



MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS

Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas
Dirección General de Energías Alternativas



Fotografía: Alberto Ruiz de Alegría

**Estudio complementario de impacto de la radiación UV
en paneles solares (datos UV de un año) y otros
componentes expuestos en condiciones del altiplano
boliviano**

Gestión 2021

PROGRAMA DE ASISTENCIA TÉCNICA DE LA COOPERACIÓN ALEMANA AL DESARROLLO

La Cooperación Alemana al Desarrollo a través de la Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH y su Programa de Energías Renovables (PEERR) tiene como objetivo brindar asistencia técnica a través del Ministerio de Hidrocarburos y Energías (MHE) a las entidades del sector eléctrico en el área técnica, normativa y formación de capacidades para el desarrollo de las Energías Renovables (EERR) y Eficiencia Energética (EE).

En este contexto, la información contenida en este documento es de carácter referencial y no representa necesariamente la política institucional del Ministerio de Hidrocarburos Energías y de las entidades del sector eléctrico.



Implementada por:





MINISTERIO DE
HIDROCARBUROS Y ENERGÍAS

Viceministerio de Electricidad y Energías Alternativas
Dirección General de Energías Alternativas



Fotografía: Alberto Ruiz de Alegría

Estudio complementario de impacto de la radiación UV en paneles solares (datos UV de un año) y otros componentes expuestos en condiciones del altiplano boliviano

Gestión 2021

PROGRAMA DE ASISTENCIA TÉCNICA

Entre el:

Ministerio de Hidrocarburos y Energías

y

**Deutsche Gesellschaft für Internationale
Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**



Implementada por:



La Paz – Bolivia

2021

Contenido

1	INTRODUCCIÓN	1
2	EQUIPO DE MEDICIÓN	2
3	DATOS	3
3.1	Datos diarios	4
3.2	Datos mensuales	6
3.3	Datos anuales	7
4	ANALISIS DE LOS DATOS	8
4.2	Radiación	9
4.2.1	Irradiación total anual	9
4.2.2	Irradiancia total máxima instantánea	9
4.2.3	Irradiación UV anual	11
4.2.4	Irradiancia máxima UV	12
4.3	Nubosidad	13
4.4	Temperatura	16
5	DEGRADACIÓN DE MÓDULOS	18
5.1	Degradoación por radiación solar	18
5.2	Degradoación por temperatura	19
6	TEST IEC	20
7	CONCLUSIONES	26
8	BIBLIOGRAFÍA	27

Tabla de Ilustraciones

Ilustración 1. Equipo de medición [1]	2
Ilustración 2. Calendario de días válidos	3
Ilustración 3. Datos tarjeta SD.....	4
Ilustración 4. Gráficas del 2 de septiembre 2019, radiación y temperatura.....	6
Ilustración 5. GHI (Wh/m ²). Septiembre 2019	6
Ilustración 6. Radiación UV (Wh/m ²). Septiembre 2019.....	7
Ilustración 7. Irradiación anual en Patacamaya (kWh/m ²) [4]	9
Ilustración 8. Grafica radiación solar 26 de enero de 2020	10
Ilustración 9. Grafica radiación solar 13 de enero de 2020	10
Ilustración 10. Gráficas del 26 (soleado) y 2 (nublado) de enero de 2019	12
Ilustración 11. Radiación solar, horas de sol y porcentaje UV anual.....	12
Ilustración 12. Porcentaje UV medio mensual.....	14
Ilustración 13. Índice de claridad.....	15
Ilustración 14. categorías de nubosidad anuales en Patacamaya, La Paz [6] ..	15
Ilustración 15. Temperatura medida del módulo	16
Ilustración 16. Temperaturas 26 de enero de 2020	17
Ilustración 17. Gradiente de temperatura del módulo, 26 de enero de 2020	17
Ilustración 18. Test IEC 61215 [15].....	20
Ilustración 19. Secuencia de prueba combinada Altiplano [3]	23

Tablas de datos

Tabla 1. Datos 2 de septiembre de 2019	5
Tabla 2. Datos de septiembre 2019	6
Tabla 3. Datos de radiación solar anuales	7
Tabla 4. Temperaturas máximas y mínimas anuales	8
Tabla 5. Radiación solar 26 de enero de 2020.....	10
Tabla 6. Radiación solar 13 de enero de 2020.....	11
Tabla 7. Porcentaje de radiación UV. Medias mensuales y diarias máximas y mínimas	13

ESTUDIO COMPLEMENTARIO DE IMPACTO DE LA RADIACIÓN UV EN PANELES SOLARES (DATOS UV DE UN AÑO) Y OTROS COMPONENTES EXPUESTOS EN CONDICIONES DEL ALTIPLANO BOLIVIANO

1 INTRODUCCIÓN

El Proyecto de Energías Renovables (PEERR), perteneciente a *Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ)*, solicitó en septiembre de 2020 a Alberto Ruiz de Alegría, como consultor de energías renovables, el presente estudio complementario de impacto de la radiación UV en paneles solares y otros componentes expuestos en condiciones del altiplano boliviano.

Este trabajo supone un estudio complementario a la tesis “Operation conditions in a photovoltaic solar plant in the Altiplano. Ultraviolet radiation and thermal cycling stress” [1]. Antecedentes a esta tesis fueron el estudio realizado por C.Perela [2], que recopiló los primeros datos, y el desarrollado posteriormente por la compañía PI-Berlin [3], que realizó un análisis de dichos datos.

El objetivo principal del presente estudio es aumentar la base de datos que se tiene hasta el momento sobre las condiciones del Altiplano. Se han recopilado, filtrado y analizado todos los datos obtenidos con el equipo de medición situado en Patacamaya, La Paz, Bolivia. Este fue instalado gracias a la universidad de Paderborn, Alemania, y al proyecto PEERR, que facilitaron los instrumentos para la elaboración del estudio mencionado [1]. Para este estudio se analizan mediciones desde septiembre de 2019 hasta septiembre de 2020. A enero de 2021 se siguen recopilando datos.

Además de ampliar la base de datos de radiación solar se han analizado y sacado conclusiones de estos, se han explicado las principales formas de degradación bajo estas condiciones extremas, se han elaborado recomendaciones para los test de calidad IEC y se han sugerido trabajos futuros para aprovechar los datos obtenidos hasta la fecha.

2 EQUIPO DE MEDICIÓN

Todos los datos obtenidos para el presente estudio provienen de los aparatos de medición situados en Patacamaya, La Paz, Bolivia. Estos fueron instalados en agosto de 2019 en el centro de observación de la Universidad Mayor de San Andrés. Estos equipos de medición fueron obtenidos gracias a GIZ y a la Universidad de Paderborn, Alemania. Además, facilitaron las herramientas para el desarrollo de la tesis predecesora a este trabajo [1].

El Equipo de medida consiste básicamente en 3 sensores de temperatura PT-100, un piranómetro SP Lite 2 (de 400 a 1100 nm) y un radiómetro UV para el rango UV (de 280 a 400 nm).

Ilustración 1. Equipo de medición [1]



Estos equipos de medición transmiten una diferencia de potencial que varía según las especificaciones técnicas de cada equipo y es enviada a un datalogger. Este consiste en una placa de Arduino que transforma las diferencias de potencial en datos de radiación y temperatura, según las fórmulas correspondientes. La señal instantánea de los equipos queda grabada por el Arduino cada 10 segundos en una tarjeta SD en forma de datos. Más detalles sobre el montaje del equipo y su funcionamiento son explicados en el estudio mencionado [1].

3 DATOS

Los datos utilizados en el presente estudio son los recopilados desde septiembre de 2019 gracias a los instrumentos de medida anteriormente mencionados. De los datos obtenidos hay que destacar la cantidad que se considera válida o útil. Se ha hecho un minucioso estudio de estos, día a día del año, analizando los fallos o defectos y filtrando datos alterados o erróneos provenientes de mediciones incorrectas o de errores de guardado, conservación y manejo de los mismos. En el siguiente calendario de la imagen, se muestran los días que han sido considerados válidos (en verde) y los días que, por diversas razones, no han podido considerarse para este estudio (en rojo).

Ilustración 2. Calendario de días válidos

El principal motivo por el que un día específico no es considerado apto para el estudio es la ausencia de datos recopilados, en su totalidad o de forma parcial, imposibilitando la extracción de conclusiones válidas. Debido al lugar donde se están recolectando, algunos datos no han sido obtenidos en ningún momento, mayormente debido a cortes de luz. Otros datos se han extraviado debido a su manejo que puede no haber sido de forma rigurosa, una menor proporción. No obstante, de los 13 meses analizados hasta el momento, aproximadamente un 70% de los días son considerados válidos y han sido analizados e incluidos en el estudio.

De los días con mediciones, primero se han comprobado la totalidad de las horas, minutos y segundos. Como se ha explicado, los datos son medidos cada 10 segundos, lo cual aporta 8.640 mediciones por día. En cada medición se toma información de los 5 diferentes aparatos de medición. De los datos recopilados por el datalogger se utilizan 4 de los 5, puesto que 2 de ellos son temperaturas de módulo muy similares (útiles para otros estudios). Por lo tanto, se han analizado 4 parámetros diferentes tomados cada 10 segundos, lo cual da un total de 34.560 datos por cada día.

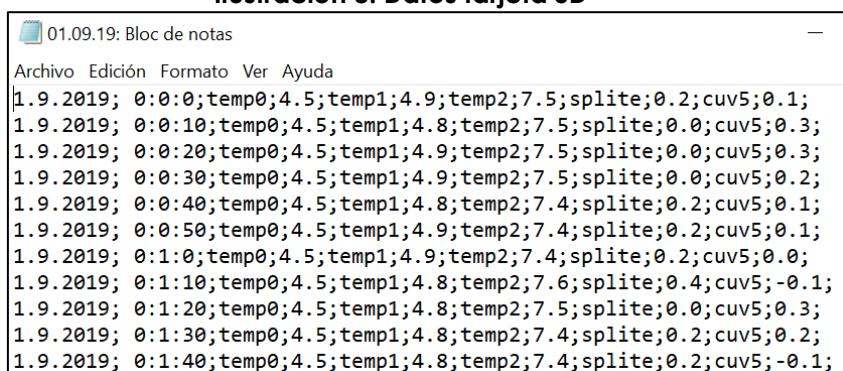
Los datos de mayor valor para el presente estudio son los de irradiación global o GHI (del inglés, *Global Horizontal Irradiance*) y los de radiación UV. Ambos se miden de inicialmente como radiación instantánea en W/m², potencia. Con los datos de radiación instantánea se obtienen las medidas de energía al integrar en el tiempo. De esta forma para la radiación total de todo el espectro obtenemos la irradiancia (W/m²) y con ella la GHI (Wh/m²), y para el espectro UV obtenemos la radiación UV instantánea (W/m²) y la radiación UV (Wh/m²), energía.

En los siguientes apartados se detalla el análisis inicial realizado sobre los días aceptados para el estudio, una vez han sido validados y filtrados.

3.1 Datos diarios

En el análisis diario se han utilizado los datos de los archivos .txt recogidos por el datalogger, previamente separados en los diferentes días del año. En la imagen se muestra un fragmento de archivo .txt extraído de la tarjeta de memoria SD. En concreto, es el día 2 de septiembre de 2019, a modo de ejemplo.

Ilustración 3. Datos tarjeta SD



```
01.09.19: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
1.9.2019; 0:0:0;temp0;4.5;temp1;4.9;temp2;7.5;split;0.2;cuv5;0.1;
1.9.2019; 0:0:10;temp0;4.5;temp1;4.8;temp2;7.5;split;0.0;cuv5;0.3;
1.9.2019; 0:0:20;temp0;4.5;temp1;4.9;temp2;7.5;split;0.0;cuv5;0.3;
1.9.2019; 0:0:30;temp0;4.5;temp1;4.9;temp2;7.5;split;0.0;cuv5;0.2;
1.9.2019; 0:0:40;temp0;4.5;temp1;4.8;temp2;7.4;split;0.2;cuv5;0.1;
1.9.2019; 0:0:50;temp0;4.5;temp1;4.9;temp2;7.4;split;0.2;cuv5;0.1;
1.9.2019; 0:1:0;temp0;4.5;temp1;4.9;temp2;7.4;split;0.2;cuv5;0.0;
1.9.2019; 0:1:10;temp0;4.5;temp1;4.8;temp2;7.6;split;0.4;cuv5;-0.1;
1.9.2019; 0:1:20;temp0;4.5;temp1;4.8;temp2;7.5;split;0.0;cuv5;0.3;
1.9.2019; 0:1:30;temp0;4.5;temp1;4.8;temp2;7.4;split;0.2;cuv5;0.2;
1.9.2019; 0:1:40;temp0;4.5;temp1;4.8;temp2;7.4;split;0.2;cuv5;-0.1;
```

En la imagen se aprecia por cada línea: el día (DIA.MES.AÑO); la hora (HH:MM:SS); Temperatura 0 módulo; Temperatura 1 módulo; Temperatura 2 ambiente; Radiación total (W/m²); Radiación UV (W/m²). Las mediciones y parámetros se explican con mayor detalle en el trabajo predecesor [1].

El archivo .txt se ha sido dividido en los diferentes días del año desde las 00:00:00 hasta las 23:59:50. De esta forma se ha creado una valiosa base de datos que, además de ser utilizada en el presente estudio, queda a disposición de estudios futuros en posesión del PEERR de GIZ.

Los archivos .txt han sido exportados a Excel y tratados para esquematizar, resumir y graficar la información de los diferentes días del mes. A groso modo se obtiene la siguiente tabla.

Tabla 1. Datos 2 de septiembre de 2019

Fecha	GHI	Max	UV	Max UV	% UV medio	% UV máx	Max mod	Min mod	Max amb	Min amb
2.9.2019	7.440	1.029	417	62	5,31%	6,01%	64,50	-6,40	29,70	-3,10

La tabla resume los datos del día en concreto. Es importante aclarar las unidades de cada dato y cómo se han obtenido para facilitar la lectura y comprensión de los mismos.

- **GHI.** La *Global Horizontal Irradiance* o Irradiancia Global es la energía calculada al integrar la medición de la radiación global instantánea. Por lo tanto, sus unidades están expresadas en **Wh/m²**.
- **Máxima Irradiancia.** Es la máxima radiación instantánea (**W/m²**) medida en el transcurso del día, varía dependiendo de gran cantidad de factores, principalmente de la nubosidad.
- **UV.** Es la radiación UV en forma de energía (**Wh/m²**) a lo largo del día, calculada como la integral de la radiación UV instantánea.
- **Máxima UV.** Es el valor máximo instantáneo de radiación UV en **W/m²**.
- **Porcentaje UV.** Es la radiación UV entre la radiación global de todo el espectro (GHI). Cuenta con dos datos diferenciados. El más importante es el porcentaje UV medio que es el más útil para los análisis considerados para el presente trabajo. El máximo porcentaje de UV puede variar mucho dependiendo de las condiciones climáticas en cada instante.

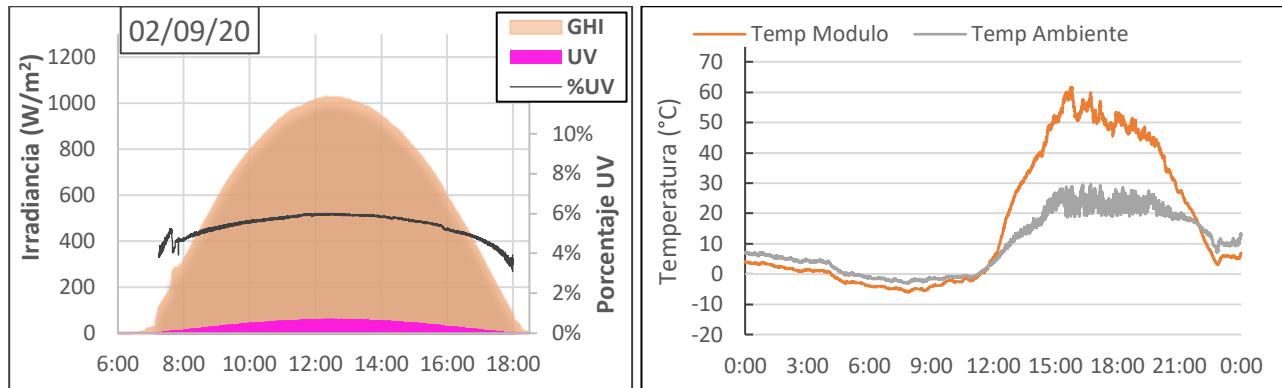
Es importante aclarar el sistema utilizado en este estudio. Existen diferentes métodos de medición del ratio o porcentaje UV, además de diferentes aparatos que miden diferentes rangos del espectro. En este estudio se ha calculado el porcentaje como la radiación UV medida por el radiómetro UV entre la total medida por el piranómetro, explicados en los anteriores apartados.

- **Temperaturas.** El datalogger también recoge los datos de las temperaturas. Se obtienen Temp0 (módulo), Temp1 (módulo) y Temp2 (Ambiente). Utilizando solo una temperatura de módulo y la temperatura ambiente se obtienen las temperaturas máximas y mínimas para ambos, mostradas previamente en la tabla 1.

Con los diferentes datos obtenidos se grafican las radiaciones, porcentajes y temperaturas a lo largo del día. Se pueden realizar diferentes tipos de gráficos con el objetivo de obtener diversas conclusiones.

En la ilustración 4 se muestran los datos graficados del día ejemplo, el 2 de septiembre 2019. Es importante destacar que pertenecen a un día soleado y, por ello, la irradiancia sigue una parábola casi perfecta y de forma continua, sin ningún tipo de distorsión.

Ilustración 4. Gráficas del 2 de septiembre 2019, radiación y temperatura



En cuanto a la temperatura, debido a que fue un día soleado de verano y con alta radiación, se observan altos valores. Ambas gráficas son analizadas en detalle en el apartado 4.

3.2 Datos mensuales

Los diferentes días de cada mes se analizan en conjunto con el objetivo de obtener los datos característicos del propio mes. De cada uno se han resumido los datos en tablas y gráficos. Se muestran los datos de septiembre de 2019 a modo de ejemplo en la tabla 2 y las gráficas de GHI y radiación UV en las ilustraciones 5 y 6, respectivamente.

Tabla 2. Datos de septiembre 2019

Días Válidos	Total GHI (Wh/m ²)	Estimación Total GHI (Wh/m ²)	GHI Media (Wh/m ²)	GHI Máxima día (Wh/m ²)	Max Radiación Inst. (W/m ²)	
25	161.410	193.692	6.456	8.068	1.641	
Total UV (Wh/m ²)	UV Media (Wh/m ²)	UV Max/día (Wh/m ²)	Max UV (W/m ²)	% medio mensual	% máximo media diaria	% máximo instantánea
9.795	392	492	95,20	6,3%	8,6%	27%
Temperatura Módulo (°C)				Temperatura Ambiente (°C)		
Max Media	Min Media	Max Mes	Min Mes	Max Media	Min Media	Max Mes
59,67	-2,10	74,10	-10,00	27,40	0,99	33,40
						Min Mes
						-5,80

Ilustración 5. GHI (Wh/m²). Septiembre 2019

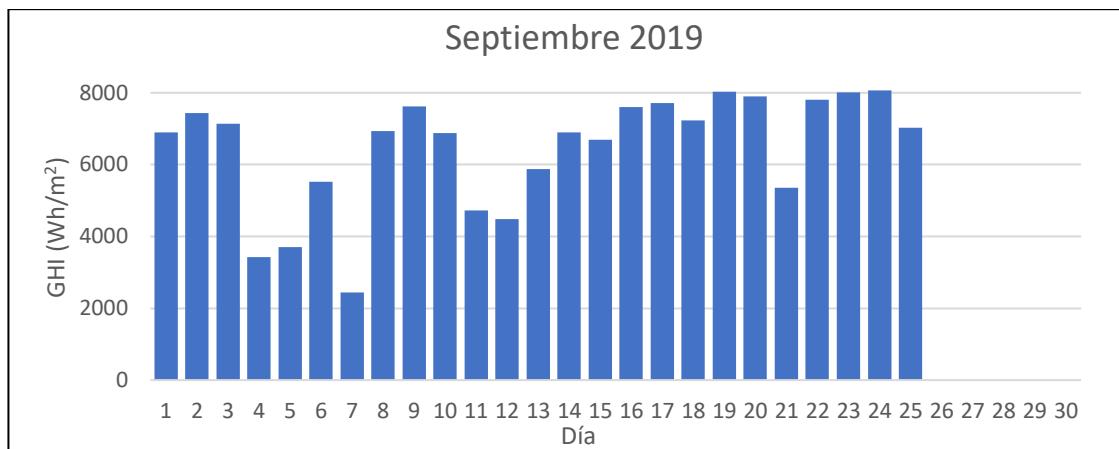
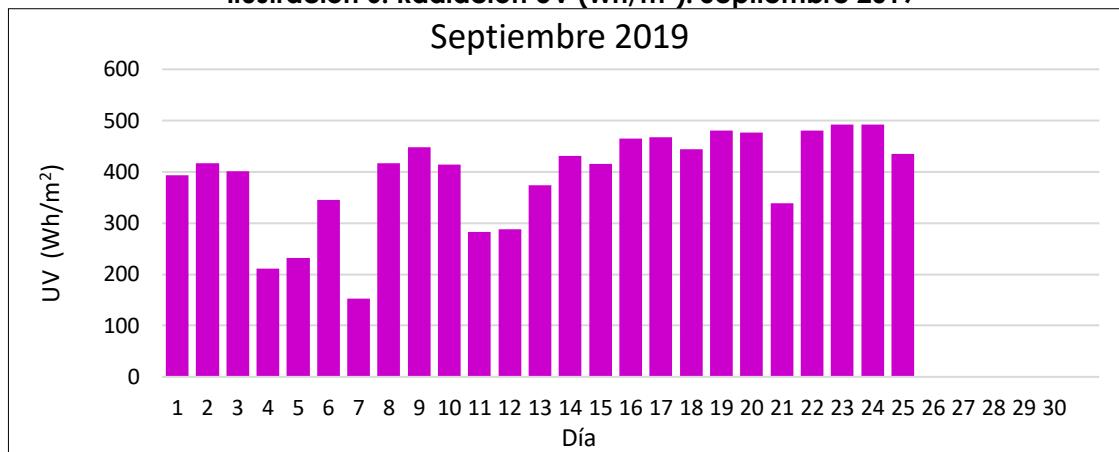


Ilustración 6. Radiación UV (Wh/m²). Septiembre 2019



Como se observa en la tabla 2, en los gráficos de las ilustraciones 5 y 6 y en el calendario mostrado en la ilustración 2, no se tienen datos de los días finales del mes de septiembre de 2019, del día 26 al 30. Esto es debido a los motivos ya explicados en el apartado 3.

3.3 Datos anuales

Los datos mensuales se han agrupado en una hoja de datos conjunto para el análisis. Cabe destacar que para este estudio se han utilizado los datos de un año, desde septiembre a diciembre del año 2019 y de enero a agosto de 2020. Se ordenan de enero a diciembre como si de un mismo año se tratase para facilitar su comprensión y análisis. El motivo es que ya se dispone de los datos y son meses con gran número de días considerados válidos. Por otro lado, es importante aclarar que los datos de junio se han sacado como una media aritmética de su antecesor y de su sucesor, mayo y julio respectivamente. Se han obtenido diferentes tablas y gráficas, la tabla principal para radiación solar total y UV es la tabla 3.

Tabla 3. Datos de radiación solar anuales

Irradiación Horizontal Global (Wh/m ²)				Irradiancia (W/m ²)	Irradiación Horizontal UV (Wh/m ²)			Irradiancia UV (W/m ²)	Porcentaje de radiación UV UV/GHI		
Mes	GHI Total*	GHI Media	GHI Max día	Total Max	UV Total*	UV Media	UV Max día	UV Max	Medio	Max media diaria	Min media diaria
Sep-19	194.010	6.467	8.068	1.641	11.775	393	492	95	6,0%	6,6%	5,3%
Oct-19	237.091	7.648	8.993	1.689	15.120	488	566	100	6,3%	6,9%	6,0%
Nov-19	216.593	7.220	8.262	1.534	14.099	470	535	99	6,7%	6,8%	6,5%
Dic-19	218.803	7.058	9.190	1.744	14.518	468	598	111	6,7%	7,2%	6,3%
Ene-20	215.019	6.936	9.096	1.744	14.380	464	594	112	6,8%	7,3%	6,3%
Feb-20	163.721	5.646	8.117	1.680	11.231	387	558	109	6,9%	7,3%	6,5%
Mar-20	199.776	6.444	8.437	1.628	13.419	433	552	102	6,8%	7,3%	5,9%
Abr-20	180.040	6.001	7.449	1.434	11.773	392	478	87	6,7%	7,4%	6,0%
May-20	171.119	5.520	6.368	1.254	10.940	353	411	74	6,3%	6,7%	6,0%
Jun-20*	177.539	5.727	6.379	1.242	10.965	354	397	72	6,0%	6,4%	5,7%
Jul-20	183.960	5.934	6.390	1.231	10.989	354	383	71	5,6%	6,1%	5,5%
Ago-20	194.335	6.269	6.773	1.260	11.863	383	410	75	5,8%	6,3%	5,5%

*Datos estimados

Como se explicó en anteriores apartados, existen también las mediciones de la temperatura a lo largo del año. En la tabla 4 se muestra un resumen de las temperaturas máximas, mínimas de cada mes y temperaturas máximas y mínimas medias de los diferentes meses.

Tabla 4. Temperaturas máximas y mínimas anuales

Mes	Temperatura Modulo (°C)				Temperatura Ambiente (°C)				
	Max Media	Min Media	Max Mes	Min Mes	Max Media	Min Media	Max Mes	Min Mes	
Sep-19	59,67	-2,07	74,10	-10,00	27,40	1,08	33,40	-5,80	
Oct-19	64,42	-2,49	79,40	-10,20	31,41	1,44	36,90	-4,40	
Nov-19	68,73	-0,14	77,50	-3,80	34,60	3,75	38,10	1,30	
Dic-19	67,26	1,46	79,40	-5,10	34,18	4,62	43,50	-0,40	
Ene-20	67,89	2,59	77,90	-3,20	32,83	5,56	38,30	1,70	
Feb-20	68,73	2,09	82,70	-1,40	30,84	5,37	38,40	2,60	
Mar-20	71,68	1,19	84,60	-3,50	31,69	4,50	38,30	0,40	
Abr-20	72,71	-3,46	80,30	-10,00	32,48	0,01	37,10	-5,10	
May-20	67,19	-5,56	74,10	-15,10	30,92	-1,60	37,10	-10,10	
Jun-20*	65,26	-9,31	70,95	-17,40	30,44	-5,10	35,85	-12,25	
Jul-20	63,33	-13,06	67,80	-19,70	29,95	-8,60	34,60	-14,40	
Ago-20	58,20	-10,81	69,20	-14,80	30,94	-6,31	34,90	-10,30	

4 ANALISIS DE LOS DATOS

Una vez expuestos y explicados los datos utilizados en el estudio, se procede al análisis. Es importante remarcar antes el valor de los datos obtenidos. Si bien no se dispone de datos de todos los días del año, se poseen suficientes como para poder realizar gran cantidad y diversidad de análisis. Este estudio se centra principalmente en los datos de radiación solar debido a su importancia en la degradación de módulos solares en el Altiplano.

En los siguientes subapartados se muestra los análisis de los datos de radiación total, radiación UV y temperatura, centrándose en los dos primeros. También se destacan otros análisis como un breve estudio de la nubosidad y su influencia.

4.2 Radiación

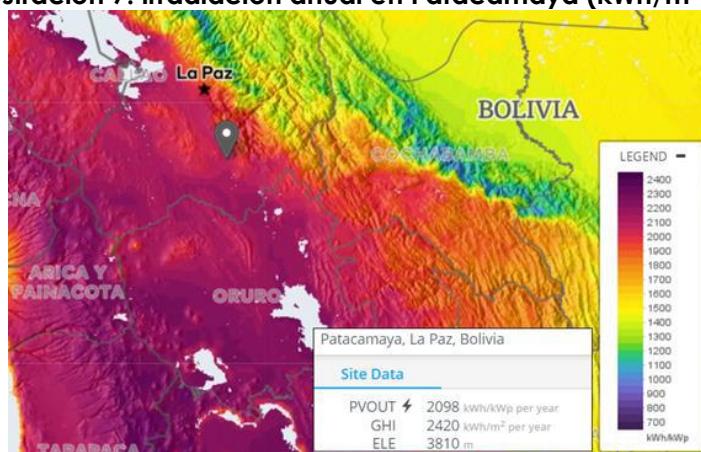
Los datos obtenidos de radiación solar se dividen en instantánea o irradiancia, como forma de potencia en W/m^2 , y en radiación, que se extrae al integrar la irradiancia, obteniendo la energía en Wh/m^2 .

En los diferentes subapartados se parte de lo general a lo particular, empezando por los datos anuales y finalizando con las particularidades de meses y días concretos, máximos, mínimos y otros datos de interés.

4.2.1 Irradiación total anual

De los datos obtenidos se concluye una GHI o Irradiación Horizontal Global anual aproximada de **2.352 kWh/m²**. Este número supone una gran aproximación a los datos aportados por Global Solar Atlas [4], que estima 2.420 kWh/m² al año en el lugar donde se toman las mediciones de este estudio, en Patacamaya, La Paz, Bolivia. Con esta comparación se constata que las suposiciones tomadas para completar los días del año no considerados aptos son acertadas.

Ilustración 7. Irradiación anual en Patacamaya (kWh/m²) [4]



4.2.2 Irradiancia total máxima instantánea

Los datos conocidos y demostrados de irradiancia en W/m^2 constatan que la radiación solar directa llega a la tierra con un valor de 1.367 W/m^2 , antes de traspasar la atmósfera. Esta puede ser alterada y disminuida por diversos factores como las nubes o las diferentes partículas que hay en el aire. No obstante, y como se ha explicado en anteriores apartados, los aparatos de medición de los que se obtienen los datos utilizados miden la radiación global, no la directa. Por ello, este valor puede verse alterado a lo largo de un día de medición, midiendo incluso más de 1.367 W/m^2 [5].

A modo de ejemplo, se muestra un día soleado en el que esta máxima irradiancia no se ve alterada. En concreto el representado es el 26 de enero de 2020.

Ilustración 8. Gráfica radiación solar 26 de enero de 2020

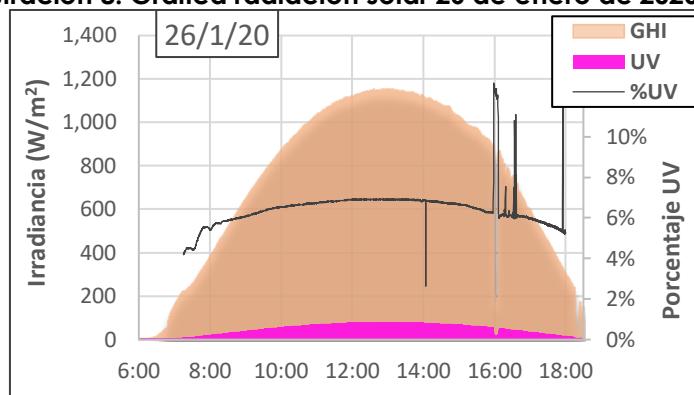


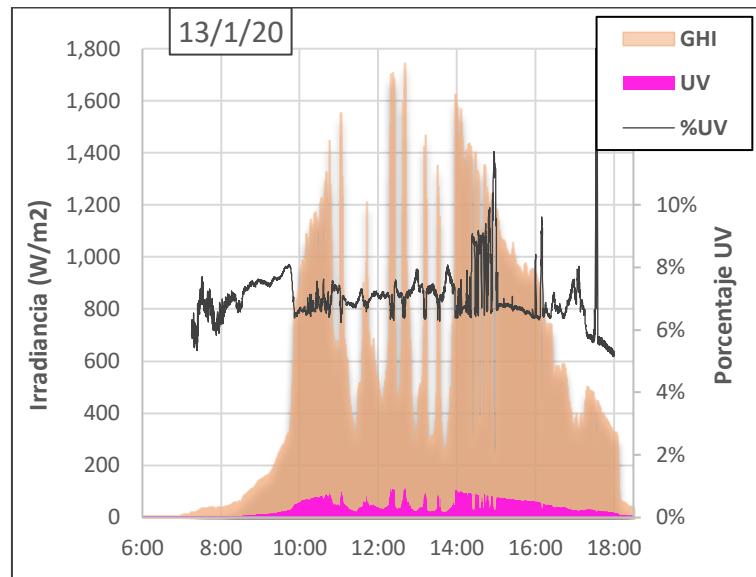
Tabla 5. Radiación solar 26 de enero de 2020

Fecha	GHI	Max	UV	Max UV	% medio	% max
26.1.2020	9.096	1.151	592	79	6,36%	12,64%

En la gráfica de la ilustración 8, se aprecia perfectamente la parábola que traza a lo largo del día la irradiancia en W/m^2 . En la tabla 5 se marca el valor máximo obtenido en **1.151 W/m^2** . Este valor es de gran importancia pues es estable, no resulta de un pico de radiación por alteraciones debido a la nubosidad o de una mala medición. Es el valor que establece este estudio como máximo alcanzado en un día soleado y sin alteraciones.

Se ha escogido este día de enero puesto que enero coincide con el verano estacional en Bolivia que, aun siendo lluvioso, muestra el mes con máximos de irradiancia. Cabe destacar que este día no representa un día medio de enero. Debido a la época lluviosa, la radiación solar se ve obligada a pasar a través de nubes y lluvia, de esta forma se filtra y atenúa la radiación o se distorsiona debido a la reflexión en partículas de agua. Por ello, de forma instantánea, se alcanzan picos aún mayores de irradiancia. Es el caso ejemplo del 13 de enero mostrado a continuación.

Ilustración 9. Gráfica radiación solar 13 de enero de 2020



Fecha	GHI	Max Irradiación	UV	Max UV	% medio	% max
13.1.2020	5.980	1.744	413	111	7,02%	17,45%

Tabla 6. Radiación solar 13 de enero de 2020

En la gráfica de la ilustración 9 se aprecia el máximo de irradiancia medido en todo el año, superior a 1700 W/m², alcanzando 1744 W/m², marcado en la tabla 6. No obstante, este dato es instantáneo y se debe a diversidad de factores ya mencionados. Por ello, no se tiene en cuenta como dato de valor para el presente estudio.

En resumen, en cuanto a la irradiancia máxima, se concluye que alcanza de forma estable 1150 W/m², con ciertos picos instantáneos que provocan que se sobrepase dicho valor.

4.2.3 Irradiación UV anual

Para la radiación UV la suma total del año se estima en **151 kWh/m²**, es un **6,4%** de radiación UV del total. Esto supone una radiación UV muy elevada, característica del Altiplano boliviano. En el estudio antecesor a este se estimó una radiación UV de 137 kWh/m² al año [1]. Este dato se obtuvo con un porcentaje de radiación UV que fue estimado en 5,5%, extrapolado de los datos del mes de agosto del 2019, un mes de muy poca nubosidad y, por lo tanto, bajo porcentaje UV.

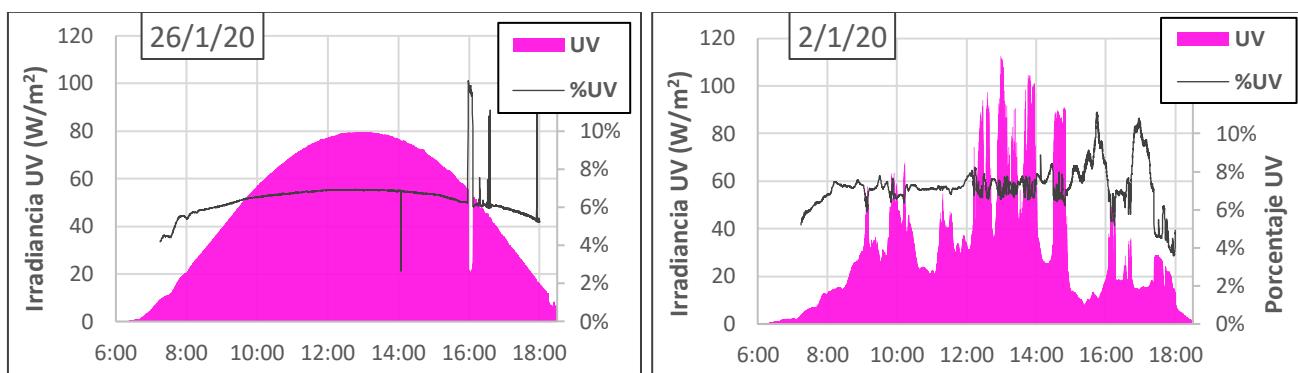
Un 6,4% de radiación UV es un valor muy elevado comparado con otros valores obtenidos en otras partes del mundo. Diferentes estudios han concluido el porcentaje de UV respecto a la irradiación total en todo el mundo varía entre el 2% y el 9,4%, es muy poco habitual superar el 5%.

4.2.4 Irradiancia máxima UV

La Radiación UV instantánea o irradiancia, al igual que la irradiancia total, puede verse afectada por los diversos factores climatológicos. Por ello, se ha considerado irradiancia máxima UV al máximo valor estable medido en un día soleado de la época de verano. El día es el mismo utilizado que para la irradiancia total, el 26 de enero del año 2020. Se obtuvo como valor estable una irradiancia UV de **79,1 W/m²**, se muestra en la gráfica de la ilustración 10.

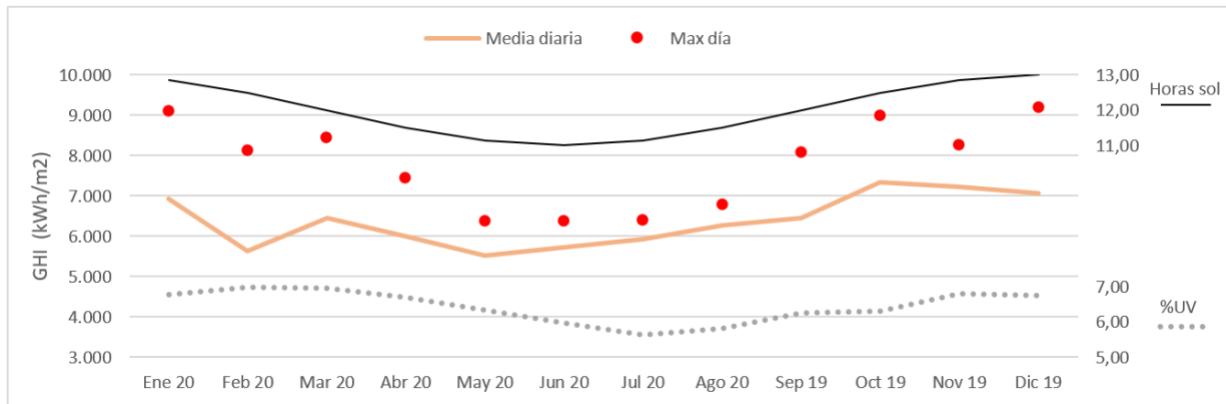
También se muestra como ejemplo las variaciones de la irradiancia en el espectro UV en un día nublado, 2 de enero, ilustración 10. Este día se tuvo la medición máxima, se llegó a 112,4 W/m². Supone un valor extremo que para este estudio se considera anecdótico pues es un dato instantáneo.

Ilustración 10. Gráficas del 26 (soleado) y 2 (nublado) de enero de 2019



Para concluir el subapartado de la radiación solar, en la gráfica de la ilustración 11 se muestran las horas de sol al día, se observa que los meses cercanos al solsticio de verano tienen más luz y por lo tanto más radiación, entre octubre y febrero. Se representa también el porcentaje de radiación UV que explica una irradiación (GHI) en los meses de verano menor a lo esperado (alto porcentaje UV) debido a la época lluviosa. No obstante, se sigue apreciando una mayor irradiación en estos meses, exceptuando febrero que, como se observa con el alto porcentaje UV, fue un mes muy nublado, mayor de lo habitual.

Ilustración 11. Radiación solar, horas de sol y porcentaje UV anual



Para concluir este apartado se remarcán los datos que se establecen como datos clave aportados por este estudio:

- Irradiación total anual (GHI) **2.350 kWh/m²**.
- Máxima Irradiancia. Se considera como máxima irradiancia **1.150 W/m²**, como valor estable alcanzado en un día soleado.
- Radiación UV. Irradiación UV total de **150 kWh/m²**, con un máximo de radiación UV instantánea de **80 W/m²**.
- Porcentaje de radiación **UV medio de 6,4%**. Máximo media diaria de **7,4%** y mínimo de media diaria de **5,3%**.

4.3 Nubosidad

En el apartado 3 ha quedado reflejada la importancia del efecto de las nubes, que afecta a la irradiancia máxima, generando irregularidades, y a la irradiación, que será atenuada por el filtro natural que supone la nubosidad y la lluvia. Es importante recordar que las partículas de agua filtran los espectros de onda de mayor frecuencia. Por ello, el espectro UV, aun viéndose atenuado, disminuye en menor medida que el resto del espectro solar. Esto provoca que, en días nublados, cuando baja la radiación, aumenta el porcentaje de radiación UV. Se puede observar en la gráfica de la ilustración 10, en el apartado anterior.

Teniendo en cuenta el porcentaje de UV/GHI se puede extrapolar la nubosidad para cierto momento, día o mes del año. De los datos obtenidos anualmente obtenemos la tabla 7 que muestra datos del porcentaje de radiación UV de cada mes.

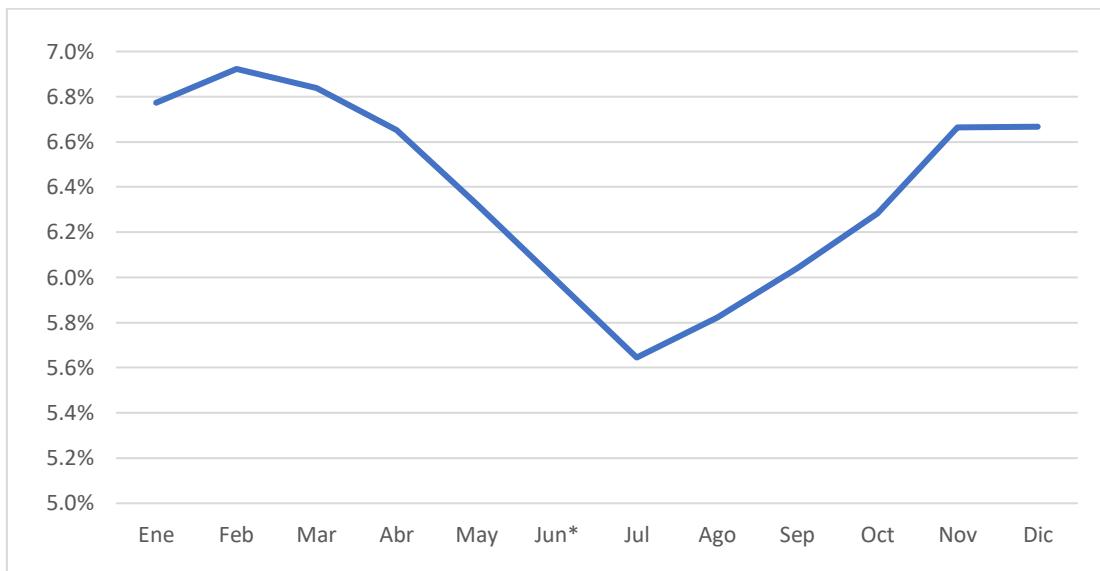
Tabla 7. Porcentaje de radiación UV. Medias mensuales y diarias máximas y mínimas

	Media mensual	Media Diaria		Índice de Claridad
	Porcentaje Medio	Porcentaje Máximo	Porcentaje Mínimo	
Ene	6,8%	7,3%	6,3%	0,30
Feb	6,9%	7,3%	6,5%	0,23
Mar	6,8%	7,3%	5,9%	0,27
Abr	6,7%	7,4%	6,0%	0,36
May	6,3%	6,7%	6,0%	0,51
Jun*	6,0%	6,4%	5,7%	0,67
Jul	5,6%	6,1%	5,5%	0,84
Ago	5,8%	6,3%	5,5%	0,75
Sep	6,0%	6,6%	5,3%	0,65
Oct	6,3%	6,9%	6,0%	0,53
Nov	6,7%	6,8%	6,5%	0,35
Dic	6,7%	7,2%	6,3%	0,35

En la tabla se marca, con los porcentajes medios diarios, el mes que tuvo el día con el mayor porcentaje (más nublado) y el mes con el día que tuvo menor porcentaje de radiación UV (más claro), son 7,4% y 5,3% alcanzados en días concretos de abril y septiembre respectivamente (no tienen porqué coincidir con los meses más nublado y más soleado).

Con los porcentajes medios mensuales, donde sí se representa la nubosidad del mes, se obtiene la gráfica la ilustración 12.

Ilustración 12. Porcentaje UV medio mensual

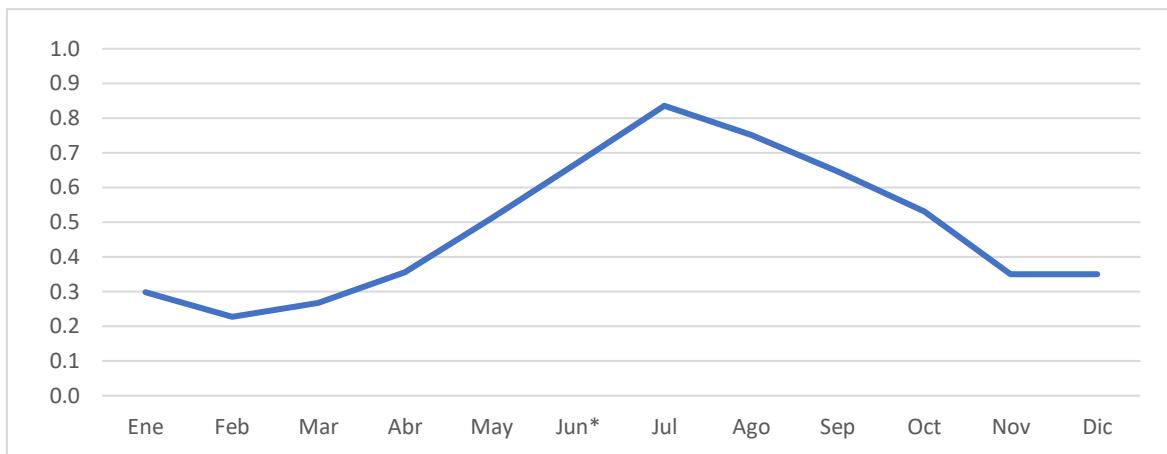


Se muestran los valores de las medias de cada mes según la tabla 7. Este es el valor más importante y representativo. Se aprecian los meses con mayor nubosidad que son diciembre, enero y febrero, alcanzando todos ellos un porcentaje UV mayor al 6,5%. Estos valores se pueden representar de forma que muestren la claridad de los días. Se ha calculado el Índice de claridad teniendo

en cuenta los valores máximos y mínimos destacados previamente, 7,4% y 5,3%. Se obtienen en la tabla 7 siguiendo la siguiente fórmula.

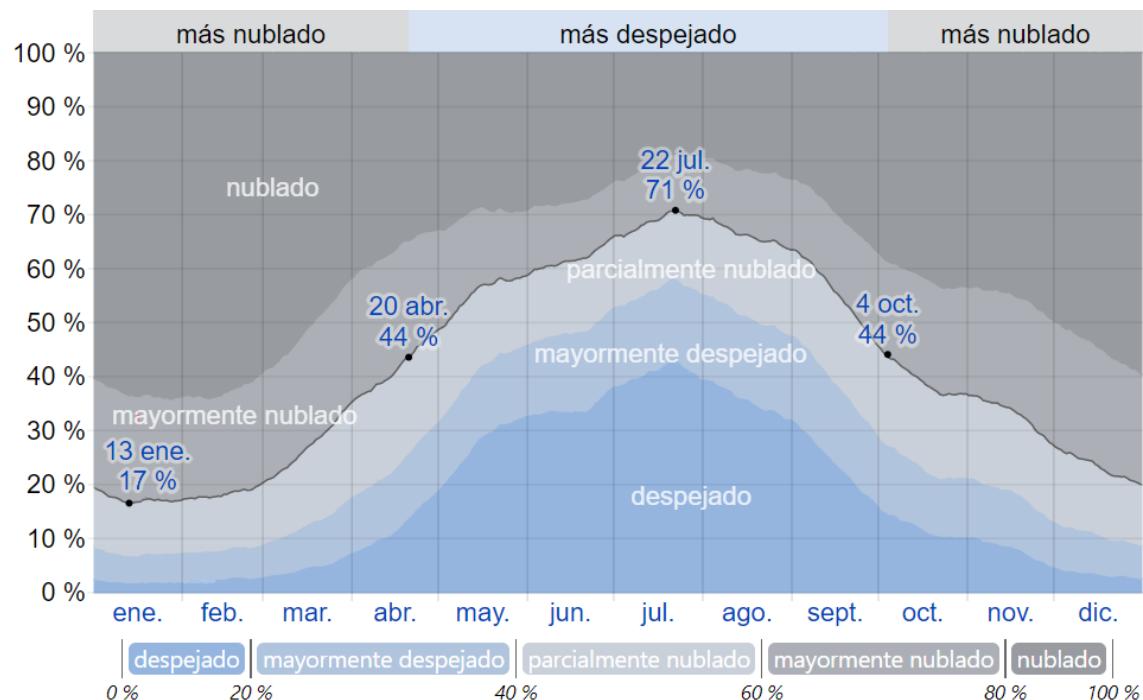
$$\text{Índice de Claridad} = \frac{\text{Máximo} - \text{Media Mes}}{\text{Máximo} - \text{Mínimo}}$$

Ilustración 13. Índice de claridad



Los índices de claridad calculados y mostrados en la ilustración 13 pueden asemejarse con los índices de nubosidad que se tenían previos a este estudio. Se muestran en la ilustración 14 [6].

Ilustración 14. categorías de nubosidad anuales en Patacamaya, La Paz, Bolivia [6]

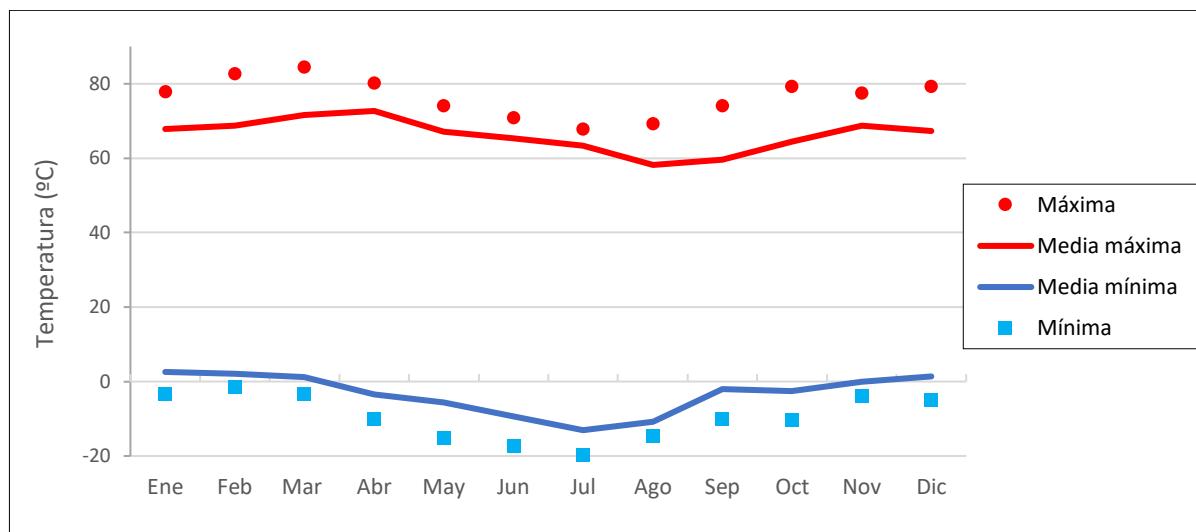


Se puede apreciar que los datos del presente estudio se ajustan en buena medida a los datos previos de nubosidad. Conocer estos datos de la nubosidad nos permite entender los valores de radiación obtenidos. Con esta información se concluye que, si bien se obtienen mayores radiaciones en los meses de más horas de luz solar, no se obtienen valores tan altos como pudieron ser esperados en un inicio.

4.4 Temperatura

De los datos obtenidos son de especial utilidad los referentes a la temperatura del módulo. De la tabla 4 se sacan las temperaturas máximas y mínimas. El valor máximo medido en todo el año es de 84,6°C el 3 de marzo. El mes con máxima temperatura media es también marzo con 71,68°C. Esto se debe a que marzo es un mes con alta radiación y con poca nubosidad. En cuanto a la mínima medida, fue de -19,7°C el día 28 de julio. También fue este mes el que obtuvo las menores temperaturas medias con -13,06°C. Se debe a que julio pertenece al invierno estacional, contando, por lo tanto, con menos horas de luz y menor radiación solar. Además, es un mes seco que provoca mayores bajadas de temperatura durante la noche despejada.

Ilustración 15. Temperatura medida del módulo



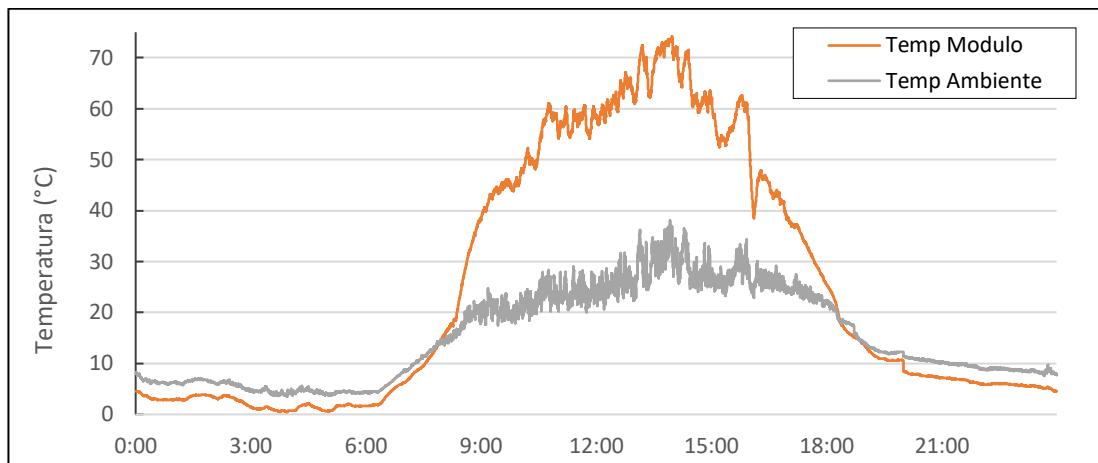
En la gráfica de la ilustración 15 se muestran los datos representados de todos los meses. Se aprecia que los meses de invierno adquieren las temperaturas de módulo menores mientras que no es en verano cuando se miden las mayores temperaturas, esto se debe a que coincide con la época húmeda.

De los datos de temperatura media se destaca los datos de la media anual, con una temperatura máxima y mínima media anual de 66,26°C y de -3,30°C, respectivamente. Esta diferencia de 70°C aproximadamente, es la media de variación entre el día y la noche durante todo el año. Supone elevados gradientes de temperatura que afectan y degradan los módulos en mayor

medida. Los cambios bruscos de temperatura producen esfuerzos mecánicos que hacen sufrir a la estructura del módulo con su consiguiente degradación [7].

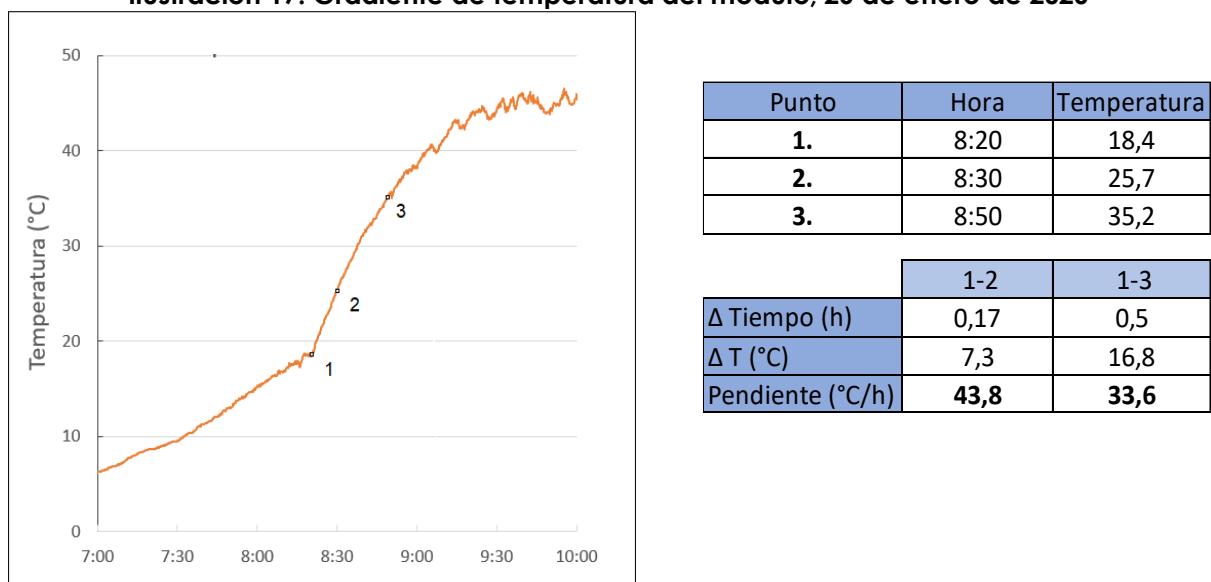
A modo de ejemplo se ha escogido el día con mayor radiación del año, el 26 de enero de 2020. En la gráfica de la ilustración 16 se observan las altas temperaturas alcanzadas debidas a la alta radiación, coincidente con un día de cielo despejado.

Ilustración 16. Temperaturas 26 de enero de 2020



Además de los picos de temperatura es de vital importancia el mencionado gradiente de temperatura. Se aprecia un gran aumento de la temperatura del módulo desde el amanecer, sobre las 7 de la mañana, hasta las 10 de la mañana debido a la radiación solar incidente. En la ilustración 17 se exponen los datos de los puntos seleccionados del gráfico, que ha sido ampliado.

Ilustración 17. Gradiente de temperatura del módulo, 26 de enero de 2020



En la ilustración 17 se muestran solamente la temperatura del módulo entre las 7 y las 10 de la mañana. Se puede apreciar la pendiente del gradiente de temperatura que es calculada en la tabla entre las diferentes horas. Se inicia con 43,8°C por hora desde las 8:20 hasta las 8:30. Durante la primera media hora de la mañana se mantiene a más de 30°C por hora, de 8:20 a 8:50.

5 DEGRADACIÓN DE MÓDULOS

Los datos más importantes a tener presentes sobre la radiación solar en el Altiplano boliviano son los datos anuales aproximados mostrados en los anteriores apartados. Se resumen en:

- Irradiación total (GHI) **2350 kWh/m²**.
- Máxima Irradiancia **1150 W/m²**.
- Irradiación UV **150 kWh/m²**.
- Máxima Irradiancia UV **80 W/m²**.
- Temperatura media máxima mensual 72°C, marzo.
- Temperatura media mínima mensual -13°C, agosto.
- Gradiente de temperatura máximo 40°C/h durante la mañana.

Estos datos muestran las condiciones extremas a las que se somete un módulo fotovoltaico situado en el Altiplano boliviano. A priori, la mayor radiación solar se traduce como mayor energía producida por módulo instalado. Por ello, los estudios de rentabilidad de proyectos en el Altiplano salen muy favorables. No obstante, esta gran cantidad de energía solar degradada en mayor medida los módulos fotovoltaicos. Existen diversos tipos de degradación de módulos estrechamente relacionados con las condiciones extremas medidas en el Altiplano. Jordan et al. [8] realizó un estudio en más de 2000 módulos de silicio cristalino, estimó una media de 0,5% de pérdida de potencia anual. Este porcentaje es mayor en el Altiplano por las extremas condiciones climáticas.

Se considera que un módulo falla cuando su potencia nominal desciende por debajo del 80% de su potencia inicial de fábrica. De entre los diferentes tipos de degradación que producen el fallo de un módulo cristalino, destacan: decoloración, delaminación y corrosión [9]. Estos modos de degradación están estrechamente relacionados con la alta radiación, la radiación UV y la temperatura del módulo.

5.1 Degradación por radiación solar

La radiación solar es el principal factor de degradación de módulos fotovoltaicos. En concreto, el espectro UV los afecta considerablemente puesto que es la parte más enérgica de todo el espectro de radiación solar. Diversos estudios han concluido la estrecha relación entre radiación UV y degradación.

Un estudio realizado en China [10], clasifica las zonas según la radiación UV recibida al año. En zonas de alta radiación, similar a la del Altiplano con 170 kWh/m² al año, estimaron una degradación del 8% en aproximadamente 18 años de exposición (a 185 kWh/m² al año). El 95% de potencia se alcanzó en estas condiciones a los 8,6 años.

El estudio realizado por la compañía Fraunhofer [11] degradó un módulo con 200 W/m² a 80°C hasta que la potencia decreció un 5% Esto sucedió tras pasar 4000 horas, que equiparan a 800 kWh/m² de irradiación UV. Esta dosis UV equivaldría a unos 5 años de exposición en el Altiplano, a 150 kWh/m² al año.

La degradación por radiación UV se ve empeorada por condiciones adversas de temperatura. Simulaciones también realizadas por la compañía Fraunhofer [12] a 65°C y 85°C alcanzaron degradaciones hasta el 85% de potencia tras irradiarles 300 kWh/m² de UV.

Los diferentes estudios de degradación realizados en laboratorios demuestran la importancia de la degradación por el factor UV que será mucho más notorio en el Altiplano.

5.2 Degradación por temperatura

La temperatura afecta al rendimiento del módulo, está comprobado que las altas temperaturas provocan una disminución del voltaje del módulo, lo que supone disminuir su rendimiento al reducir su factor de llenado. No obstante, este fenómeno es algo puntual y es en la degradación a lo largo del tiempo en lo que se centra el presente estudio.

La degradación con el paso de los años ocurre debido a los cambios de temperatura, recordemos que se han obtenido datos de temperaturas máximas del módulo de más de 80°C y mínimas de -20°C. Las medias mensuales máxima y mínima son 72°C y -13°C, respectivamente. No obstante, lo importante es la diferencia diaria entre el día y la noche. La media de las temperaturas máximas alcanzadas durante el día es de 66°C y durante la noche desciende este valor hasta una media anual de -3°C. Esto supone una media de variación de temperatura de casi 70 grados durante todos los días del año, como se citó en el anterior apartado.

El estrés térmico es producido por las diferencias de temperatura. Cuanto más rápida es la variación de temperatura, mayor el gradiente térmico, aumentando las tensiones estructurales internas en los módulos. Por este factor se producen micro roturas en las placas de silicio. Este fenómeno es uno de los

principales contribuyentes a la perdida de potencia, que puede por ser por degradación generalizada [13] o por degradación de partes y componentes concretos como, por ejemplo, el fallo de las soldaduras en las interconexiones [14].

De los datos recopilados se han obtenido gradientes de temperatura de mas de 40°C por hora. Si bien los valores son mucho mayores a la media, existen otros puntos del planeta con condiciones similares como el desierto, con temperaturas extremas durante el día y muy bajas por la noche. Es por ello, que los test IEC lo tienen en consideración y no es considerado en este estudio unos de los principales puntos a mejorar para módulos en el Altiplano.

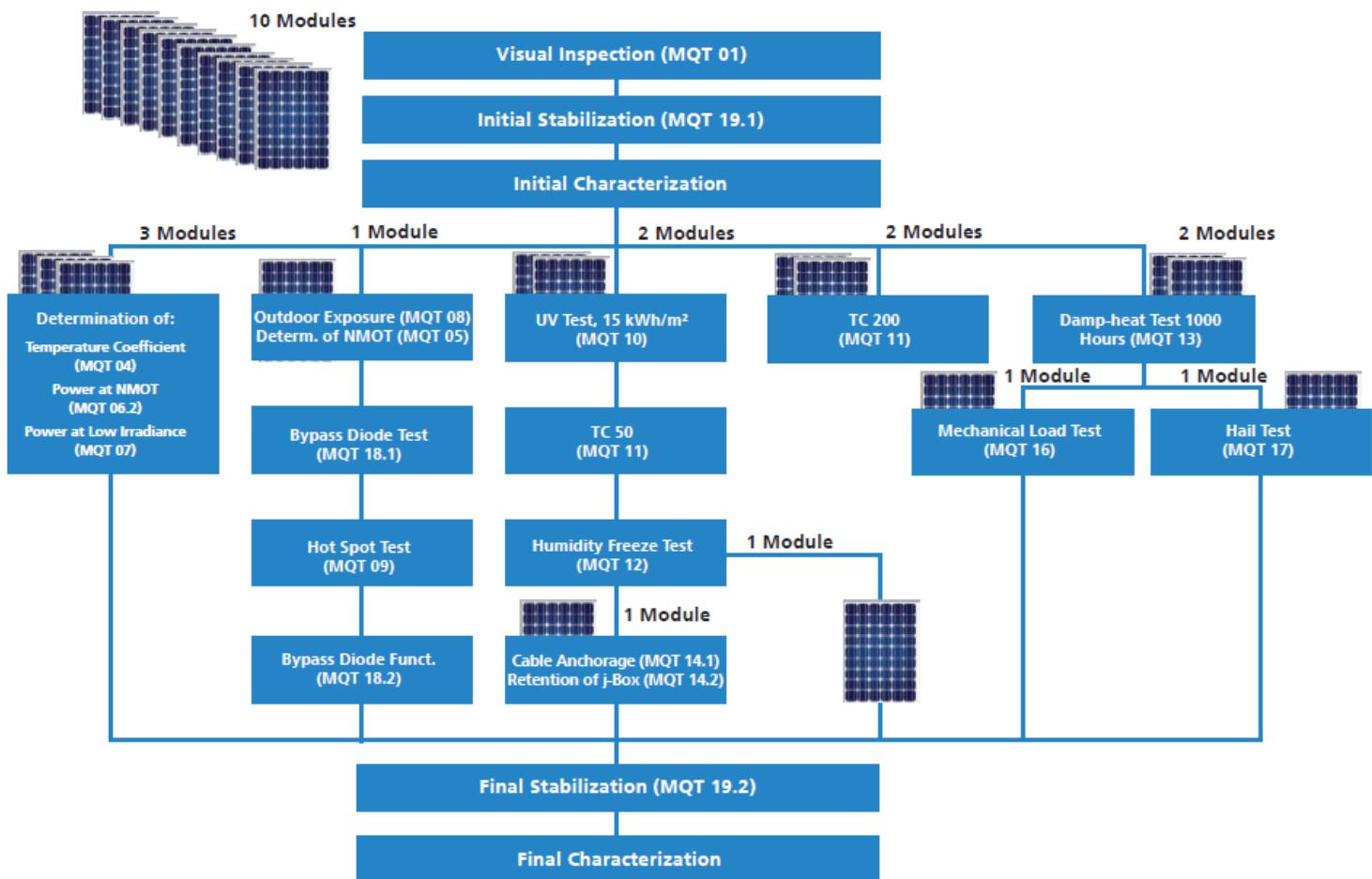
6 TEST IEC

Los test más habituales utilizados como estándares para módulos fotovoltaicos son los test IEC 61215 (módulos de silicio), IEC 61646 (módulos de película fina) y IEC 61730 (seguridad de módulos).

Los test IEC son, por definición, requisitos mínimos para los fabricantes. Son mínimos de calidad para operar en condiciones estándares al aire libre. Esto significa que no prueban condiciones extremas de radiación y temperatura como las que se pueden dar en el Altiplano, sobre todo las relacionadas con la radiación y, mas concretamente, con la extrema radiación UV.

Como se ha explicado en anteriores apartados, este estudio se ha centrado en recopilar los datos, filtrarlos y analizarlos para obtener información sobre las condiciones extremas del Altiplano, de forma más precisa que en estudios previos, y aumentar la base de datos. No obstante, se debe de hacer referencia a los test IEC y sugerencias en cuanto a la realización de las pruebas pues es el objetivo final de la obtención de datos.

Ilustración 18. Test IEC 61215 [15]



En la ilustración 18 se muestra una secuencia estándar para módulos fotovoltaicos de silicio cristalino según la IEC 61215. La norma tiene 19 Pruebas de Calidad de Módulo diferentes (MQT, Module Quality Test). La revisión de la norma en 2016 supuso un gran avance. No obstante, numerosos estudios requieren que sea revisada de nuevo para exigir mínimos de calidad superiores con pruebas más exigentes.

No existen muchos estudios sobre los test que más convendría hacer para las condiciones meteorológicas del Altiplano, pero gracias a GIZ y al PEERR en Bolivia se está avanzando al respecto. Inicialmente, con el estudio de C. Perela [2], se obtuvieron datos sobre radiación en La Paz. PI-Berlin utilizó dichos datos y se apoyó en más bibliografía para hacer un primer análisis de posibles mejoras en los test [3]. Posteriormente, con el mencionado estudio predecesor a este, fueron instalados equipos de medición para recopilar datos [1]. Con el presente trabajo, se completa la base de datos, incluyendo datos fundamentales, sobre todo los de radiación UV, que eran escasos.

Además de mejorar la base de datos es objeto de este estudio sugerir la mejora de pruebas en los test. Para ello, se parte de las mejoras sugeridas por PI-Berlin en 2019 para el Altiplano. Todas las propuestas sugeridas, mostradas y enumeradas en la siguiente imagen, son detalladas en estudios previos [1][3].

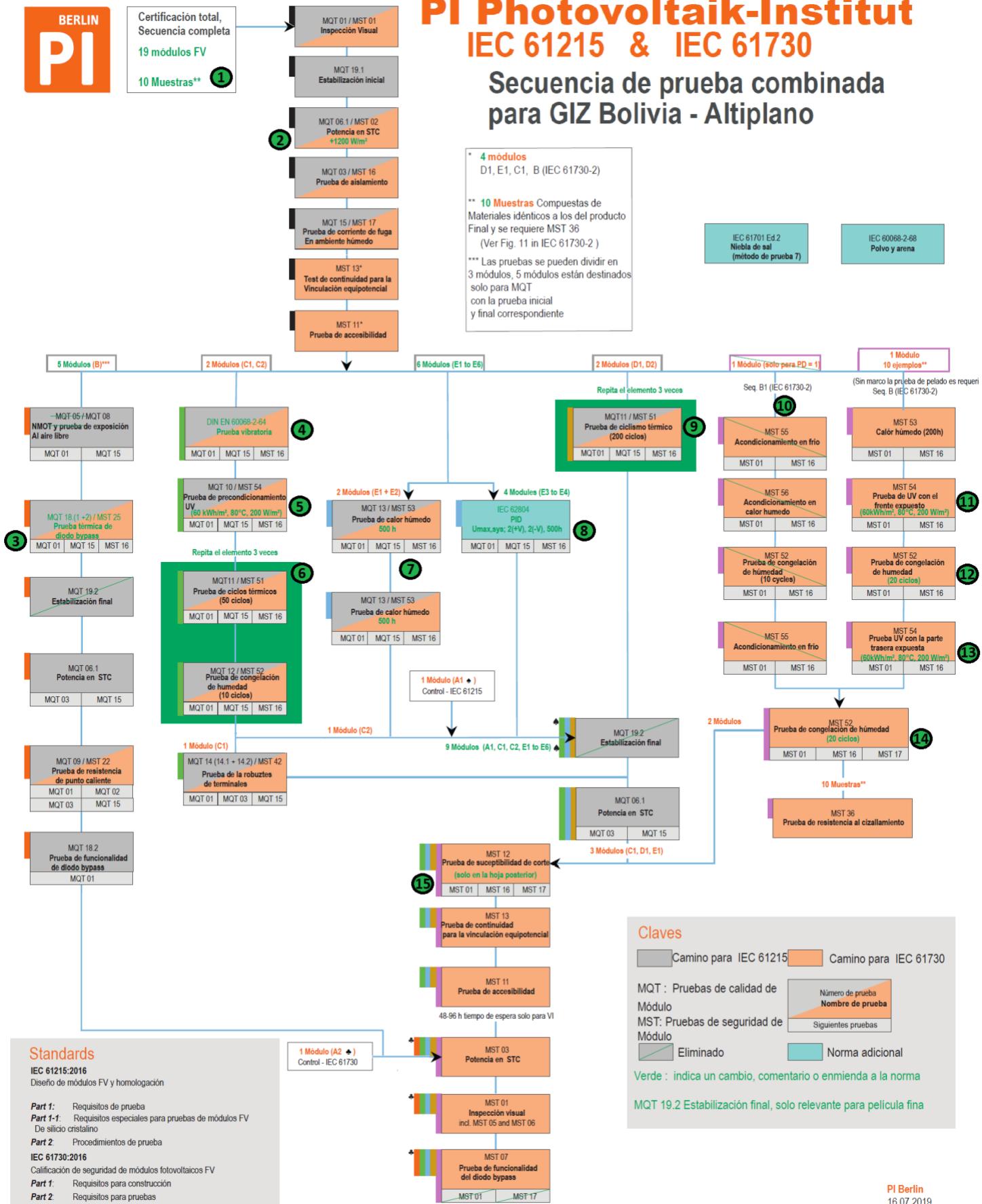
En este estudio se remarca la importancia y se realizan sugerencias de las secuencias que cuentan con la MQT 6, MQT 10, MQT 11 y MQT 12, principalmente. Además de hacerse recomendaciones sobre el resto de las secuencias menos importantes para las condiciones extremas del Altiplano.

Ilustración 19. Secuencia de prueba combinada Altiplano [3]

PI Photovoltaik-Institut

IEC 61215 & IEC 61730

Secuencia de prueba combinada para GIZ Bolivia - Altiplano



La **MQT 06** establece las condiciones estándares para probar la potencia de un módulo. Las Standard Test Conditions (STC) establecen 1.000 W/m² a 25°C con 1,5 AM, según la norma. Se ha considerado como irradiancia máxima del Altiplano **1200 W/m²**, tal y como se explica en anteriores apartados.

En el trabajo predecesor [1] se propuso 1400 W/m², lo cual es superior a lo necesario. Es cierto que se han medido hasta 1700 W/m² pero ha sido de forma espontánea. Otros estudios anteriores recomiendan aumentar este valor de 1000 W/m² a 1200 W/m². Con los datos obtenidos, se demuestra que es buena práctica probar los módulos con esta irradiancia, 1200 W/m².

La **MQT 10** es la prueba de precondicionamiento UV. En los test IEC:2016 se establecen 15 kWh/m² de radiación UV, últimas versiones han aumentado esta energía a 60 kWh/m², coincidiendo con las recomendaciones de PI-Berlin [3]. No obstante, teniendo en cuenta que en el Altiplano han sido medidos **150 kWh/m² en un año**, esta cantidad de energía UV utilizada en los test es alcanzada en menos de medio año. Por lo tanto, se considera insuficiente para probar la durabilidad de módulos en el Altiplano, donde la radiación UV anual es más de 3,5 veces la recibida en países como Alemania, con 40 kWh/m² de UV al año. No se debe de utilizar los mismos test, deben de ser más exigentes.

Como se ha mencionado, PI-Berlin ya sugirió en 2019 llegar a los 60 kWh/m². No obstante, es recomendado por este estudio aumentar más la dosis de radiación UV, mínimo hasta medio año, equivaldría a **75 kWh/m²**, o incluso un año entero, 150 kWh/m².

El test de precondicionamiento UV es un test que consume tiempo y dinero, se debe de mantener el módulo en cámara a una potencia de 200 W/m² hasta irradiar 15 kWh/m² (según IEC 61215). Por ello, sería necesario hacer un estudio del coste que supondría aumentar esta dosis de radiación UV hasta un año completo en el Altiplano, 150 kWh/m². Esto alargaría el tiempo necesario para realizar las pruebas de precondicionamiento UV. Las cámaras modernas de UV pueden llegar a irradiar hasta 250 W/m² esto supondría tener el módulo 600 horas en la cámara, 25 días.

El tiempo en cámara puede parecer desmesurado pero el coste de los test se divide entre todo el lote de módulos. Por lo tanto, el precio unitario no incrementaría en exceso. Los diversos estudios citados en el apartado anterior muestran la necesidad de incrementar la exigencia de los test de precondicionamiento UV.

La **MQT 11** corresponde a la prueba de ciclos térmicos. La diferencia de temperatura de módulo máxima y mínima es de media 70°C durante todos los días del año. Además, se alcanzan gradientes de temperatura con pendientes que alcanzan los 40°C por hora en ciertas fracciones horarias. Por ello, se entiende la importancia de esta prueba para el Altiplano. Solo en climas

desérticos se alcanzan estas condiciones. Por lo tanto, las pruebas de ciclos térmicos también pueden considerarse mejorables para estos climas extremos.

La **MQT 12** corresponde a las pruebas de congelación de humedad. Se considera fundamental en el altiplano puesto que la temperatura mínima media es de $-3,3^{\circ}\text{C}$. Solo durante diciembre, enero, febrero y marzo supera los 0°C , con una media de $1,83^{\circ}\text{C}$. Esto significa que en la época de lluvias la temperatura está cerca del punto de congelación. El resto del año la temperatura es inferior a este punto prácticamente todos los días, alcanzando -20°C las noches más frías de invierno.

PI-Berlin ha sugerido repetir 3 veces una parte de las pruebas, en la ilustración 19 se destacan en verde. Corresponde a los 2 módulos de la secuencia C y también a los de la secuencia D. En concreto, repetir 3 veces la MQT 11 (C y D) y MQT 12 (C). Se considera una gran aportación por parte de PI-Berlin que queda respaldada con la base de datos obtenida en este estudio.

Es fundamental modificar las pruebas de la norma IEC 61251 para asegurar la calidad mínima de los módulos para las condiciones del Altiplano. No solo las explicadas en este estudio, consideradas fundamentales, sino también el resto sugeridas en los trabajos predecesores.

Se debe remarcar la importancia de la radiación UV que destaca entre los datos obtenidos. Si bien el resto de las pruebas son de vital importancia y deben de tenerse en cuenta las modificaciones, son condiciones meteorológicas relativamente más estándares que pueden darse en otros lugares del planeta, por ejemplo, altas temperaturas de módulo se alcanzan en países cálidos en verano. Sin embargo, como se ha explicado en anteriores apartados, la radiación UV es 3,5 veces mayor que en países europeos como Alemania. Por lo tanto, es recomendación del presente estudio, realizar la MQT 11 antes de todas las secuencias. La MQT 11 como se ha explicado, es un precondicionamiento UV y, dadas las condiciones del Altiplano, se considera que se deben de precondicionar todas las secuencias, mínimo con 15 kWh/m^2 .

Diversos estudios demuestran que la combinación de pruebas, sobre todo las de temperaturas y radiación UV, degradan en mayor medida los módulos. Por ejemplo, como se muestra en el estudio ya citado de Fraunhofer [11] en el apartado anterior, en la combinación del precondicionamiento UV con la prueba de calor húmedo, los resultados más extremos muestran que con 4.000 horas de precondicionamiento UV, se pierde más del 50% de la potencia después del ensayo de calor húmedo. Es importante mencionar que durante este experimento se utilizó una irradiancia UV de 90 W/m^2 , lo que equivale durante las 4000 horas a 360 kWh/m^2 , que es menos que la radiación UV durante 2 años y medio en el Altiplano, 150 kWh/m^2 al año.

7 CONCLUSIONES

El presente estudio ha recopilado los datos de mediciones de radiación solar y temperatura de más de un año, desde septiembre de 2019 hasta septiembre de 2020. Estos datos han sido filtrados, ordenados y analizados. Se consolida una base de datos a disposición del Estado boliviano para estudios posteriores. Los principales datos de interés han sido mostrados y representados para mostrar conclusiones.

Con los datos obtenidos se ha demostrado la gran magnitud que supone la radiación UV en el Altiplano. Además, se ha explicado los efectos adversos de degradación que sufren los módulos debido a este fenómeno que es 3 veces superior que en países europeos. Por lo tanto, se ha concluido la necesidad de la mejora de los test IEC, sobre todo en lo relacionado al espectro ultravioleta.

Se ha mostrado la importancia de la radiación solar total del Altiplano y las grandes diferencias de temperatura. Diferentes conclusiones han sido desarrolladas de forma adicional al estudio principal sobre radiación UV.

Se han sugerido cambios en las secuencias del test IEC 61215 y se han comentado las recomendaciones de estudios previos. Se resumen en:

- MQT 06. Considerar Condiciones Estándares de Test (STC) 1.200 W/m².
- MQT 10. Aplicar 75 kWh/m² para las pruebas de precondicionamiento UV.
- MQT 11. Aumentar el número de ciclos, repitiendo la prueba 3 veces.
- MQT 12. Aumentar el número de ciclos, repitiendo la prueba 3 veces.
- Incluir prueba de Precondicionamiento UV en todas las secuencias que no lo contemplan.

8 BIBLIOGRAFÍA

- [1] Alberto Ruiz de Alegría. "Operation conditions in a photovoltaic solar plant in the Altiplano. Ultraviolet radiation and thermal cycling stress." Paderborn University, Germany, 2019.
- [2] Cecilia Perela Barea. "Operating conditions for photovoltaic solar plants in Bolivia" Paderborn University, Germany, 2018.
- [3] PI Photovoltaik-Institut Berlin A. "PV Operational Conditions in Altiplano, Bolivia and Suggestions for PV Module Testing Adoptions" Berlin, 2019.
- [4] Global Solar Atlas : <https://globalsolaratlas.info/map>
- [5] IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/caracteristicas-de-la-radiacion-solar>
- [6] <https://es.weatherspark.com/y/27511/Clima-promedio-en-Patacamaya-Bolivia-durante-todo-el-a%C3%B3o>
- [7] Ulrich Eitner, Sarah Kajari-Schröder, Marc Köntges and Holm Altenbach. "Thermal Stress and strain of Solar Cells in Photovoltaic modules" Advanced Structured Materials (STRUCTMAT, volume 15, chapter 29), 2011.
- [8] Dirk C. Jordan and Sarah R. Kurtz., "Photovoltaic Degradation Rates—an Analytical Review", 2012. [Online] Visitado en diciembre de 2020:<https://www.nrel.gov/docs/fy12osti/51664.pdf>
- [9] Michele Cândida Carvalho de Oliveira, Antônia Sonia Alves Diniz Cardoso, Marcelo Machado Viana and Vanessa de Freitas Cunha Lins "The causes and effects of degradation of EVA in c-Si PV modules. A review" Elsevier, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017.
- [10] He Wang, Ao Wang, Hong Yang1, Junjun Zhang and Jingsheng Huang "Performance Degradation of Crystalline Silicon Solar Module in various ultraviolet radiation areas" School of Science, Xi'an Jiaotong University, China, IEEE, 2016.
- [11] Michael Köhl "The challenges of testing the UV-impact on PV-modules", Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2012.
- [12] Daniel Philipp "UV testing and qualifications of PV modules and materials" Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, 2014.
- [13] Jean Zaraket, Michel Aillerie and Chafic Salamea "Capacitance evolution of PV solar modules under thermal stress" Elsevier, Energy Procedia n°119, pp.702-708, 2017.
- [14] Jae-Seong Jeong, Nochang Park, Changwoon Han "Field failure mechanism study of solder interconnection for crystalline silicon photovoltaic module" Elsevier, Components and Materials Physics Research Center, 2012.

[15] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE. "Test Lab PV Modules", 2017.

Título: Estudio complementario de impacto de la radiación UV en paneles solares (datos UV de un año) y otros componentes expuestos en condiciones del altiplano boliviano

Desarrollado por: Alberto Ruiz de Alegría

Programa: Programa de Energías Renovables (PEERR)

Programa No: 18.2024.0-001.00

Gestión: 2020

Ministerio de Hidrocarburos y Energías

Av. Mariscal Santa Cruz Edif. Palacio de Comunicaciones Piso 12
T +591 (2) 2186700
www.hidrocarburos.gob.bo

Cooperación Alemana al Desarrollo con Bolivia

Oficina de la Cooperación Alemana al Desarrollo
Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH
Av. Julio C. Patiño N° 1178, entre calles 17 y 18, Calacoto
Casilla 11400
La Paz, Bolivia

Oficina del Programa de Energías Renovables (PEERR)
Av. Sánchez Bustamante N° 504 entre calles 11 y 12 de Calacoto
La Paz, Bolivia
T +591 (2) 2119499
F +591 (2) 2119499, int. 111
E Michael.mechlinski@giz.de
I www.giz.de

Ministerio Federal de Cooperación Económica y Desarrollo (BMZ)

BMZ Bonn
Dahlmannstraße 4
53113 Bonn, Germany
T +49 (0) 228 99 535 -0
F +49 (0) 228 99 535-3500
poststelle@bmz.bund.de
www.bmz.de

BMZ Berlín
Stresemannstraße 94
10963 Berlin, Germany
T +49 (0) 30 18 535 – 0
F +49 (0) 30 18 535-2501



Implementada por:

