser calculados como parte de la programación adicional en Matlab. Las fórmulas utilizadas son las siguientes:

$$U_{oc,STC} = \frac{U_{oc}}{1 + TK_{U_{oc}}(T - 25)}$$

$$I_{sc,STC} = \frac{I_{sc} * 1000}{G * (1 + TK_{I_{sc}}(T - 25))}$$

$$P_{mpp,STC} = \frac{P_{mpp} * 1000}{G * (1 + TK_{P_{mpp}}(T - 25))}$$

Donde:

3. Sistema de evaluación de datos

$TK_{U_{oc}}$, coeficiente de temperatura para la tensión en circuito abierto, representa el porcentaje en el que aumenta o disminuye la U_{oc} para una variación de la temperatura de un grado Kelvin, los valores utilizados son -0,33 %/K para módulos de silicio monocristalino, y -0,34 %/K para los de policristalino.

$TK_{I_{sc}}$, coeficiente de temperatura para la intensidad de corriente en cortocircuito, y representa el porcentaje en el que aumenta o disminuye la I_{sc} para una variación de la temperatura de un grado Kelvin, los valores para módulos monocristalinos 0,042 %/K y 0,034 %/K para policristalinos.

$TK_{m_{pp}}$, coeficiente de temperatura para la potencia de pico, representa el porcentaje en el que aumenta o disminuye la $P_{m_{pp}}$ para una variación de la temperatura de un grado Kelvin, los valores utilizados son -0,45 %/K para mono y -0,48 %/K para policristalino.

G , irradiancia en W/m^2

T , temperatura en $^{\circ}C$.

Los coeficientes de temperatura pueden observarse en las fichas técnicas de los módulos, Anexo C.1.

3.2.2. Rendimiento del módulo

Hay distintos parámetros que nos ayudan a determinar la eficiencia de un módulo fotovoltaico, hasta ahora han sido explicados dos, el trabajo en el punto de máxima potencia, 3.1.3 que nos permite comparar entre módulos, y el factor de llenado 3.1.4 que podría decirse, nos permite comparar el funcionamiento real con el funcionamiento ideal de la placa, para unas determinadas condiciones. Pero todavía podemos calcular un tercero que nos aporta información sobre la eficiencia de conversión del módulo, es decir de toda la energía que recibe, cuánta es finalmente convertida en energía eléctrica útil.

$$\eta = \frac{P_{m_{pp}}}{G * A_m}$$

Siendo:

A_m , área del módulo en m^2 .

3.3. Explicación de las interfaces gráficas para usuario

Como ya se ha explicado con anterioridad una de las partes más importantes de este PFC, ha sido la dedicada a la programación en MATLAB® con el objeto de crear un sistema de interfaces que faciliten al usuario la evaluación de los datos fotovoltaicos, sin la necesidad de saber programar en MATLAB® o de incluso manejarlo.

En principio mis tareas con respecto a MATLAB®, consistían en una programación general, a grosso modo, siendo la ampliación al detalle objeto de un futuro PFC en la misma empresa, sin embargo, finalmente la programación realizada puede considerarse bastante detallada.

GUIDE fue la herramienta de MATLAB® utilizada para la programación de interfaces, a partir de ahí generé una red de interfaces que posibilitan la evaluación, el siguiente esquema 3.4 trata de aclarar la organización de mi programa. Es decir, en este apartado se tratará de explicar la *forma*, y no el *contenido*, objeto de la siguiente sección.

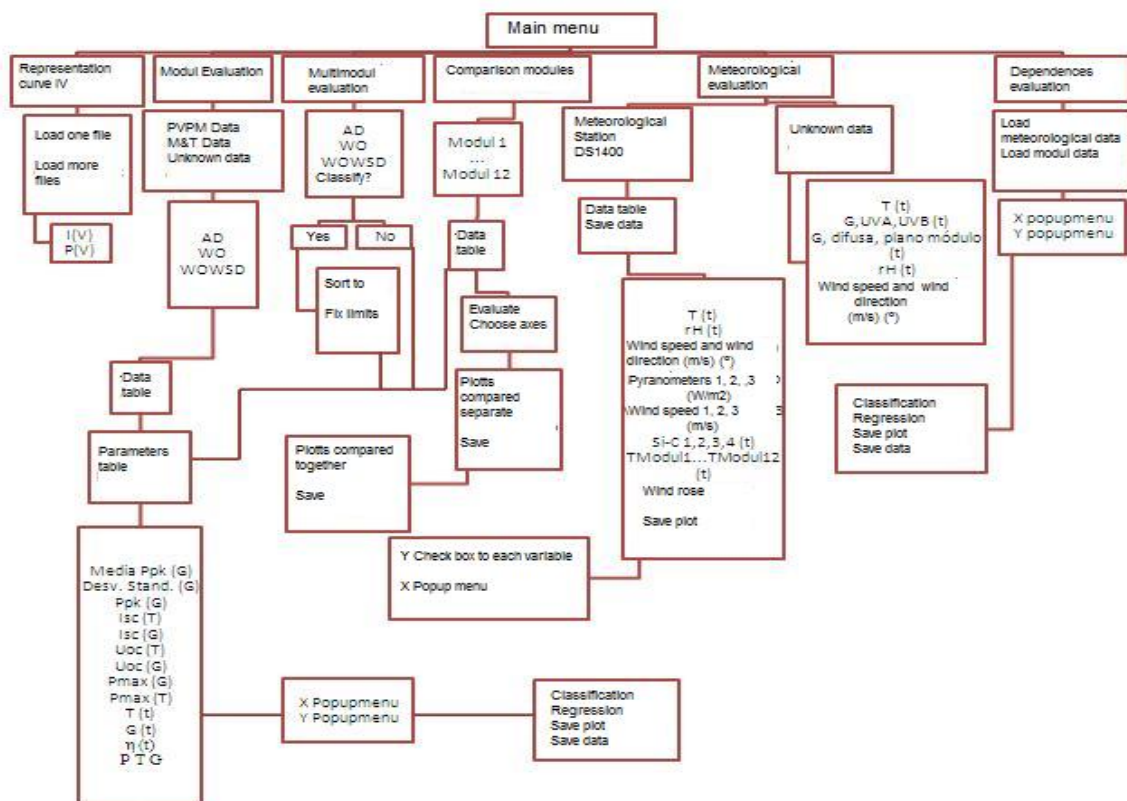


Figura 3.4.: Esquema de la red de interfaces en MATLAB®

3. Sistema de evaluación de datos

En la figura anterior 3.4, podemos observar como se repiten los términos:

AD , all data, es decir cuando lo que evaluamos es el total de datos.

WO , without outliers, evaluamos todos los datos excepto aquellos datos que pueden ser fruto de un error en la medición.

WOWSD , without outliers and 3 times standard desviation, evaluamos todos los datos excepto los que son fruto del error y todos aquellos que no estén dentro del límite ± 3 veces la desviación estandard.

Como el esquema nos muestra, el programa parte de un menú principal, desde el cual se puede acceder a distintos tipos de evaluaciones, que son las que aparecen en la segunda fila del esquema, se tratará de explicar brevemente lo que cada una de ellas ofrece, para una explicación más detallada y gráfica, ver CD adjunto, donde se explican y muestran cada una de las interfaces.

3.3.1. Representación curva IV

A través de esta interfaz podemos acceder a un menú que nos permite representar la curva IV, para un módulo o más de un módulo. En ambos casos, la interfaz solicita al usuario que introduzca la hora objeto de evaluación, por lo que para el caso de la evaluación de un módulo obtendremos dos curvas, ya que al ser el ciclo de 30 seg. en cada minuto se realizan dos mediciones, permitiéndonos así comparar todos los parámetros representativos para ese módulo en ese minuto, así como las gráficas de I(V), G(V), P(V), 3.5. Lo mismo sucederá para la opción de evaluación de más de un módulo, siendo esta vez comparados distintos módulos durante el mismo segundo.

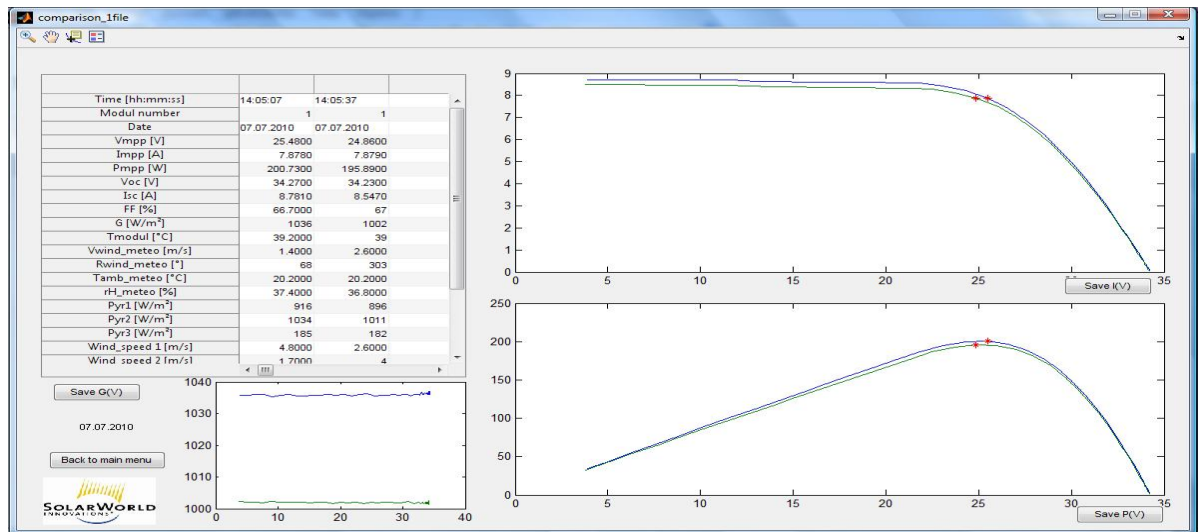


Figura 3.5.: Interfaz que muestra las representaciones I(V), P(V), G(V), así como parámetros de importancia en el funcionamiento del módulo

3.3.2. Evaluación de un módulo

Al seleccionar en el menú principal la evaluación de un módulo, aparece una interfaz que nos brinda varias posibilidades, como son la evaluación de datos procedentes de distintas fuentes, PVPM (datos anteriores a mi estancia en SolarWorld, procedentes de las mediciones con aparatos de la empresa PVE), Mencke&Tegtmeyer (datos principalmente de la instalación objeto de mi PFC, en la azotea del DS1400), y datos provenientes de fuentes desconocidas.

Una vez elegido el dato, tendrán que ser seleccionados los datos con los que se quiere trabajar, como se ha explicado anteriormente, AD, WO, WOWSD. Así como, señalar con qué tipo de módulo estamos trabajando poli o monocristalino, y el área del módulo.

Ya seleccionados todos los parámetros y a partir de este punto encontraremos una serie de interfaces que se repetirán en las distintas opciones de evaluación, serie a la que podríamos llamar «Interfaces de evaluación Estandar». La primera será una interfaz que expone los datos de una manera ordenada 3.6.

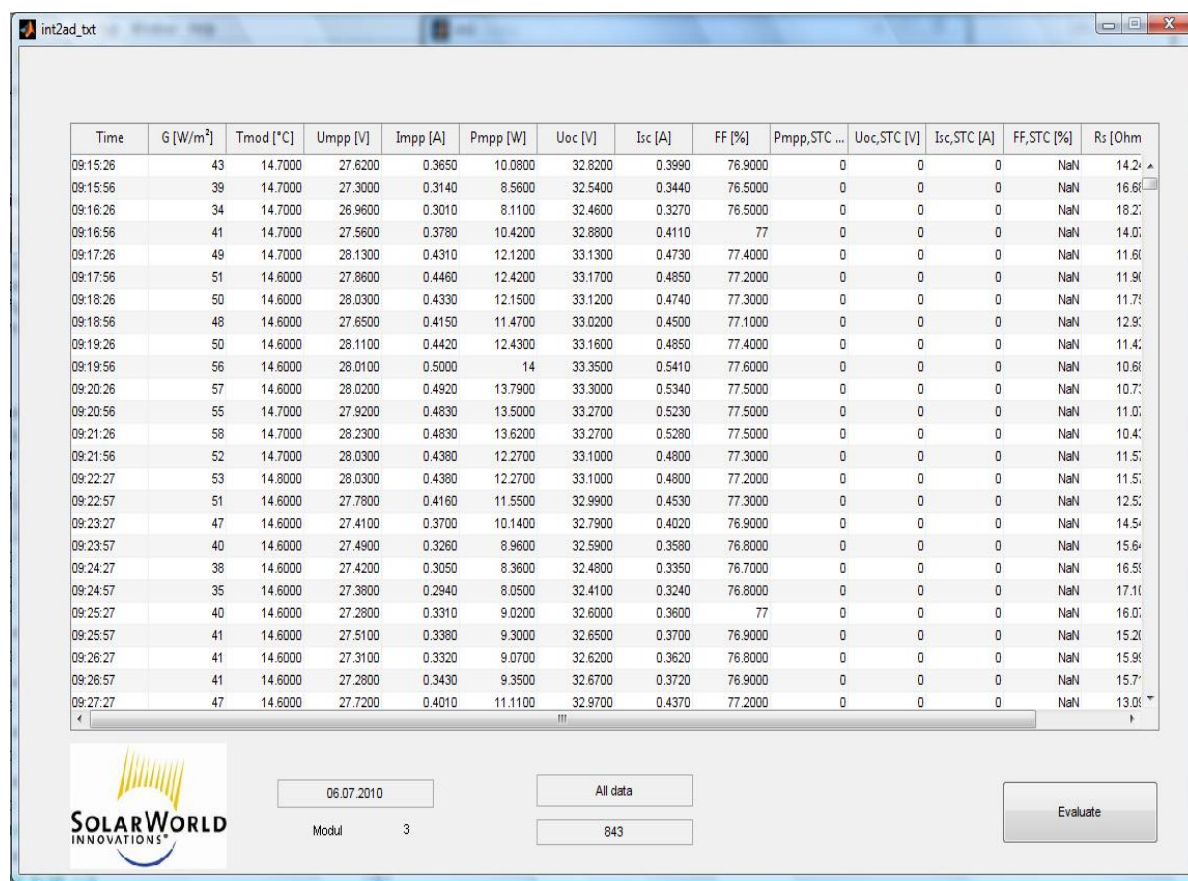


Figura 3.6.: Interfaz que muestra los datos en una tabla ordenada

3. Sistema de evaluación de datos

Posteriormente, en la segunda figura 3.7 , encontramos una tabla con datos significativos para el análisis del funcionamiento. Por ejemplo para explicar lo que representa la tabla superior nos centraremos en la Ppk, o también llamada Pmpp, la columna de la izquierda es la referente al valor medio de esta variable, encabezada por Ppk AV, allí podremos observar en la primera celda el valor medio de Ppk para todos aquellos datos cuya radiación es mayor de 0 W/m², en la segunda para radiación mayor de 100 W/m², y así sucesivamente. Lo mismo sucederá para la columna cuyo encabezamiento es Ppk SD, pero esta vez los valores se referirán a la desviación estandar. Y todo lo anterior es igualmente aplicable a las siguientes columnas, referentes a Uoc e Isc.

En el resto de recuadros de la interfaz podemos encontrar valores tales como las pendientes de la rectas entre Ppk, Isc y Uoc con la temperatura, recuadro situado abajo y a la izquierda, así como valores de Rs, Rp. En el recuadro de la esquina inferior derecha podemos encontrar las horas de inicio y final de las mediciones, así como el valor de la Irradiación en Wh/m².

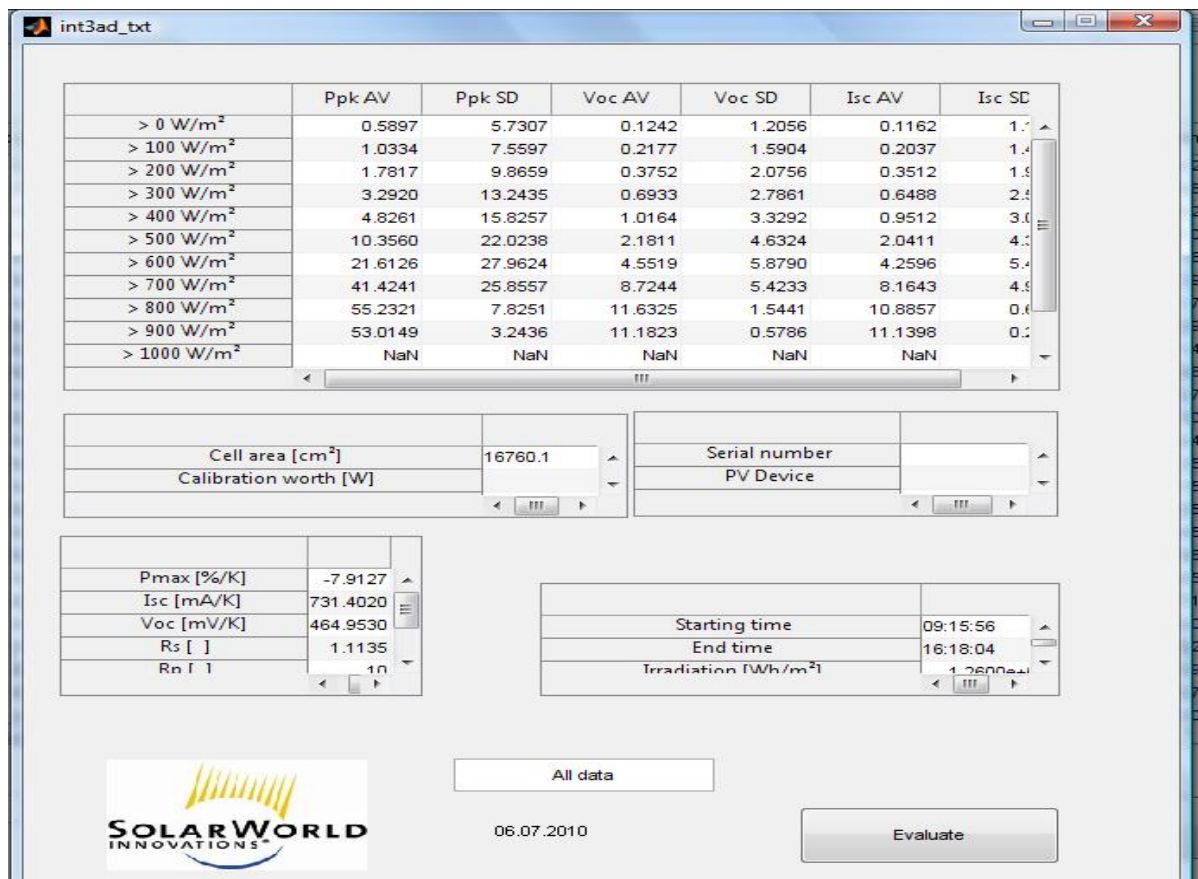


Figura 3.7.: Interfaz que muestra valores calculados de importancia

Y por último, la tercera de la serie 3.10, una interfaz que nos presenta las gráficas más importantes, las necesarias para hacernos una idea general de cómo es el funcionamiento

de nuestro módulo.

En esta misma ventana tenemos la posibilidad de maximizar cada una de las gráficas, en las teclas «Make bigger», así como de realizar una evaluación en tres ejes, clickando en el «Make bigger» de la figura de tres ejes que está al lado del icono de Solar World, pudiendo elegir a través de «Pop up menus» cada una de las variables X, Y, Z. También existe la posibilidad de clasificar los datos representados según una cuarta variable, obteniendo así una diferenciación por colores.

En todas las gráficas del sistema de interfaces existe la tecla «Save», que posibilita guardar esa figura como una figura de MATLAB®, permitiendo así utilizar el amplio abanico que este programa nos ofrece para la evaluación y tratamiento de gráficas y datos.

También tendremos la posibilidad de acceder a una última interfaz, que nos permite la representación en dos ejes de cualquiera de las variables, además nos permite la selección de otra de las variables como variable de clasificación, es decir, tendremos una representación X-Y, y podremos seleccionar una tercera variable cuyos valores máximo y mínimo aparezcan automáticamente en pantalla, pudiendo así clasificar hasta en 5 distintos rangos. Permitiéndonos así observar la dependencia de algunas gráficas con un tercer valor, así como la representación de la regresión de las clasificaciones, y un diagrama de barras que enfrenta las dos variables con la frecuencia.

3.3.3. Evaluación de más de un módulo

En esta opción del menú se puede evaluar tantos módulos como se quiera, de manera que todos los datos se unirán en una gran matriz y serán evaluados todos juntos, es indiferente que los datos provengan del aparato PVPM, de la empresa PVE, o del aparato PVKLA, de Mencke&Tegtmeyer. El objeto de este análisis es la capacidad de observar tendencias en el funcionamiento de los módulos, ya que esta opción nos permite analizar todos juntos los datos de varios días, meses, o incluso años.

En la primera interfaz es posible elegir el tipo de módulo, mono o multicristalino; la cantidad de datos, AD, WO, WOWSD; y además se nos permite una primera clasificación, en el caso de que elijamos no realizarla, la evaluación seguirá los mismos pasos que en la que anteriormente [3.3.2](#) hemos llamado « Interfaces de evaluación estándar». Sin embargo si optamos por una primera clasificación, ésta nos permite seleccionar cualquier parámetro y trabajar sólo con un rango de datos determinados. Por ejemplo si escogemos la hora, pueden aparecer como mínimo las 9:05:36 y como máximo las 17:34:56, y nosotros podemos elegir un rango en el cuál nos interesa trabajar, de 11:00:00 a 15:00:00, otro ejemplo podría ser al elegir la radiación, aparecen como mínimo y máximo de nuestros datos 0 y 1569 W/m², pero se puede limitar la evaluación a los datos entre 800 y 1200 W/m². A partir de esta clasificación se seguirá el proceso de «Interfaces de evaluación estándar».

3.3.4. Comparación de módulos

Desde el menú principal es posible acceder a un subprograma que nos permite comparar hasta 12 módulos distintos, en un principio esta aplicación fue pensada para poder comparar los 12 módulos que se pueden medir en la azotea, pero posteriormente se amplió la programación para que también pudieran ser incluidos en la comparación datos procedentes del aparato PVPM, de PV Engineering.

Esta aplicación nos facilita la capacidad de comparar módulos, observando como un módulo funciona para distintos días, es decir, con distintas condiciones ambientales, o también como varios módulos funcionan en el mismo día, pudiendo así comparar el funcionamiento de cada módulo, o incluso comparar el mismo módulo, pero realizando las mediciones con distintos aparatos trazadores de línea, en nuestro caso, PVKLA y PVPM.

3.3.5. Evaluación de las condiciones meteorológicas

Este apartado se centra en el análisis de las condiciones meteorológicas, desde aquí podemos realizar dos tipos de evaluaciones: una dedicada a los datos obtenidos de la estación meteorológica y del conjunto del sistema del DS1400, y otra evaluación para datos desconocidos. En ambos casos se representan las gráficas más características [3.8](#), que nos permiten tener una idea general de las condiciones meteorológicas.

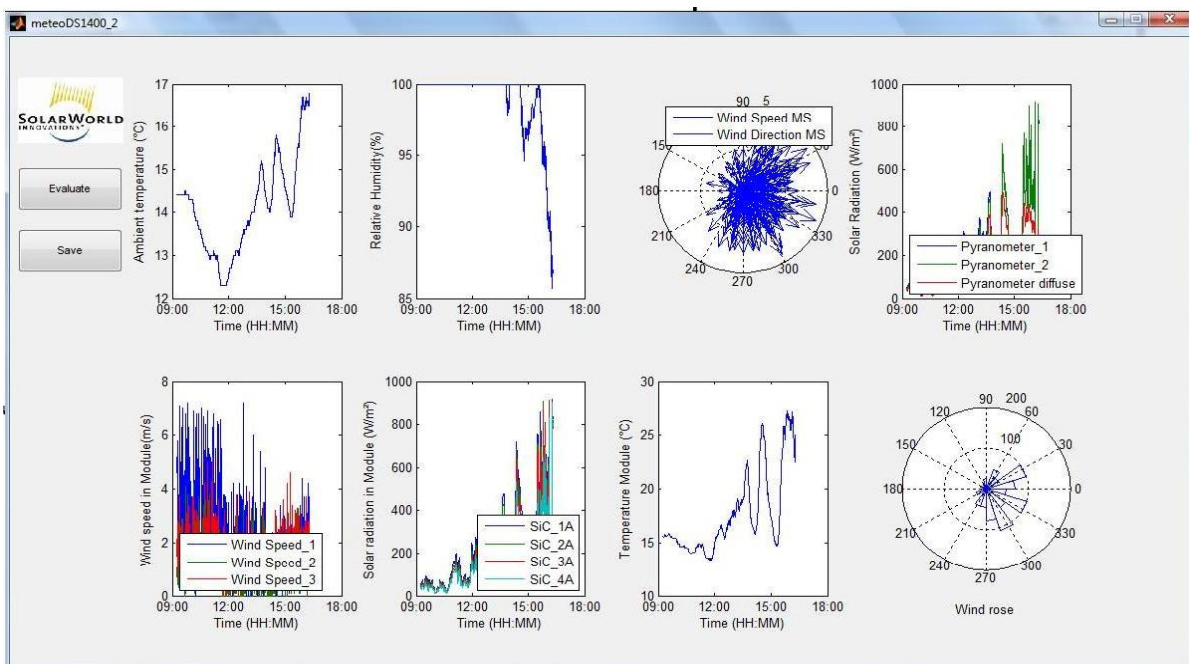


Figura 3.8.: Interfaz que muestra las representaciones más importantes de los datos meteorológicos

3. Sistema de evaluación de datos

Para el caso de la azotea del DS1400 es posible un análisis más personalizado como podemos ver en la figura 3.9, donde incluso existe la posibilidad de representar más de una variable simultáneamente en el eje de ordenadas.

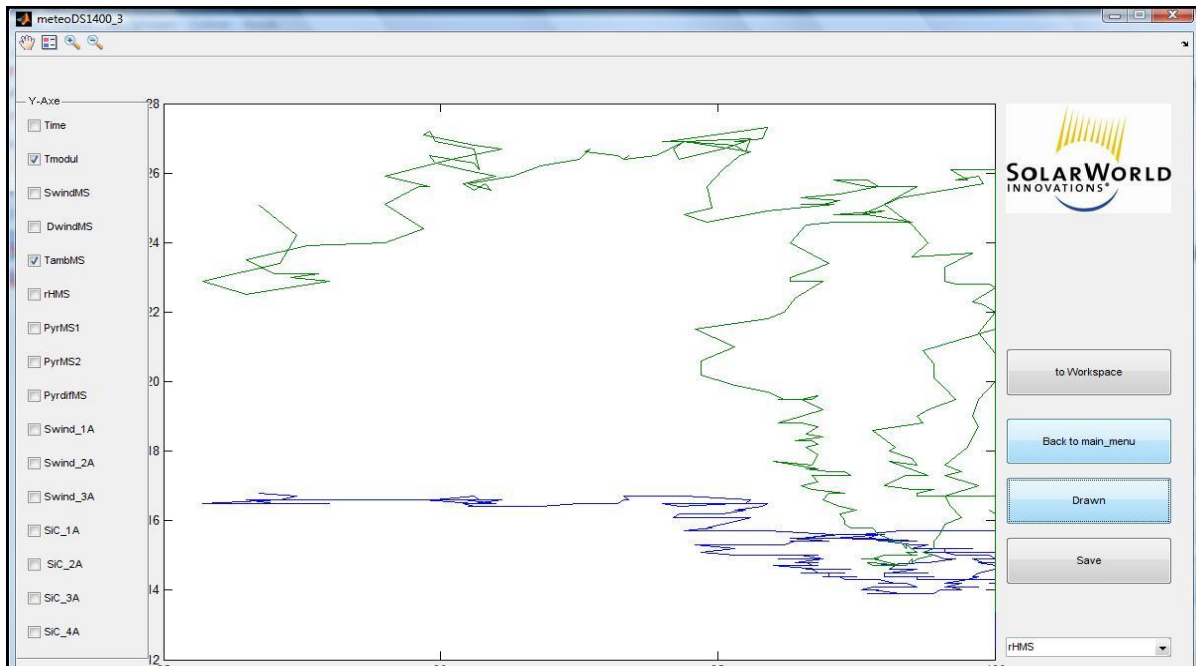


Figura 3.9.: Interfaz que permite elegir los datos meteorológicos a representar

3.3.6. Evaluación de las interrelaciones

Este apartado, podría decirse, que es el objeto de todo el proyecto, se perseguía la posibilidad de tener una instalación lo suficientemente equipada como para poder estudiar las dependencias entre variables meteorológicas y los parámetros que determinan el funcionamiento de los módulos.

Al clicar en el botón de «Evaluación de dependencias», nos aparecerá un menú en el que se puede elegir nuevamente entre cargar un archivo, varios archivos, y varios archivos para comparar. En los «pop up menus» de esta sección aparecerán todos los datos de los que disponemos, es decir uniremos los parámetros eléctricos y de funcionamiento con los datos obtenidos de la estación meteorológica y del resto de la instalación, pudiendo así evaluar, por ejemplo qué influencia tiene el viento sobre la temperatura del módulo, que a su vez tiene una influencia sobre el rendimiento del módulo, etc.

Como ya he comentado al principio de esta sección, la explicación de todas las interfaces requiere gran espacio, por lo que si la explicación relatada en este apartado no ha sido suficiente, o se quiere ver cada una de las interfaces, se encontrará en el CD adjunto una explicación de cada una de las interfaces junto con la programación.

3.4. Explicación de las principales gráficas

El sistema de interfaces gráficas que ha sido programado, ofrece la posibilidad de representar tantos datos como se quiera, opción de varios módulos, incluso para compararlos entre ellos mismos; haciendo tres tipos de selección de datos distintos, AD, WO, WOWSD; escogiendo distintas fuentes de datos, PVPM de PV Engineering, PVKLA de Mencke&Tegtmeyer, e incluso datos desconocidos; y permitiendo realizar las representaciones que nosotros queramos, «pop up menus».

El sistema nos permite representar cualquiera de las variables que disponemos, pero también ofrece algunas representaciones ya fijas, que nos ayudan en un primer vistazo a identificar si todo es correcto. Este apartado explicará esas gráficas que podemos encontrar en las interfaces de las figuras 3.5, 3.8, 3.10.

3.4.1. Conjunto $I(V)$, $P(V)$, $G(V)$

En estas representaciones podemos observar los datos medidos por el aparato trazador de línea para un instante de tiempo.

La gráfica situada en la esquina superior derecha de la figura 3.5, es la denominada Curva IV, es la curva característica de un módulo fotovoltaico. Como se puede observar, para un amplio rango de tensión, la corriente permanece prácticamente constante, ese tramo es el llamado *rango de tensión de operación*, por lo que puede decirse que en este tramo el módulo trabaja como una fuente de corriente.

En esta gráfica hay muchos puntos que resultan interesantes en la evaluación de un módulo:

- **Isc**, el punto de corte entre la curva y el eje de ordenadas determina la corriente de cortocircuito, ya que como hemos explicado en el punto 3.1.1, esta es igual a la máxima corriente, que se da teniendo el módulo en cortocircuito, es decir para tensión nula.
- **Uoc**, el punto de corte entre la curva y el eje de abscisas determina la tensión de cortocircuito, como hemos explicado en el apartado 3.1.2 es la tensión máxima que se da al poner el módulo en cortocircuito, es decir corriente nula.
- **Influencia de la radiación**, como se ha explicado también en la sección 3.1.1, debido al efecto fotoeléctrico, la corriente es fuertemente dependiente de la radiación incidente, por lo que se podrá observar con claridad como al aumentar la radiación "sube la altura de la curva", es decir las intensidades son mayores para las mismas tensiones, eso se ve reflejado en un aumento de la Isc, por cada 200 W/m² que se aumente la Isc aumentará entre 1 y 1,5 A. La influencia de la radiación sobre la tensión de circuito abierto no es tan significativa, aumentará unos cuantos

milivoltios.

- **Influencia de la temperatura del módulo**, al aumentar la temperatura del módulo disminuirá la U_{oc} , mientras que la I_{sc} se mantendrá constante, esta es la razón por la que se estudia para encontrar sistemas de refrigeración del módulo, combatiendo así el progresivo aumento de temperatura de la placa, que influye negativamente en el rendimiento de ésta.
- **Punto de máxima potencia**, la curva IV está fuertemente ligada a la curva PV, esquina inferior derecha de la figura 3.5. La potencia se define como el producto de la tensión por la intensidad, por lo que esta curva nos permite ver rápidamente qué punto tiene la máxima potencia, simplemente tendremos que buscar el punto con ese voltaje en la curva IV para determinar el punto de máxima potencia en la curva IV. Por lo explicado en los dos puntos anteriores se deduce que los aumentos de radiación y las temperaturas bajas de funcionamiento de la placa influyen positivamente en el punto de máxima potencia. Este punto también determina la resistencia de la carga óptima para el funcionamiento a máxima potencia del módulo o célula.

La representación de la curva GV, deja implícita la independencia de la tensión con la radiación, ya que ésta es una línea recta como vemos en la esquina inferior izquierda de la figura 3.5.

3.4.2. Gráficas más importantes

En la figura 3.10 se puede observar la interfaz que se podría llamar resumen de gráficas", ya que representa en una sola interfaz las representaciones más significativas a la hora de valorar un módulo fotovoltaico.

3.4.2.a. Potencia en el punto de máxima potencia a condiciones estándar, P_{pk}

Las tres primeras representaciones hacen referencia a éste parámetro, empezando por la esquina superior izquierda encontramos la representación de la media de $P_{mpp,STC}$, descrita como $Av.P_{pk}$, enfrentada a la radiación en W/m^2 , justo debajo podemos encontrar la desviación estándar de $P_{mpp,STC}$, señalada como $St.desv.$, frente a la radiación nuevamente. Se puede observar en ambos casos como a partir de los $500 W/m^2$ la media se estabiliza, al igual que la desviación estándar, concluyendo así que el aparato obtiene mediciones exactas a partir de aproximadamente este valor, como ya se sabía según información del fabricante, en este caso PV Engineering.

La siguiente gráfica, $P_{pk}(G)$, representa como su encabezado indica, todos los puntos medidos $P_{mpp,STC}$ frente a G . Los valores de la potencia se mantienen constantes a

3. Sistema de evaluación de datos

partir de los 500 W/m^2 , como era de esperar, pues la potencia a condiciones estándar es un dato proporcionado por el fabricante, es decir, una constante. Así se confirma, la hipótesis anteriormente expuesta, se podrán considerar fiables los datos a partir de 500 W/m^2 , al menos con este aparato.

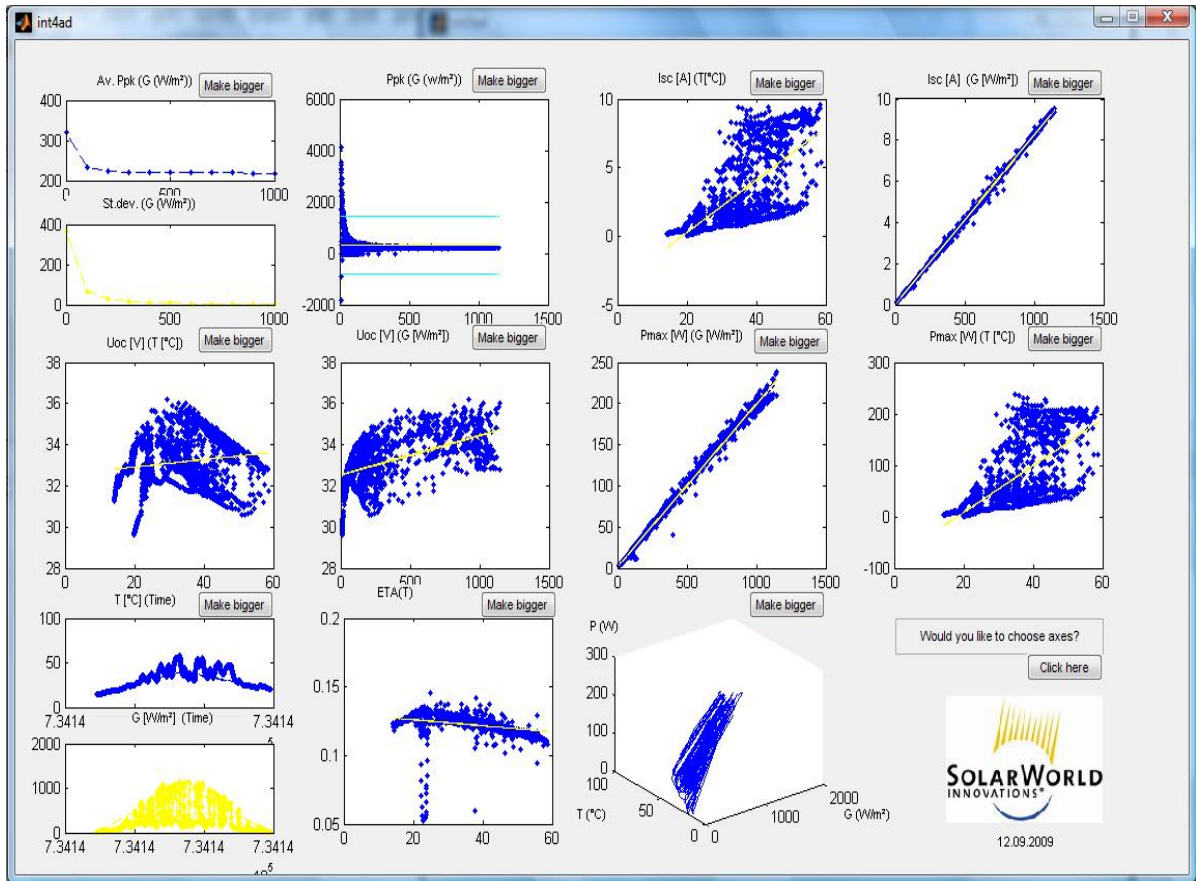


Figura 3.10.: Interfaz que muestra las principales gráficas

3.4.2.b. Gráficas referidas a la intensidad de cortocircuito

Las dos últimas representaciones de la primera fila de la figura anterior 3.10, son las gráficas referidas al comportamiento de la intensidad de cortocircuito frente a la temperatura, en cuyo caso se observa un aumento. Este incremento de I_{sc} , al aumentar la temperatura del módulo, podría considerarse más una consecuencia de que la temperatura del módulo se incrementa al aumentar la radiación, siendo esta última la causa directa del aumento de I_{sc} , como se puede observar en la gráfica de la esquina superior derecha, donde se observa claramente como la dependencia es lineal.

3.4.2.c. Gráficas referidas a la tensión de circuito abierto

Las dos primeras gráficas de la fila del medio de la figura 3.10, son las referidas a la tensión de circuito abierto, la primera de las representaciones empezando por la izquierda es la que muestra la relación entre U_{oc} , y la temperatura del módulo. En esta gráfica se observa claramente la disminución de la tensión con el aumento de la temperatura.

La segunda representación empezando por la izquierda de la fila del medio enseña la dependencia entre la U_{oc} y la radiación, como hemos explicado con anterioridad 3.4.1, al aumentar la radiación también aumenta la U_{oc} , pero lo hace de una manera muy ligera, no hay más que comparar las gráficas de U_{oc} e I_{sc} contra G .

3.4.2.d. Gráficas referidas a la potencia del punto de máxima potencia

Éstas son las dos últimas representaciones de la fila del medio de la figura 3.10, podemos observar a simple vista como la dependencia de la potencia con la temperatura y la radiación es similar a la dependencia que tiene la I_{sc} con respecto a esas dos variables.

Sin embargo podemos observar que en la dependencia con la radiación, tercera representación de la fila, puede apreciarse una ligera dispersión si se compara con la representación de la I_{sc} frente a G , esto puede deberse a la pequeña influencia de la radiación sobre la tensión.

En el caso de la influencia de la temperatura, cuarta representación, se observa como es más compacta de lo que era la dependencia de I_{sc} , esto puede deberse a que los parámetros de tensión disminuyen para aumentos de temperatura.

3.4.2.e. Representaciones frente al tiempo

En la primera representación de la cuarta fila, se representan las dependencias de la radiación y la temperatura con el tiempo, es decir, con las horas en el día. Las horas del día registradas con radiaciones más altas son coincidentes con las temperaturas más altas del módulo, tal como se esperaba.

3.4.2.f. Gráfica de la dependencia del rendimiento con la temperatura

La segunda representación de la última fila de la figura 3.10, muestra la dependencia del rendimiento con la temperatura, mostrando claramente la influencia negativa del aumento de la temperatura del módulo.

3.4.2.g. Gráfica a tres ejes de potencia, temperatura del módulo y la radiación

Es la tercera gráfica de la última fila, donde se observa con facilidad el aumento de la potencia para aumentos de radiación.

3.4.3. Análisis de interrelaciones

Una de los grandes avances que permite este programa es la capacidad de evaluar y analizar la interrelación de hasta 4 variables. Se puede ver un ejemplo de este tipo de análisis con referencia a la temperatura del módulo en Anexo E.

3.5. Explicación de la programación

Como se ha ido repitiendo a lo largo del PFC, la programación de interfaces para usuario con la herramienta GUIDE del MATLAB® , ha sido una parte importante de este trabajo para la que se han dedicado más de 3 meses, tiempo en el que empezando desde cero a nivel de programación, se ha creado un sistema de evaluación para los datos de los que disponíamos, así como para datos de origen desconocido.

Debido a la extensión y complejidad de la programación, se ha considerado conveniente explicarla y mostrarla en el CD adjunto, dedicando así las páginas del resumen a la explicación de gráficas y parámetros que repercuten en la evaluación como tal.

3.6. Problemas en el proceso de creación del sistema de evaluación

3.6.1. Problemas en la programación

Dada mi inexperiencia al comienzo de este proceso en actividades como la programación, y más concretamente en la programación con MATLAB® para interfaces gráficas, podría decirse que cada día aparecía un nuevo problema.

Sería demasiado extenso explicar cada uno de los problemas surgidos así que serán ennumerados los pasos seguidos durante el proceso de búsqueda de soluciones. Primero recurría a la ayuda del MATLAB® , después buscaba en los diversos tutoriales que fueron descargados de la red, posteriormente acudía a internet, donde gente de todo el mundo con una gran experiencia en el entorno están dispuestos a ayudar, finalmente preguntaba a amigos y conocidos, y en el caso de no tener éxito a lo largo de este proceso buscaba una solución más larga y simple.

3.6.2. Problemas de la instalación

La programación comenzó la primera semana de marzo del 2010, dado que la instalación todavía no estaba operativa, se solicitó a la oficina de ingenieros Mencke&Tegtmeyer, que enviaran unos archivos iguales a los que se iban a recibir de la instalación, para así empezar a programar en base a los datos de los que se dispondría. La última semana de mayo la programación estaba completa, y a la semana siguiente vinieron a montar la instalación.

El día 2.03.2010 se recibieron los siguientes archivos:

- **Parameter**, archivo en el que se encontraban todos los parámetros eléctricos obtenidos del aparato trazador de línea.
- **Curve**, archivo en el que se mostraba en tres columnas la tensión, corriente de intensidad y radiación.
- **Logger**, archivo en el que se disponía de todos los datos meteorológicos para una instalación de nuestras condiciones, es decir con los mismos sensores.

Al acabar el montaje, durante la prueba de la instalación, se observó que los datos venían en dos archivos, no en tres como se nos había comunicado en un principio. Existiendo los siguientes problemas que requirieron la reprogramación durante las dos primeras semanas de julio, como ya se ha nombrado con anterioridad en el apartado de Problemas en la recogida de datos [2.5.2.d](#):

- **Archivo para la representación de la curva**, este fue uno de los principales problemas para la reprogramación, ya que a diferencia del primer archivo, *Curve*, todos los datos de un día se almacenaban en el mismo archivo, separados por las horas de medición, y además en el primer tipo de archivo, *Curve*, las primeras líneas estaban ocupadas por los parámetros característicos de la curva, como son *Isc*, *Voc*, *Vmpp*, *Impp*, *Pmpp*...etc.
- **Archivo para los parámetros eléctricos y meteorológicos** el problema en este caso era de más fácil solución, en este archivo se encontraban juntos los archivos que antes, *Parameter* y *Logger*. Uno de los principales problemas desencadenados de este archivo era que en un principio todos los datos de las distintas temperaturas de módulo estaban en un mismo archivo, posibilitando así la comparación de las temperaturas de todos los módulos abriendo un único archivo, ahora sin embargo sólo se pueden comparar las temperaturas de los módulos que se seleccionen, teniendo que cargar mucho más el programa, pues la cantidad de datos a analizar será tantas veces más grande como módulos se seleccionen. Otro de los problemas esta vez relacionados con los parámetros eléctricos es que en el primer archivo, *Parameter*, se disponía de todos los datos, incluido los de condiciones estándar, en el archivo actual no se dispone de estos parámetros que resultan esenciales a la hora de comparar distintos módulos de manera comercial, por lo que el cálculo pasó a

3. Sistema de evaluación de datos

formar parte de la programación, como se ha visto en el apartado Explicación de los parámetros calculados [3.2](#).

4. Resultados

Los resultados de este proyecto pueden dividirse, al igual que la realización del mismo, en dos partes bien diferenciadas.

4.1. Sistema de medición y recogida

Esta sección enseña los resultados de todo el proceso explicado en el capítulo 2. Al comienzo del PFC, no existía ningún plan para la realización del mismo, sólo eran conocidas las demandas de la empresa y el presupuesto del que se disponía. Por lo que después de un tiempo de documentación, de búsqueda de los mejores productos a los mejores precios, de búsqueda de ofertas, de rechazar distintos aparatos, etc. Se procedió al pedido del sistema que hoy en día está instalado y operativo en la azotea del DS1400, Freiberg (Sajonia, Alemania).

El sistema consta, como ya hemos aclarado en el capítulo 2, de: 1 estación meteorológica, 3 anemómetros adicionales, 10 sensores de temperatura, 4 células de silicio, 1 data logger, 1 trazador de línea IV, 1 multiplexor.

En esta primera foto, [4.1](#), se puede observar la instalación de los 160 módulos fotovoltaicos.



Figura 4.1.: Instalación de los 160 módulos fotovoltaicos en la azotea del DS1400

4. Resultados

En la siguiente foto, [4.2](#), se ven los sensores de temperatura adheridos a la esquina superior izquierda de la parte trasera del módulo, círculos rojos.



Figura 4.2.: Termómetros de temperatura del módulo adheridos al Tedlar

Aquí, [4.3](#), se observa la estación meteorológica compuesta por una veleta, un anemómetro de cazoletas, un psicrómetro, un termómetro de temperatura ambiente, el cuál está colocado entre las carcadas del armario eléctrico para protegerlo de la lluvia y el viento, ver círculo rojo en [4.4](#), un piranómetro en el plano horizontal, otro en el plano de inclinación de los módulos y un último que mide la radiación difusa gracias al disco parasol.

4. Resultados

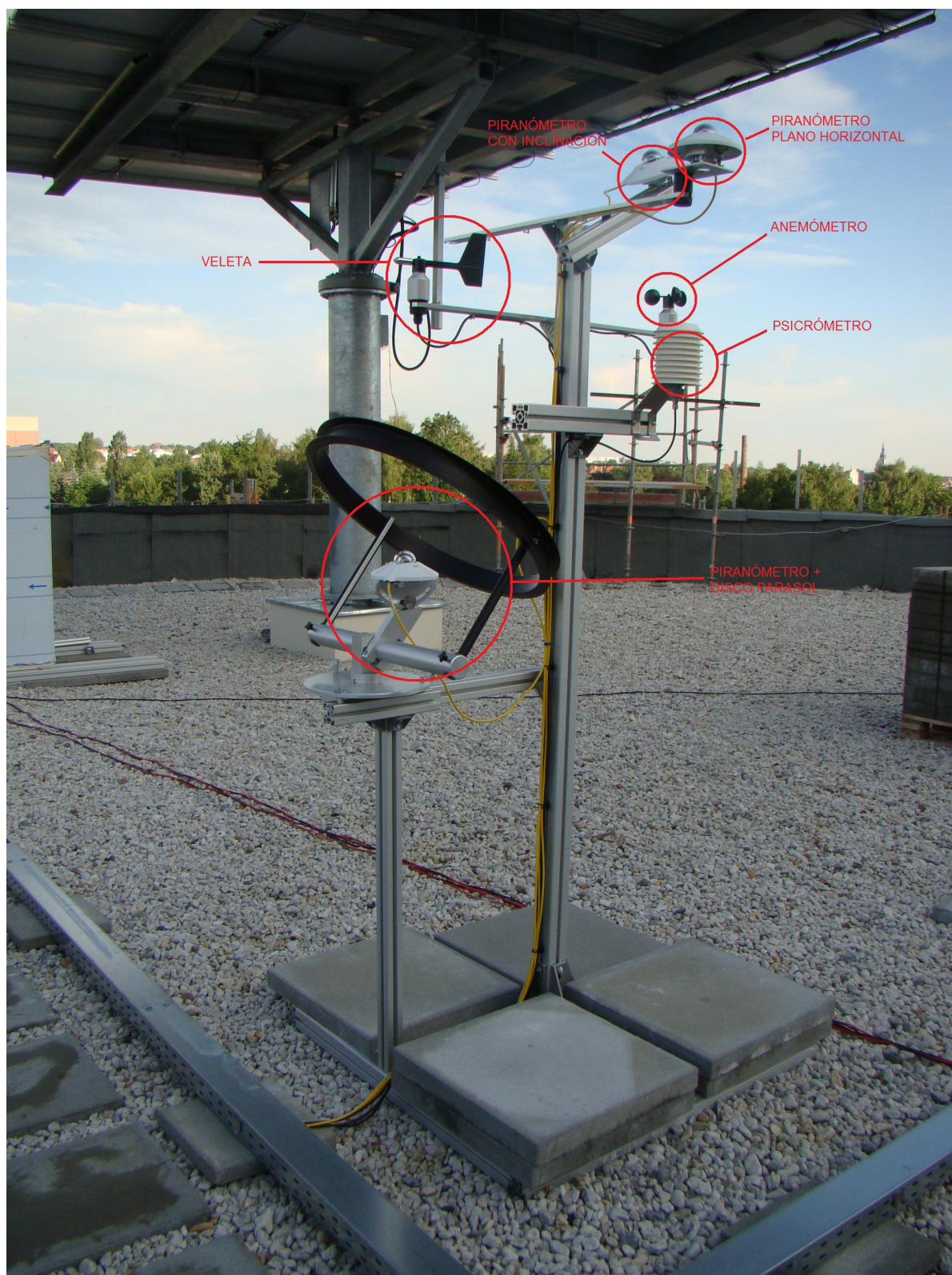


Figura 4.3.: Estación meteorológica sobre el DS1400

4. Resultados

Por último una foto del armario eléctrico, [4.4](#) que muestra los principales componentes, en el círculo verde encontramos el trazador de línea IV, en azul el PC industrial, en rosa el data logger, y en amarillo el multiplexor.



Figura 4.4.: Armario eléctrico de la instalación

4.2. Sistema de evaluación

Como se ha explicado en el capítulo 3, el resultado de esta parte del PFC es el software diseñado y programado, que no sólo muestra la curva característica IV, sino que también es capaz de graficar todo el resto de parámetros eléctricos y térmicos que caracterizan a un módulo o conjunto de éstos. Además gracias al completo sistema de medición y recogida, se puede realizar una evaluación de interrelaciones con las condiciones meteorológicas. Al mismo tiempo todas estas funciones pueden ser realizadas para la observación de un único módulo, como para varios módulos pudiendo observar las tendencias o realizar comparaciones entre módulos. Lo que nos permite comparar el mismo módulo para distintas condiciones o distintos módulos en las mismas condiciones, etc. El programa nos permite evaluar datos de fuentes conocidas, es decir, de los aparatos que posee Solar World, así como datos de fuentes desconocidas. La siguiente figura, 4.5, muestra un breve resumen gráfico de algunas de las posibilidades de este software, aquí sólo aparecen las interfaces gráficas, no aquéllas que permiten la interacción con el usuario para la recopilación de datos, ver CD adjunto.

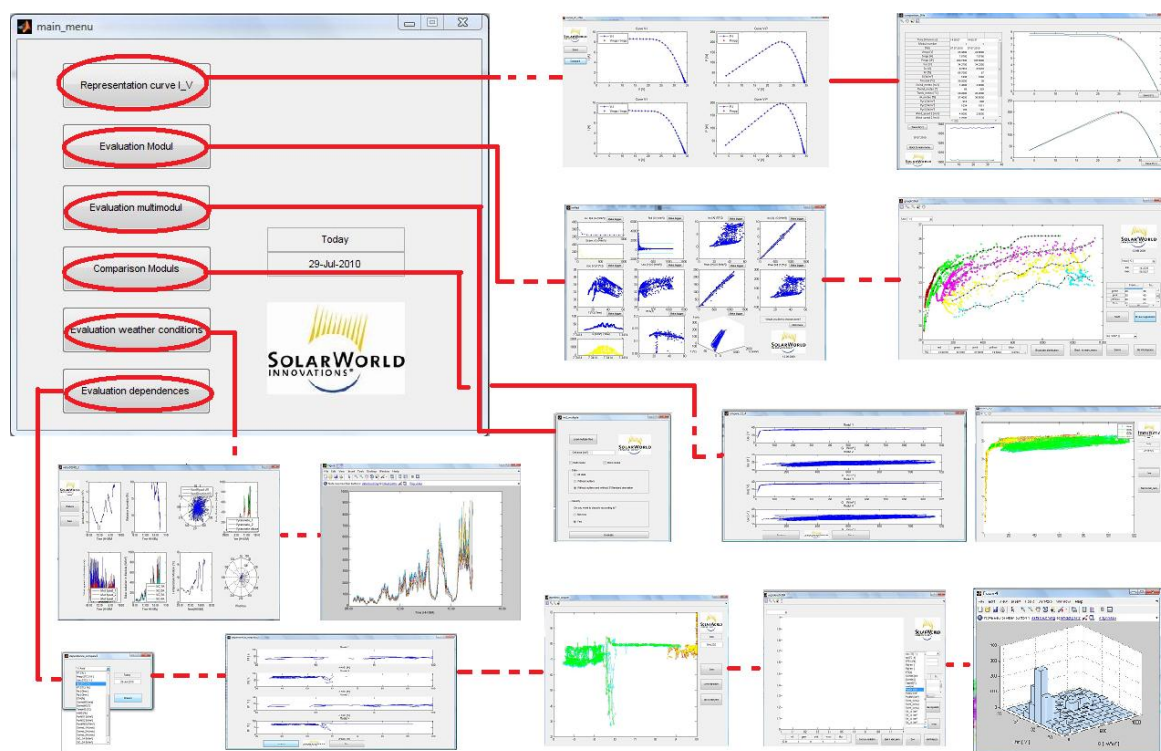


Figura 4.5.: Breve esquema de las interfaces de evaluación

5. Conclusiones

5.1. Conclusión

Las conclusiones que puedo sacar de este proyecto fin de carrera son muchas y de muy diversa naturaleza . Se podría comenzar por aquellas que se obtienen de la primera parte, diseño e implementación de un sistema de recogida:

- Es importante maximizar los recursos dentro de un presupuesto estipulado.
- Hay que tener en cuenta los tiempos de suministro, ya que pueden condicionar el desarrollo del proyecto, por lo que es mejor suponer que no se van a cumplir y contar con unas semanas de margen.
- Los problemas dentro de un proyecto son algo inevitable, por lo que es muy importante saber solucionarlos de una manera eficaz y rápida, sin desatender el resto de labores.

Con respecto a la segunda parte, dedicada a la programación de un sistema de evaluación:

- No haber trabajado con algo, no implica que no lo puedas hacer.
- A la hora de trabajar es bueno encontrar varias soluciones a un mismo problema, haber encontrado una solución no implica que sea la mejor.

5.2. Trabajos futuros

A raíz de mi trabajo en Solar World Innovations pueden desarrollarse los siguientes trabajos:

- Continuación de la programación de evaluación de datos con MATLAB® , para la evaluación de los datos que se obtienen en todo el departamento de prueba para módulos.
- Análisis en profundidad de las dependencias del funcionamiento de los módulos con las condiciones meteorológicas, así como comparaciones de módulo a módulo y módulo a línea.

Bibliografía

- [1] J. S. Martins A. C. Andrade. Building a photovoltaic module to realize a study of the temperature distribution in outdoor conditions. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009*.
- [2] Brian P. Dougherty David L. King William E. Boyson Jay A. Kratochvil A. Hunter Fanney, Mark W. Davis. Comparison of photovoltaic module performance measurements. In *2005 International Solar Energy Conference Orlando, FL, 2005*.
- [3] E.D. Dunlop H.A. Ossenbrink A. Skoczek, T. Sample. Electrical performance results from long-term outdoor weathered modules. In *22nd European Photovoltaic Solar Energy Conference, 3-7 September 2007, Milan, Italy, 2007*.
- [4] G. Intreccialagli D. Chianese A. Spena, C. Cornaro. Data validation and uncertainty evaluation of the ester outdoor facility for testing of photovoltaic modules. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009*.
- [5] Gerhard Peharz Gerald Siefer Alexander Hakenjos Inka Heile Hansjörg Lerchenmüller Johannes Wüllner Andreas W. Bett, Joachim Jaus. Outdoor evaluation of flatcon modules and systems. In *33 IEEE Photovoltaic Specialist Conference, 12-16 May 2008, San Diego, CA, 2008*.
- [6] Markus Schubert George E. Georghiou Bastian ZinSSer, George Makrides and Jürgen H. Werner. Temperature and irradiance effects on outdoor field performance. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009*.
- [7] Williams S. R. Gottschalg R. Betts, T. R. Outdoor characterisation of pv modules for energy rating. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009*.
- [8] A. Dafni S. Kabalo L. Levy V. Melnichak D. Faiman, D. Bokovza and A. Razon. Rapid outdoor quantification of degradation for c-si photovoltaic modules. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009*.
- [9] Solar World Industries Deutschland. Outdoor testfield mchp Û august 2007.
- [10] Sjeff de Bruijn Pascal Goulpie Laurent Sansonnens Yvan Ziegler Diego Fischer, Frederic Bichsel and Alexandre Closset. Positive effective temperature coefficient of power of +0.75flexible a-si modules in building integrated installations. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009*.
- [11] J. Sumaili Akilimali F. Spertino, P. Di Leo. Optimal configuration of module connections

- for minimising the shading effect in multi-rows pv arrays. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009.
- [12] F. Pascarella A. Romano F. Roca G. Graditi, A. Merola. Pv-intrascanõ an innovative integrable system to scan the outdoor performance of pv-flat and pv concentration modules. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany* 3786, 2009.
 - [13] Matthew Norton George E. Georghiou Markus Schubert George Makrides, Bastian Zinsser and Jürgen H. Werner. Error sources in outdoor performance evaluation of photovoltaic systems. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009.
 - [14] Yingtang Tang Govindasamy TamizhMani, Liang Ji and Luis Petacci. Photovoltaic module thermal/wind performance: Long -term monitoring and model development for energy rating. In *NCPV and Solar Program Review Meeting 2003*, 2003.
 - [15] Thomas R. Betts Ralph Gottschalg Jiang Zhu, Yingning Qiu. Effects of different data collection strategies on outdoor performance measurements and degradation. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009.
 - [16] Sergio Sanz Hernando José Manuel Bernardez Perez José Ignacio Díaz García, Marta Poncela Blanco. Tratamiento de datos meteorológicos para instalaciones de energía solar. In *XXI Jornadas de Automática 2000*, 2000.
 - [17] Andreas Hügli Thomas Hälker Juergen Sutterlütli, Ivan Sinicco and Steve Ransome. Outdoor characterisation and modelling of thin-film modules and technology benchmarking. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009.
 - [18] W. Bresciani M. Del Buono W. Sparber L. Maturi, M. Armani. Pv roof integration, a case study in northern italy: How modules arrangement influences the pv performance. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009.
 - [19] J. Aguilera J.V. Muñoz M. Fuentes, G. Nofuentes. Simple modelling and degradation study of two cis pv modules in a sunny climate. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009.
 - [20] S. Bartocci G D'Angiolini G. Flaminio V. Giglio A. Matano G. Nardelli A. Ortense M. Pellegrino, C. Cornaro and A. Spena. Outdoor measurements for an effective pv modules temperature characterization. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany*, 2009.
 - [21] Claudio Minelli Marco Prosperi. Res & rue dissemination. Technical report, CECU.
 - [22] Karl Berger Thomas Krametz Roman Leidl Shokufeh Zamini, Marcus Rennhofer. Characterization and comparison of pv-modules regarding indoor and outdoor concepts. In

Bibliografía

24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009.

- [23] King-hang Lam S. Dittmann D. Chianese W. Durisch, Jean-Claude Mayor. Climate impacts on the efficiency of a p-si pv module and annual output under real working conditions. In *24th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 21-25 September 2009, Hamburg, Germany, 2009.*
- [24] Miguel Alonso Abella y Faustino Chenlo. Estimación de la energía generada por un sistema fotovoltaico conectado a red. Technical report, CIEMAT. Laboratorio de Sistemas Fovoltaicos. Avda. Complutense, 22. 28040.
- [25] Liang Ji Yingtang Tang, Govindasamy TamizhMani. Outdoor energy rating measurements of photovoltaic modules.

