

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA DE
TELECOMUNICACIÓN**



**ENSAYOS ACELERADOS DE FIABILIDAD DE
CÉLULAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN**

TESIS DOCTORAL

Neftalí Núñez Mendoza

*Master en Ingeniería de Sistemas y Servicios Accesibles para la
Sociedad de la Información*

Febrero 2012

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

Departamento de Electrónica Física

Instituto de Energía Solar

**ESCUELA UNIVERSITARIA DE INGENIERÍA TÉCNICA DE
TELECOMUNICACIÓN**



**ENSAYOS ACELERADOS DE FIABILIDAD DE
CÉLULAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN**

TESIS DOCTORAL

Autor: Neftalí Núñez Mendoza

*Master en Ingeniería de Sistemas y Servicios Accesibles para la
Sociedad de la Información*

Director: Manuel Vázquez López

Doctor en Ciencias Físicas

Febrero 2012, Madrid

TÍTULO: Ensayos acelerados de fiabilidad de células solares de concentración.
AUTOR: D. Neftalí Núñez Mendoza
DIRECTOR: D. Manuel Vázquez López

El Tribunal nombrado con fechade de 2011 por el Mgfc. Y Excmo. Sr Rector de la Universidad Politécnica de Madrid, , está compuesto por los doctores:

Presidente: D. Gabriel Sala Pano
Vocal: D. Gabino Almonacid Puche.
Vocal: D. José Ramón González Ciprián.
Vocal: D. Ignacio Luque Heredia.
Secretario: D. Carlos Algora del Valle.
Suplente: D. Emilio Olías Ruiz.
Suplente: D. Jorge Marcos Acevedo.

Realizado el acto de lectura y defensa de la tesis en la Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación de la UPM, acuerda otorgar la calificación de

Madrid, a de de 2012

EL PRESIDENTE

EL SECRETARIO

LOS VOCALES

A Carmen

Quien a buen árbol se arrima, buena sombra le cobija.

(Refrán)

You make experiments and I make theories. Do you know the difference?
A theory is something nobody believes, except the person who made it.
An experiment is something everybody believes, except the person who made it.

(Albert Einstein)

As related by Herman F. Mark to the author. Quoted in Gerald Holton,
The Advancement of Science, and Its Burdens, (1986), 13.

Agradecimientos:

Mi agradecimiento y mi deuda con aquellos que han facilitado de una u otra manera el camino hasta esta tesis. Ayudando en el desarrollo o cubriendo el vacío que dejaba en el resto de mis responsabilidades. Espero no olvidarlo.

RESUMEN

Los Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (SFC) han sido propuestos como una alternativa a los sistemas convencionales de generación de energía. Durante los últimos años ha habido un auge de los SFC debido a las mejoras tecnológicas en todos los elementos del sistema, y principalmente por el uso de células multiunión III-V que superan el 43% de rendimiento.

Las células solares III-V han sido utilizadas con elevada fiabilidad en aplicaciones espaciales sin concentración, pero no existe experiencia de su fiabilidad en ambiente terrestre a altos niveles de concentración solar. Esta falta de experiencia junto al gran interés industrial ha generado la necesidad de evaluar la fiabilidad de las células, y actualmente hay un significativo número de centros de investigación trabajando en esta área.

La evaluación de la fiabilidad de este tipo de dispositivos mediante ensayos acelerados es especialmente problemática cuando trabajan a media o alta concentración por la casi imposibilidad de emular las condiciones de trabajo reales de la célula dentro de cámaras climáticas. De hecho, que sepamos, en los resultados de esta Tesis se evalúa por primera vez la Energía de Activación del mecanismo de fallo de las células, así como la garantía en campo de las células de concentración III-V analizadas.

Para evaluar la fiabilidad de células solares III-V de muy alta concentración mediante ensayos de vida acelerada se han realizado diversas actividades que han sido descritas en la memoria de la Tesis.

En la **Primera Parte** de la memoria se presenta la parte teórica de la Tesis Doctoral. Tras la Introducción, en el capítulo 2 se muestra el estado del arte en degradación y fiabilidad de células y Sistemas Fotovoltaicos de Concentración. En el capítulo 3 se exponen de forma resumida las definiciones de fiabilidad y funciones estadísticas que se utilizan para la evaluación de la fiabilidad y sus parámetros, las cuales se emplearán posteriormente en los ensayos descritos en este Tesis.

La **Segunda Parte** de la memoria es experimental. En el capítulo 4 se describen los tipos y objetivos de los ensayos acelerados actualmente aplicados a SFC y a las células, así como las modificaciones necesarias que permitan evaluar cuantitativamente la fiabilidad de las células solares de concentración III-V. En base a este análisis se presenta la planificación de los trabajos realizados en esta Tesis Doctoral.

A partir de esta planificación y debido a la necesidad de adaptar, mejorar e innovar las técnicas de ensayos de vida acelerada para una adecuada aplicación a este tipo de dispositivos, en el capítulo 5 se muestra la metodología empleada y la instrumentación necesaria para realizar los ensayos de esta Tesis Doctoral.

El núcleo de la memoria es el capítulo 6, en él se presentan los resultados de caracterización de las células durante los ensayos de vida acelerada y el análisis de dichos resultados con el objetivo de obtener valores cuantitativos de fiabilidad en condiciones reales de trabajo. Se calcula el Factor de Aceleración de los ensayos acelerados con respecto a las condiciones nominales de funcionamiento a partir de la Energía de Activación obtenida, y se demuestra la validez de la metodología y cálculos empleados, que son la base de la evaluación de la fiabilidad. Finalmente se calculan valores cuantitativos de degradación, fiabilidad y garantía de las células en condiciones nominales en campo durante toda la vida de la célula.

Con el desarrollo de esta Tesis Doctoral se ha evaluado la fiabilidad de células III-V de área pequeña, pero es muy interesante generalizar los procedimientos aquí desarrollados para las células III-V comerciales de área grande. Por este motivo, en el capítulo 7 se analiza dicha generalización, incluyendo el modelado térmico mediante elementos finitos de los circuitos de ensayo de las células.

En el último capítulo se realiza un resume del trabajo y las aportaciones realizadas, y se identifican las líneas de trabajo a emprender en el futuro.

SUMMARY

Concentration Photovoltaic Systems (CPV) have been proposed as an alternative to conventional systems. During the last years, there has been a boom of the CPV industry caused by the technological progress in all the elements of the system, and mainly caused by the use of multijunction solar cells based on III-V semiconductors, with efficiencies exceeding to 43%.

III-V solar cells have been used with high reliability results in a great number of space missions without concentration. However, there are no previous results regarding their reliability in concentration terrestrial applications, where the working conditions are completely different. This lack of experience, together with the important industrial interest, has generated the need to evaluate the reliability of the cells. For this reason, nowadays there are several research centers around the undertaking this task.

The evaluation of the reliability of this type of devices by means of accelerated tests is especially problematic when they work at medium or high concentration, because it is practically impossible to emulate real working conditions of the cell inside climatic chambers. In fact, as far as we know, the results that appear in this Thesis are the first estimating the Activation Energy of the failure mechanism involved, as well as the warranty of the III-V concentrator solar cells tested here.

To evaluate the reliability of III-V very high concentrator solar cells by means of accelerated tests, a variety of activities, described in this Thesis have been carried out.

The **First Part** of the memory presents the theoretical part of the Doctoral Thesis. After the Introduction, chapter 2 presents the state of the art in degradation and reliability of CPV systems and solar cells. Chapter 3 introduces some reliability definitions and the application of specific statistical functions to the evaluation of the reliability and parameters. From these functions, important parameters will be calculated to be used later in the experimental results of Thesis.

The **Second Part** of the memory contains the experimental. Chapter 4 shows the types of accelerated tests and the main goals pursuit with them when carried out over CPV systems and solar cells. In order to evaluate quantitatively the reliability of the III-V concentrator solar cells used in these tests, some modifications have been introduced which discussion will be tackled here. Based on this analysis the working plan of the tests carried out in this Doctoral Thesis is presented.

Chapter 5 presents a new methodology as well as the necessary instrumentation to carry out the tests described here. This new methodology takes into account the adaptation, improvement and novel techniques needed to test concentrator solar cells.

The core of this memory is chapter 6, which presents the results of the characterization of the cells during the accelerated life tests and the analysis of the aforementioned results with the purpose of getting quantitative values of reliability in real working conditions. The acceleration factor of the accelerated life tests, under nominal working conditions has been calculated. Accordingly, the validity of the methodology as well as the calculations based on the reliability assessment, have also been demonstrated. Finally, quantitative values of degradation, reliability and warranty of the solar cells under field nominal working conditions have been calculated.

With the development of this Doctoral Thesis the reliability of very high concentrator GaAs solar cells of small area has been evaluated. It is very interesting to generalize the procedures described up to this point to III-V multijunction solar cells of greater area. Therefore, chapter 7 develops this generalization and introduces also a useful thermal modeling by means of finite elements of the test cells' circuits.

In the last chapter, the summary of the results and the main contributions of this Thesis are outlined and future research activities are identified.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

Índice de contenidos.....	vii
Índice de figuras.....	xi
Índice de tablas.....	xvii
Glosario, acrónimos y abreviaturas	xix

1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Introducción.....	2
1.2. Elementos del SFC	5
1.3. Fiabilidad y concentración solar	13
1.3.1. Relación entre normas de cualificación y fiabilidad.....	15
1.4. Investigación previa en el IES-UPM.....	17
1.5. Motivación de la tesis	20
1.6. Objetivos de la tesis	21
1.7. Organización de la memoria	22

PARTE I: TEÓRICA

2. ESTADO DEL ARTE EN FIABILIDAD DE SFC Y CÉLULAS III-V	25
2.1. Introducción.....	26
2.2. Estado del arte en fiabilidad	28
2.2.1. Fiabilidad en SFC	30
2.2.2. Fiabilidad en células III-V de concentración	35
2.3. Conclusiones.....	42

3.	TEORÍA DE FIABILIDAD	45
3.1.	Introducción	46
3.2.	Definiciones	46
3.2.1.	Definiciones relacionadas con la fiabilidad	46
3.2.2.	Definiciones relacionadas con el fallo	52
3.3.	Funciones de fiabilidad	53
3.3.1.	La función distribución de Weibull	56
3.4.	Conclusiones	62

PARTE II: EXPERIMENTAL

4.	ENSAYOS ACELERADOS EN CÉLULAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN	63
4.1.	Introducción	64
4.2.	Ensayos acelerados para evaluación de la fiabilidad	65
4.2.1.	Ensayos acelerados en concentración fotovoltaica	66
4.2.2.	Modelos para evaluar la aceleración de los ensayos	72
4.3.	Plan de evaluación de la fiabilidad	75
4.4.	Conclusiones	77
5.	METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN	79
5.1.	Introducción	80
5.2.	Metodología	81
5.2.1.	Antecedentes e introducción	81
5.2.2.	Metodología de simulación de funcionamiento	83
5.2.3.	Metodología de evaluación de la potencia generada por la célula	86
5.2.4.	Comparación entre procedimientos de medida de curvas I-V, P_{max} y P relativa	89
5.3.	Desarrollo del circuito de ensayo de las células	93
5.3.1.	Diseño del circuito de ensayo	94
5.3.2.	Caracterización térmica de las células durante los ensayos	96
5.3.3.	Medida de la temperatura en la célula	97
5.3.4.	Simulación térmica para evaluar la temperatura en la célula	98
5.3.4.1.	Resultados térmicos	100
5.4.	Instrumentación	102
5.4.1.	Descripción del sistema	102
5.4.2.	Requisitos del sistema de instrumentación	107
5.4.3.	Consideraciones adicionales en las medidas de curvas I-V	111
5.5.	Conclusiones	113

6.	EVALUACIÓN DE DEGRADACIÓN Y FIABILIDAD DE CÉLULAS SOLARES	
	A PARTIR DE ENSAYOS.....	115
6.1.	Introducción.....	116
6.2.	Realización de ensayos	117
6.2.1.	Temporización de los ensayos.....	118
6.2.2.	Diagrama de flujo de medidas en los ensayos	120
6.2.3.	Cribado de células ensayadas	123
6.2.4.	Comparación de potencia y potencia relativa medida a diferentes temperaturas	124
6.3.	Resultados de los ensayos acelerados.....	125
6.3.1.	Resultados de pérdida relativa de potencia en los ensayos acelerados ..	126
6.3.2.	Energía de activación y <i>Factor de Aceleración</i> en función de la temperatura	130
6.3.3.	Influencia de la concentración en la evolución de la potencia relativa media	139
6.3.4.	Análisis del mecanismo de degradación.....	142
6.4.	Evaluación de la fiabilidad y la garantía	147
6.4.1.	Evaluación de la fiabilidad.....	147
6.4.2.	Evaluación del <i>MTTF</i>	151
6.4.3.	Análisis de la función fiabilidad a partir de la representación de Weibull .	152
6.4.4.	Evaluación de la garantía.....	156
6.5.	Resumen y conclusiones	158
7.	GENERALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS ACELERADOS	163
7.1.	Introducción.....	164
7.2.	Metodología y planificación de ensayos.....	167
7.3.	Instrumentación.....	168
7.4.	Análisis térmico del circuito de ensayo	170
7.4.1.	Potencia de las células.....	171
7.4.2.	Material del sustrato del circuito de ensayo	172
7.4.3.	Transferencia térmica al ambiente	174
7.4.4.	Alternativas de diseño del circuito de ensayos	176
7.4.5.	Resultado de las simulaciones.....	178
7.4.6.	Resumen de las simulaciones térmicas	186
7.5.	Conclusiones.....	189

PARTE III: RESUMEN Y CONCLUSIONES

8. RESUMEN, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS	191
8.1. Resumen de resultados y aportaciones de la Tesis	192
8.1.1. Análisis y planificación de ensayos acelerados en células solares de concentración	192
8.1.2. Metodología e instrumentación desarrollada	193
8.1.3. Análisis de los resultados y evaluación de la fiabilidad y garantía de células de concentración III-V.....	195
8.1.4. Generalización de los ensayos acelerados	198
8.2. Trabajos futuros	199
Anexo I. DESCRIPCIÓN DE LA CÉLULA SOLAR	203
REFERENCIAS	207
PUBLICACIONES	229

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Evolución cronológica de record de rendimiento de conversión de energía en células solares según tecnología. Tomado de [KK+11].	3
Figura 1.2: Esquemas de sistemas fotovoltaicos incluidos en Norma IEC 62108. (a) SFC a través de foco lineal. (b) SFC de disco con enfoque puntual. (c) SFC con heliostatos. (d) SFC con lentes Fresnel y foco lineal. Modificado de [IEC62108].	9
Figura 1.3: Esquema de concentrador fotovoltaico con enfoque puntual mediante lentes de fresnel IEC 62108. Tomado de [IEC62108].	10
Figura 1.4: Esquema de la óptica de reflexión total interna TIR (Total Internal Reflexion) [TMDP+00]. Este esquema fue el empleado en los ensayos de módulos de concentración en campo y tiempo real realizados en el IES-UPM [GVAN11].	11
Figura 1.5: (a) Célula desnuda del IES-UPM, área activa 1 mm ² . (b) Célula desnuda de triple unión III-V de 100 mm ² de área activa de la empresa Emcore, tomada de [Emcore]. Las fotos están a diferente escala.	12
Figura 1.6: (a) Montaje de la célula solar del IES-UPM (1 mm ²) con 4 hilos de conexión (wire bonding) (b) Montaje de célula solar de triple unión III-V (1 cm ²) con cintas de conexión (ribbon bonding) al circuito, sobre el que además se monta el diodo de paso. El circuito tiene el código comercial CCA 100 C1MJ Concentrator Cell Assembly, tomado de [Spectrolab]. Las fotos están a diferente escala.	12
Figura 1.7: Actividades de investigación en degradación y ensayos de fiabilidad en el IES-UPM previas a esta tesis.	18
Figura 2.1: Distribución de ponencias orales de I+D en la conferencia CPV-7, clasificadas por países y por origen de la contribución.	27
Figura 2.2: Matriz de fiabilidad del módulo de un SFC. Realizada por Emcore. Tomada de " <i>Failure Modes of CPV Modules and How to Test for Them</i> " [Emcore10]. La matriz está compuesta por modos y mecanismos de fallo. La cabecera de la tabla indica los elementos en los que se ha identificado fallo, y en la columna izquierda los tipos de ensayo que permiten identificar los modos o mecanismos de fallo.	41
Figura 3.1: Evolución de la tasa de fallos típica de los dispositivos semiconductores. Curva de bañera.	50
Figura 3.2: Gráficas de la función densidad, fiabilidad, y tasa instantánea de fallos de las funciones más comúnmente utilizadas para distribuciones continuas. Tomada de la Figura 5.3.1 del MIL-HDBK-338.	54

Figura 3.3: Diagrama de Weibull y extracción de los parámetros de la función. Tomado de la figura 8.3-2 del manual MIL-HDBK-338B [MHDBK98]. Con estos valores de η y β el cálculo de θ o <i>MTTF</i> es 694,5 horas.	60
Figura 3.4: Tasa de fallos obtenida mediante la función Weibull con dos parámetros, $\eta = 1,5 \cdot 10^9$ h, y cuatro valores de β , 0,5, 1, 3,5 y 7.	61
Figura 4.1. Factor de aceleración en tiempo con respecto una temperatura de operación de 60 °C, en función de la temperatura de ensayo acelerado (T), para tres valores de $E_A = 0,6$ eV, 1,0 eV y 1,4 eV.....	74
Figura 4.2: Plan de evaluación de fiabilidad. En la zona inferior Actividades de la Tesis (AT) para la evaluación cuantitativa de la fiabilidad de células de concentración III-V. En la zona superior y cursiva actividades previas a esta tesis.	75
Figura 5.1: Identificación en la célula solar del IES-UPM del área activa en gris oscuro, y área del bus conductor ó metalizada, en blanco. (Tonalidades modificadas).	84
Figura 5.2: Curvas en oscuridad e iluminación de una célula solar.....	87
Figura 5.3: Modelo para predecir la curva I-V en iluminación a partir de la curva en oscuridad, tomado de [SPAC+02a], [ASHK+03], [Anton04].	89
Figura 5.4: Comparación de las curvas I-V y de potencia de una célula típica medida con dos métodos. Curva I-V bajo simulador solar a 1 sol, y extrapolación de la curva en iluminación a partir de medida en oscuridad. Medidas en IES-UPM a 24,5°C.....	91
Figura 5.5: Detalle del diseño de la placa DBC con seis circuitos.....	95
Figura 5.6: Circuito de ensayos de vida acelerada con las células encapsuladas.	96
Figura 5.7: Estructura mecánica del circuito de ensayos. Definición en el software de simulación de elementos finitos.....	99
Figura 5.8: Simulación térmica de las células durante la emulación de condiciones de trabajo en el ensayo de vida acelerada 150 °C. Adaptado de [NVGJ+11].	100
Figura 5.9: Diagrama de bloques del sistema, adaptado de [NVGJ+11].	103
Figura 5.10: Esquema de la mitad de PCB conmutación: medida/generación de corriente. A la derecha circuito de ensayo durante la medida de la curva I-V en oscuridad, adaptado de [NVGJ+11].	105
Figura 5.11: Fotografía de los elementos del diagrama de bloques.....	106
Figura 5.12: Fotografía de la instrumentación desarrollada para ensayos acelerados, Tomado de [NVGJ+11].	107

Figura 5.13: Pantalla de control del ensayo, [NVGJ+11].	109
Figura 6.1: Diagrama de Gantt de los ensayos acelerados.	118
Figura 6.2: Células solares encapsuladas en un sustrato DBC (Direct Bonded Copper) cubiertos por silicona dentro de su caja de aluminio, en la cámara climática del ensayo.	120
Figura 6.3: Diagrama de flujo de las medidas realizadas en los ensayos. Diagrama para el ensayo a 130°C.	121
Figura 6.4: A la izquierda, potencia relativa de las células ensayadas respecto al periodo acumulado de inyección de corriente, tiempo de ensayo t_{test} . En la columna central condiciones del ensayo. A la derecha potencia relativa media (eje de <i>ordenadas</i> izquierdo) y desviación estándar de la potencia relativa (eje de <i>ordenadas</i> derecho) con respecto al tiempo de ensayo. En las figuras del lado izquierdo los ejes de tiempo están en diferente escala de tiempos.	127
Figura 6.5: Evolución de la potencia relativa media en función del tiempo de ensayo a 170°C, para las células sin inyección de corriente (0X). Exclusivamente para el ensayo 0X, t_{test} es el tiempo acumulado de la célula dentro de la cámara de ensayo.	130
Figura 6.6: Diagrama de vida-estrés de Arrhenius, para los tres ensayos acelerados a concentración 700X y 4 valores de potencia relativa.	133
Figura 6.7: Evolución de las potencias relativas medidas de los tres ensayos acelerados a 700X. En el eje de ordenadas el tiempo de ensayo a 130 °C.	134
Figura 6.8: Gráfico de evolución de la potencia relativa media de las células a 700X considerando tiempo de trabajo continuo ($t_{concentr_continua}$) sin periodo de reposo nocturno, en función de diferentes temperaturas de operación (T_{uso}).	136
Figura 6.9: Gráfico de evolución de la potencia relativa media de las células a 1050X considerando tiempo de trabajo continuo ($t_{concentr_continua}$) sin periodo de reposo nocturno, en función de diferentes temperaturas de operación (T_{uso}).	136
Figura 6.10: Evolución de la potencia relativa media de las células a 700X, en función de temperaturas de operación (T_{uso}), y considerando el ciclo real de trabajo (t_{work}), 8 horas concentración y 16 horas reposo-noche. Escala del eje de abscisas: a la izquierda tiempo de operación de todo el ensayo y a la derecha tiempo de operación de las primeras 500.000 horas (aproximadamente 57 años).	138

Figura 6.11: Evolución de la potencia relativa media de las células a 1050X, en función de temperaturas de operación (T_{uso}), y considerando el ciclo real de trabajo (t_{work}), 8 horas concentración y 16 horas reposo-noche. Escala del eje de abscisas: a la izquierda tiempo de operación de todo el ensayo y a la derecha tiempo de operación de las primeras 500.000 horas (aproximadamente 57 años).	138
Figura 6.12: Evolución de las potencias relativas medias de las células a 150°C y concentraciones 700X y 1050X, respecto al tiempo de ensayo (t_{test}).	140
Figura 6.13: Curvas I-V en oscuridad de 2 células durante ensayo a 150 °C y 700X(gráfica superior) y 1050X (intermedia) y evolución de potencia de ambas células (inferior). Las flechas con bola de las dos gráficas superiores indican la tensión a la que se mide la máxima potencia, y las de la gráfica inferior los instantes de tiempo donde se han representado las curvas I-V.	144
Figura 6.14: Medida de la curva I-V en oscuridad antes (círculos rellenos) y después (círculos vacíos) de la degradación durante el ensayo. El ajuste con el modelo distribuido 3D antes (línea discontinua) y después (línea continua), adaptado de [EAGN+10]......	145
Figura 6.15: A la izquierda fotografía de una célula monounión GaAs, y a la derecha se indican las diferentes zonas en que se ha dividido la célula en la aplicación del modelo de red 3D, tomado de [EAGN+10].	146
Figura 6.16: Evolución en tiempo de trabajo (t_{work}) de la potencia media relativa, y de la función densidad de la potencia relativa a 700X y a 65°C de temperatura de la célula. También se muestra el valor de la fiabilidad para cuatro instantes de t_{work} . Limite del Fallo (LF) del 2,5%.	149
Figura 6.17: Fiabilidad de las células a concentración 700X, a una temperatura de operación en concentración de 65 °C, y para varios valores de Límite de Fallo (LF).....	150
Figura 6.18: Fiabilidad de las células a concentración 1050X, a una temperatura de operación en concentración de 65 °C, y para varios valores de Límite de Fallo (LF).....	150
Figura 6.19: Representación de Weibull con las funciones $Q(t) = 1 - R(t)$ (Defiabilidad, probabilidad de fallo) obtenidas en el ensayo a 700X y temperatura 65°C, para las diferentes condiciones de Límite de Fallo indicadas en la gráfica.	154
Figura 6.20: Representación de Weibull con las funciones $Q(t) = 1 - R(t)$ (Defiabilidad, probabilidad de fallos) obtenidas en el ensayo a 1050X y temperatura 65°C, para las diferentes condiciones de Límite de Fallo indicadas en la gráfica.	155

Figura 7.1 : Diagrama de bloques del sistema propuesto.....	170
Figura 7.2: Estructura del modelo térmico en LISA® del sustrato IMS (Insulation Metal Substrated) sin disipador adicional de alúmina.....	173
Figura 7.3: Estructura del modelo térmico en LISA® del circuito individual sin disipador sobre sustrato IMS con célula de 100 mm ²	175
Figura 7.4 Diseño del circuito múltiple para el caso de células de 100 mm ² . Formado por circuitos individuales tomados de [Spectrolab].	177
Figura 7.5 Diseño del circuito individual y posición de la célula para el caso de la célula de 100 mm ² . Tomado de [Spectrolab]......	177
Figura 7.6: Incremento de temperatura en la células de 100 mm² , para los sustratos DBC (figura superior) e IMS (figura inferior) con diseños del circuito múltiple e individual, sin disipador y con disipador.	180
Figura 7.7: Vista general y corte transversal de la simulación de circuito IMS múltiple con disipador para células de 100 mm ² y concentración 750X.....	181
Figura 7.8: Vista general, corte transversal y perpendicular de la simulación de circuito DBC individual con disipador para células de 100 mm ² y concentración 750X.	182
Figura 7.9: Incremento de temperatura en la células de 30 mm² , para los sustratos DBC (figura superior) e IMS (figura inferior) con diseños del circuito múltiple e individual, sin disipador y con disipador.	183
Figura 7.10: Vista de la simulación de circuito IMS múltiple sin disipador con corte transversal para células de 30 mm ² y concentración 1000X.	184
Figura 7.11: Vista general con corte transversal de la simulación de circuito IMS múltiple sin disipador para células de 30 mm ² y concentración 250X.	185
Figura 7.12: Vista general y corte perpendicular a las células de la simulación de circuito DBC múltiple con disipador para células de 30 mm ² y concentración 1000X.	185
Figura 7.13: Vista general y corte perpendicular a la célula de la simulación de circuito DBC individual con disipador para células de 30 mm ² y concentración 1000X.	186
Figura A_I-1: Estructura típica de célula de GaAs. Tomado de [VNM+05]	204
Figura A_I-2: Fotografía de una célula del IES-UPM de 1 mm ²	205

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Clasificación de tipos de SFC en función de la concentración. Tabla adaptada de [Kur11].....	6
Tabla 1.2: Sobre fondo verde los términos utilizados por la Norma IEC 62108 en SFC [IEC62108]. En fondo blanco los elementos que no se consideran en la norma.....	7
Tabla 4.1: Comparativa entre los tipos de ensayo acelerados sobre células III-V y módulos de SFC.	69
Tabla 5.1: Características térmicas de los materiales del circuito de ensayo de las células.....	99
Tabla 5.2: Condiciones promedio de potencia en las células del ensayo a 150°C.	99
Tabla 5.3: Relación entre los incrementos medios de temperaturas medidas y simuladas de las diferentes células en el ensayo a 150°C.	101
Tabla 5.4: Parámetros de medida de la curva I-V en oscuridad.....	110
Tabla 5.5: Parámetros temporales de los ensayos.	111
Tabla 6.1: Temperatura de cada ensayo, duración total y número de células ensayadas a cada nivel emulado de concentración.....	119
Tabla 6.2: Valores de potencia relativa media final ($P(t=final)/P_0$), al acabar cada uno de los ensayos acelerados, con las células medidas a temperatura de ensayo y a 25 °C y en las condiciones de medida indicadas CI o SI . Cada subtabla está encabezada por el ensayo correspondiente, el número entre corchetes es la diferencia entre el resultado del ensayo final , y la medida en la condición de medida de la celda.....	125
Tabla 6.3: Pérdida de potencia relativa total de cada ensayo y duración del ensayo.	128
Tabla 6.4: Factor de Aceleración del instante de ensayo-degradación a 150°C respecto a diferentes temperaturas de uso.	135
Tabla 6.5: <i>MTTF</i> para células con temperatura de trabajo en concentración 65 °C, y operación en campo para varios Límite de Fallo (<i>LF</i>).....	152
Tabla 6.6: Valores de <i>MTTF</i> para distintas temperaturas de célula y las dos condiciones de concentración considerando un Límite de Fallo del 2,5%. En las condiciones indicadas, periodo de garantía, t_w , si asumimos económicamente un porcentaje limitado de fallos de la población, con valores entre 0,1 % y 10%.....	157

Tabla 7.1: Potencia que disipa la célula en condiciones de simulación de trabajo, y potencia por unidad de volumen “calor interno” (Internal Heat). Para dos tamaños de células y cuatro concentraciones	172
Tabla 7.2: Valores del modelo térmico del sustrato DBC (Direct Bonded Copper). ...	174
Tabla 7.3: Valores del modelo térmico del sustrato IMS (Insulation Metal Substrated).	174
Tabla 7.4: Incrementos de temperatura en la célula de 100 mm², con el diseño del circuito individual con disipador y los dos sustratos DBC e IMS.	181
Tabla 7.5: Incrementos de temperatura en la célula de 30 mm², con el diseño del circuito individual con disipador y los dos sustratos DBC e IMS.	185
Tabla 7.6: Opciones de utilización de cada tipo de circuito en ensayos acelerados para cada nivel de concentración y tipo de célula. Las simulaciones muestran el mismo comportamiento de los sustratos DBC e IMS. En la tabla el signo - significa que es una configuración no utilizable, + significa que si es utilizable.....	187
Tabla 7.7: Valores de $R_{th_{j-a}}$ para cada tipo de circuito en ensayos acelerados. Se considera el valor de $R_{th_{j-a}}$ medio de los dos tipos de sustrato y para los dos tamaños de célula.	188

GLOSARIO, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

ALT: Accelerated Life Test.

CDF: Cumulative Distribution Function.

CPV: Concentration Photovoltaic.

DBC: Direct Bonded Copper.

DNI: Direct Normal Irradiance W/m^2 .

EUITT-UPM: Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid.

FA: Factor de Aceleración en tiempo.

FEM: Finite Element Model.

GNI: Global Normal Irradiance W/m^2 .

HALT: Highly Accelerated Life Test.

HB-LED: High-Brightness Light Emitting Diode.

HCPV: Hig-Concentration Photovoltaic.

IEC: International Electrotechnical Commission – Comité Electrotécnico Internacional.

IEC 61215: “Crystalline silicon terrestrial PV modules. Design qualification and type approval”.

IEC 62108: “CPV modules and assemblies. Design qualification and type approval”.

IES: Instituto de Energía Solar.

IES-UPM: Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid

IMM: Inverter Metamorphic.

IMS: Insulated Metal Substrate.

INTA: Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.

ISFOC: Instituto Solar Fotovoltaico de Concentración.

LED: Light Emitting Diode.

LF: Límite de Fallo en % de pérdida de potencia respecto a la inicial.

MIL-HDBK-338B: Military handbook. Electronic reliability design handbook.

MTBF: Mean Time Between Failure - Tiempo Medio Entre Fallos.

MTTF: Mean Time To Failure - Tiempo Medio Hasta el Fallo.

NREL: National Renewable Energy Laboratory.

SFC: Sistema Fotovoltaico de Concentración.

UPM: Universidad Politécnica de Madrid.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Introducción

La idea básica de los Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (SFC - Concentration Photovoltaic CPV) consiste en concentrar la radiación solar que recibe la célula solar mediante lentes. Como la potencia eléctrica generada por la célula es proporcional a la irradiancia recibida esto permite que una misma célula genere una potencia mucho mayor, o visto desde otro punto de vista, se puede generar la misma potencia eléctrica con células más pequeñas. De esta forma se reemplaza el material semiconductor que es el elemento más caro del módulo por lentes más baratas con el consiguiente abaratamiento del coste energético generado por el sistema.

Los primeros desarrollos de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración modernos se realizaron al final de la década de los 70 por Sandia National Laboratories (EE.UU.) [BP78] con células solares de silicio, la radiación solar concentrada con lentes de fresnel y un seguidor solar en dos ejes. En 1980 se instaló en España el primer sistema fotovoltaico de concentración, el SFC Ramón Areces que fue el tercero de Europa y el primero con componentes íntegramente europeos. Este sistema, con una potencia de 1 kWp y una concentración de 40 soles, fue desarrollado e instalado en el Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid (IES-UPM) [SPARC+02a].

Desde estos prototipos hasta la actualidad han pasado más de treinta años y los sistemas fotovoltaicos de concentración con células de silicio ya llevan más de una década de explotación en sistemas comerciales (proyecto EUCLIDES 1998 [Antón04]). Además los SFC basados en células de semiconductores III-V llevan unos años instalados en campo, primero en plantas de ensayo (entre otros en el ISFOC - Instituto Solar Fotovoltaico de Concentración (Puertollano-España)) y luego en plantas comerciales de SFC.

Centrándonos en los Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (SFC) basados en semiconductores III-V existe un importante auge en los últimos años que se refleja en:

- Se está produciendo una importante mejora del rendimiento de las células solares III-V mediante el desarrollo de nuevas tecnologías de diseño y fabricación. Si nos fijamos en el progreso del rendimiento de células multiunión III-V cada varios meses se produce un nuevo record [PMAV11]

[GEHW11] [LKYA+10], Figura 1.1. A Julio de 2011 el record de rendimiento lo tiene una célula de 3 uniones de Solar Junction [Solar.J] (Abril 2011) con un 43,5% de rendimiento a 500 soles [Kur11] y el record anterior de solo seis meses antes era de una célula de Spire [Spire] con un 42,3% a 406 soles. Respecto a las células de doble unión III-V el record de rendimiento lo tiene el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM con una rendimiento del 32,6% en una célula de InGaP/GaAs a una concentración de 1026 soles [ARSGG+08], Figura 1.1.

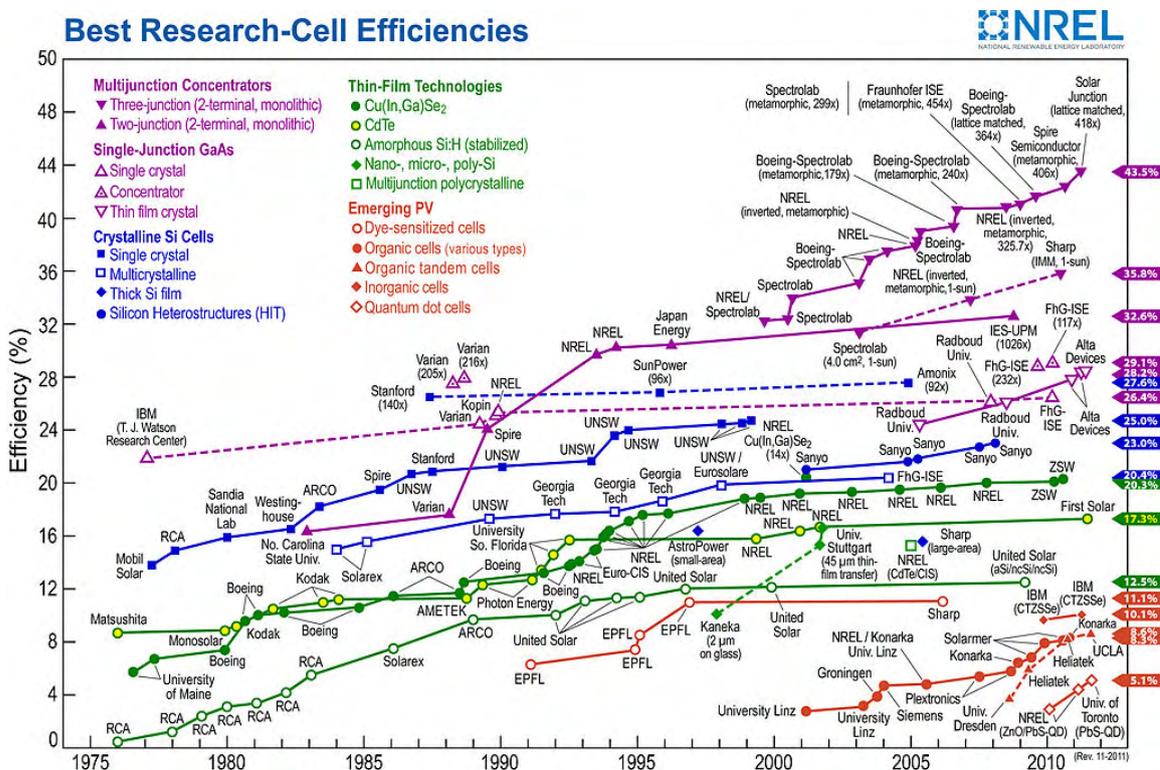


Figura 1.1: Evolución cronológica de record de rendimiento de conversión de energía en células solares según tecnología. Tomado de [KK+11].

- Las empresas y organismos de investigación han desarrollado una norma internacional de cualificación de módulos fotovoltaicos de concentración IEC 62108 (“CPV modules and assemblies. Design qualification and type approval”) [IEC62108], y esto ha acelerado la implantación de la tecnología. La norma define un nivel homogéneo de calidad en estos módulos que pretende ser equivalente al exigido en los módulos planos convencionales.

Asimismo se están desarrollando normas complementarias, incluida una específica de cualificación para células de concentración, en la que colabora el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM, al que pertenece el autor de esta memoria.

- El tamaño de las plantas instaladas con SFC de semiconductores III-V está aumentando de forma importante. Se ha pasado de la instalación de plantas de SFC de potencias de alrededor de 1 MW en 2010, a planificaciones de plantas de SFC de potencias mucho mayores, de decenas a centenares de MW para el año 2012 [Kur11].
- Multinacionales del sector industrial y energético están realizando compras de pequeñas empresas de SFC con destacados desarrollos, lo que refleja la cercanía de la explosión industrial y comercial. Como ejemplos de estas adquisiciones Saintec adquirió Concentrix (spin-off del Fraunhofer ISE), y Siemens ha adquirido un 16,1% de Semprius (spin-off de la Universidad de Illinois) por 20 millones de dólares. Semprius trabaja con la misma aproximación al sistema que el Grupo de Semiconductores III-V; muy altos niveles de concentración y células multiunión III-V de área pequeña aprovechando las tecnologías optoelectrónicas mucho más maduras, lo que se ha denominado “LED-like approach” [ARSGG06] con patente desarrollada en el IES-UPM [Algora02].
- Se está proponiendo la subvención de tarifas de SFC, al igual que ha ocurrido previamente con la energía eólica y solar convencional, con el fin de acelerar la curva de aprendizaje y el volumen de producción de estos sistemas, y de este modo reducir su costo hasta eliminar la subvención y hacerlos directamente competitivos con otros sistemas de generación de energía [PMAVB+10] [PAGMLB+10].

Este auge tecnológico y especialmente económico de los SFC se debe al inminente desarrollo comercial a gran escala de los SFC [Kur11], lo que hace necesario garantizar la calidad a largo plazo, es decir, una alta fiabilidad de todos los elementos del sistema, incluida la célula solar de concentración.

En cuanto a la investigación en células III-V hasta ahora el esfuerzo se ha centrado en la mejora del rendimiento y la reducción de costes como paso previo a

demostrar su ventaja tecnológica y económica sobre otro tipo de células (células de silicio) y sobre otros tipos de sistemas de generación de energía, ya sea renovable o convencional. Sin embargo, tras mejorar y demostrar las altas prestaciones de las células III-V es necesario dar un nuevo paso en el que se evalúe la degradación y fiabilidad de las células III-V con antelación a su industrialización y comercialización a gran escala, este es el principal objetivo de esta tesis.

Después de esta introducción, en el capítulo se realizará una revisión de los elementos que componen el Sistema Fotovoltaico de Concentración (SFC), dedicaremos una sección a tratar brevemente la fiabilidad dentro del área de la concentración fotovoltaica, y la relación que existe entre la fiabilidad y las normas de cualificación. Para finalizar el capítulo mostraremos la situación de investigación en degradación y fiabilidad de células III-V en el IES-UPM previa al comienzo de la tesis, y después defenderemos la motivación del trabajo, expondremos el objetivo de la tesis y la organización de la memoria.

1.2. Elementos del SFC

Para la clasificación de los Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (SFC), Tabla 1.1, nos basaremos en el documento [Kur11], "Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry" del NREL (National Renewable Energy Laboratory) que se actualiza anualmente desde 2008 y es una de las referencias en el sector fotovoltaico de concentración.

En la Tabla 1.1 se clasifican los SFC según el nivel de concentración y la tecnología de célula asociada a ese nivel de concentración, aunque no se incluye en la tabla un nivel de concentración superior denominado muy alta concentración o HCPV (High-Concentration Photovoltaic) con concentraciones en el orden de 1000 soles (1000X). Además existen excepciones como Amonix [Amonix], uno de los mayores fabricantes de SFC, que hasta hace poco trabajaba con células de silicio a niveles de concentración de 500X, y que ahora monta una parte de sus sistemas con células multiunión III-V, considerando que de esta forma el sistema es más rentable [KSBG10].

Los planteamientos de los ensayos acelerados y cálculos de la tesis se han realizado considerando la equivalencia de 1 sol con una irradiancia de 1000 W/m^2 . Esto supone que para una concentración de 1000X (1000 soles) la célula recibiría una potencia de 10^6 W/m^2 multiplicado por el área de la célula.

Tabla 1.1: Clasificación de tipos de SFC en función de la concentración. Tabla adaptada de [Kur11].

Tipos de Sistemas de Concentración Fotovoltaica	Relación de concentración típica	Tecnología de células solares
Alta concentración	> 400X	Células multiunión
Media concentración	~3X-100X	Células de silicio y de otros tipos
Baja concentración	<3X	Módulos de silicio

El trabajo de investigación de esta tesis se centra sobre el análisis de fiabilidad de células fabricadas con semiconductores III-V en el IES-UPM, en concreto células de GaAs de un área de 1 mm^2 que trabajan a muy alta concentración 1000X (HCPV). De esta forma la célula recibe 1 W de radiación solar en su área, lo que supuesto un rendimiento del 25%, implica que genera una potencia de 250 mW y los 750 mW restantes deben disiparse al ambiente a través de la célula. Se trabaja con una célula de GaAs y no con células multiunión para aprovechar la experiencia y resultados previos adquiridos por el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V en ensayos previos, tanto en ensayos de vida muy acelerada (HALT - Highly Accelerated Life Test) [Gon08][GVNA+09], como en ensayos con módulos en campo [GVAN11], que han sido realizados en este tipo de células. Sin embargo, en el capítulo 7 de la memoria se propone la generalización de los ensayos a células multiunión y de mayor tamaño.

Tras identificar que la evaluación de la fiabilidad de la célula III-V es el objetivo de la tesis doctoral, vamos a mostrar la definición de los diferentes elementos del SFC basándonos en la Norma IEC 62108 (*“CPV Modules and Assemblies. Design Qualification and Type Approval”*) [IEC62108], (Tabla 1.2).

Tabla 1.2: Sobre fondo verde los términos utilizados por la Norma IEC 62108 en SFC [IEC62108]. En fondo blanco los elementos que no se consideran en la norma.

Óptica primaria	Receptor de SFC	Módulo de SFC (Sistema Fotovoltaico de Concentración)- prefabricado y el punto de enfoque no se ajusta en campo, similar a los sistemas de lentes fresnel. Ensamblaje de SFC – necesita de alguna instalación y ajuste del punto de enfoque en campo, similar a sistemas de reflexión.	Conjunto de módulos o ensamblajes	Sistema	Planta
Óptica secundaria					
Células del SFC					
Medios para la transferencia de energía eléctrica					
Medio para la transferencia de energía térmica					
Interconexión					
Montaje					
Más módulos o ensamblajes					
		Acondicionador de potencia			
		Seguidor solar			
		Controlador del seguidor			
		Más sistemas			

Como se observa en la Tabla 1.2 se distinguen dos tipos de SFC según estén formados por módulos o por ensamblajes. La diferencia principal es que el módulo lleva lentes refractivas (habitualmente lentes fresnel), y el ensamblaje tiene lentes reflexivas (espejos) y además requiere de un ajuste en campo. Otras definiciones o comentarios importantes a la Norma IEC 62108 [IEC62108] son:

- La célula de concentración es el dispositivo fotovoltaico básico. Sin embargo la norma no evalúa específicamente al dispositivo, ya que en general lo emplea como sensor de la pérdida de potencia del módulo o ensamblaje durante los ensayos.
- La óptica puede tener funciones de concentración, filtrado del espectro, modificación de la distribución de la luz, o cambio de su dirección. La óptica primaria recibe luz sin concentrar directamente del sol mientras que la

óptica secundaria recibe luz concentrada o modificada de otro dispositivo óptico, que puede ser la óptica primaria u otra óptica secundaria.

- El receptor del concentrador es el conjunto de una o más células de concentración u óptica secundaria e incorpora los medios para la transferencia de la energía eléctrica y térmica.
- La cantidad de muestras a evaluar y el conjunto de ensayos para ser cualificados por la norma depende de si los sistemas son del tipo módulo o del tipo ensamblaje.
 - La secuencia de ensayos para los módulos tienen en cuenta tanto muestras de módulos como sus receptores, Figura 1.2 y Figura 1.3.
 - La secuencia de ensayo para el ensamblaje tienen en cuenta tanto muestras de espejos como de receptores, Figura 1.2

Como se ha explicado anteriormente existe una importante diversidad de tipos de SFC. En la Norma IEC 62108 se consideran explícitamente los cinco tipos más representativos de sistemas de concentración fotovoltaica. En la Figura 1.2 y Figura 1.3 se muestran los esquemas de cada sistema compuesto por la célula, el receptor y el módulo o ensamblaje.

De los diferentes sistemas de concentración que refleja la norma, esta tesis se centrará en el esquema de concentrador fotovoltaico con enfoque puntual mediante lentes fresnel, Figura 1.3, que es el sistema típico para el que se desarrollan las células de semiconductores III-V con alta o muy alta concentración, como las que ensayamos en esta tesis.

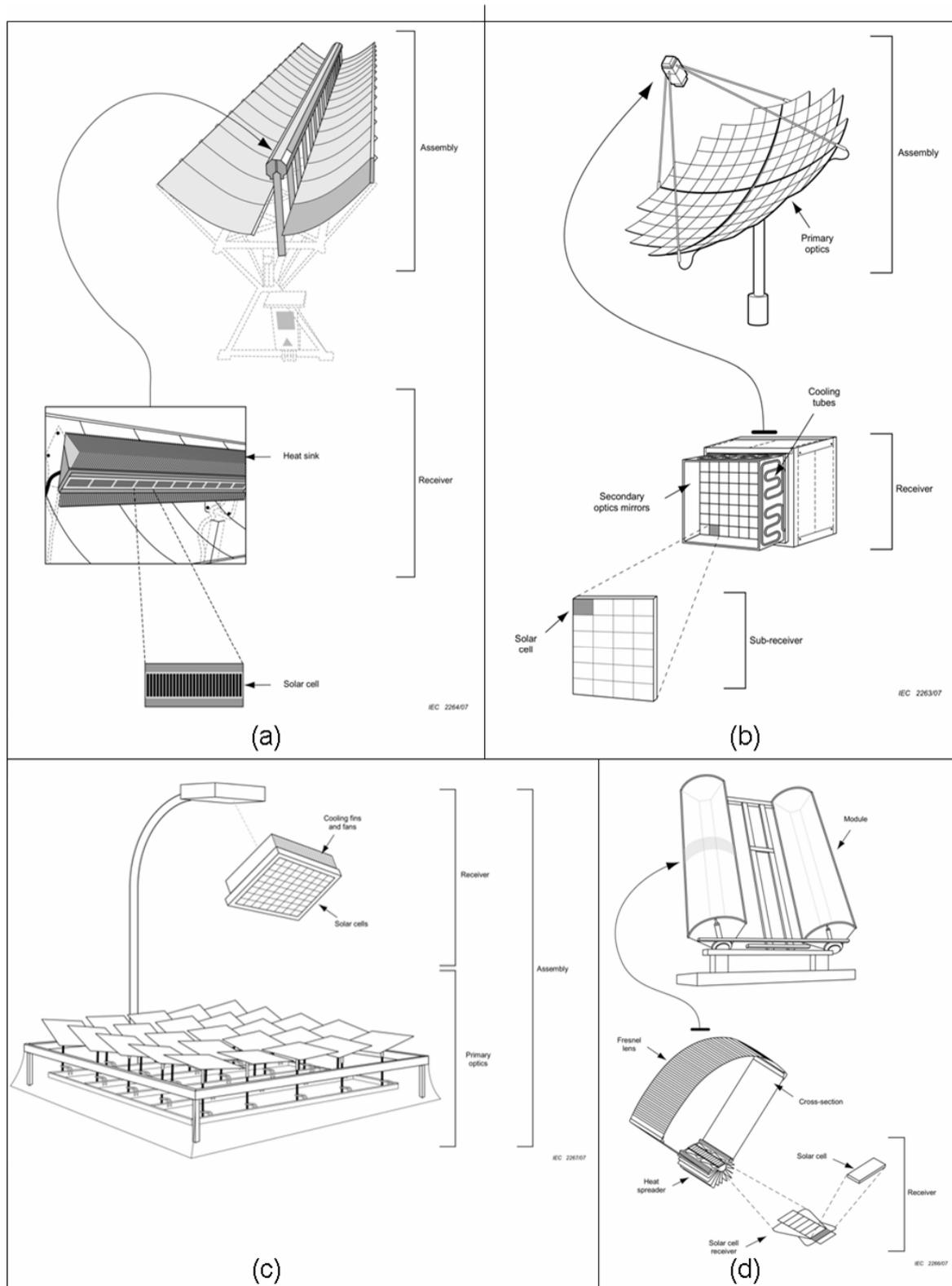


Figura 1.2: Esquemas de sistemas fotovoltaicos incluidos en Norma IEC 62108. (a) SFC a través de foco lineal. (b) SFC de disco con enfoque puntual. (c) SFC con heliostatos. (d) SFC con lentes Fresnel y foco lineal. Modificado de [IEC62108].

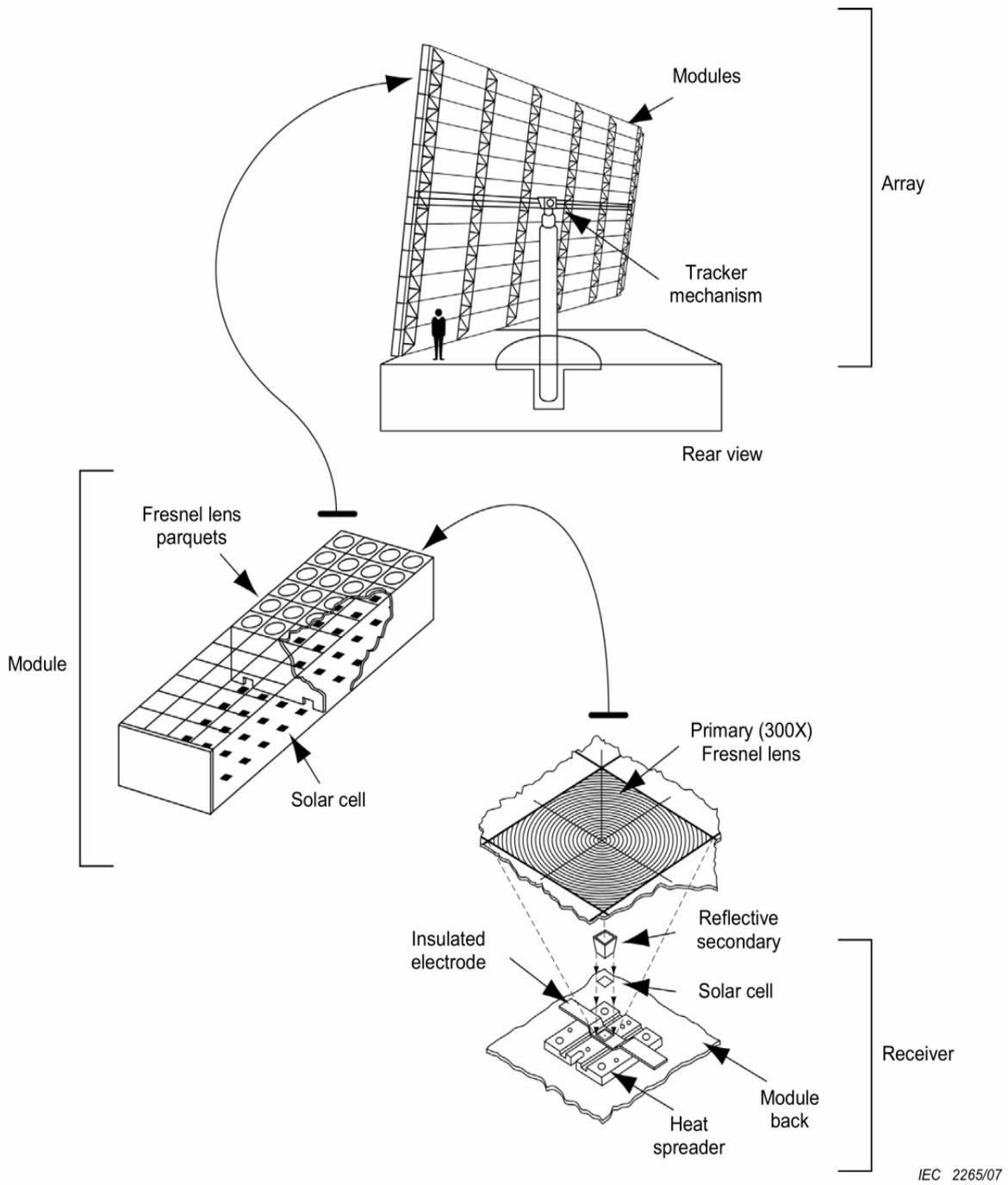


Figura 1.3: Esquema de concentrador fotovoltaico con enfoque puntual mediante lentes de fresnel, IEC 62108. Tomado de [IEC62108].

En la parte inferior derecha de la Figura 1.3 se muestran los elementos que componen un receptor del tipo “Concentrador fotovoltaico con enfoque puntual mediante lentes fresnel” [IEC62108], se indica una concentración 300X, pero el nivel de concentración puede ser mayor, siendo del orden de 1000X en las células de nuestro estudio. En la Figura 1.4 se muestra otra estructura alternativa de receptor del mismo tipo de concentrador, que también incluye dos lentes, la primaria y la secundaria, permitiendo mayor nivel de concentración con menor distancia de la lente primaria a la célula.

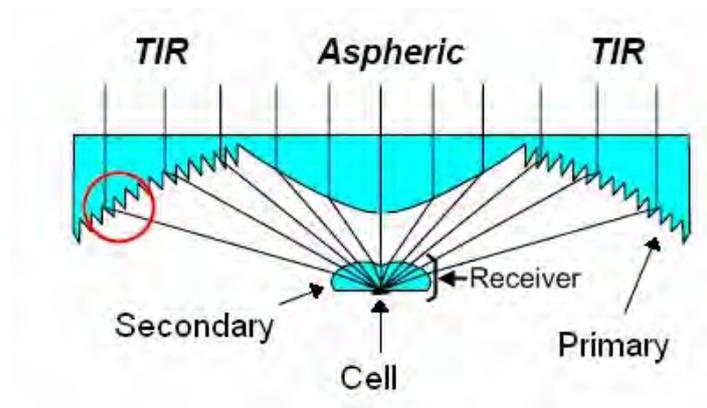


Figura 1.4: Esquema de la óptica de reflexión total interna TIR (Total Internal Reflexion) [TMDP+00]. Este esquema fue el empleado en los ensayos de módulos de concentración en campo y tiempo real realizados en el IES-UPM [GVAN11].

En cuanto al tamaño de la célula de los módulos de los SFC existen dos líneas tecnológicas claramente diferenciadas, definidas en principio por el área de la célula ,Figura 1.5, pero con implicaciones en el método de montaje y conexión de la célula sobre el circuito Figura 1.6, y sobre la concentración a la que pueden trabajar.

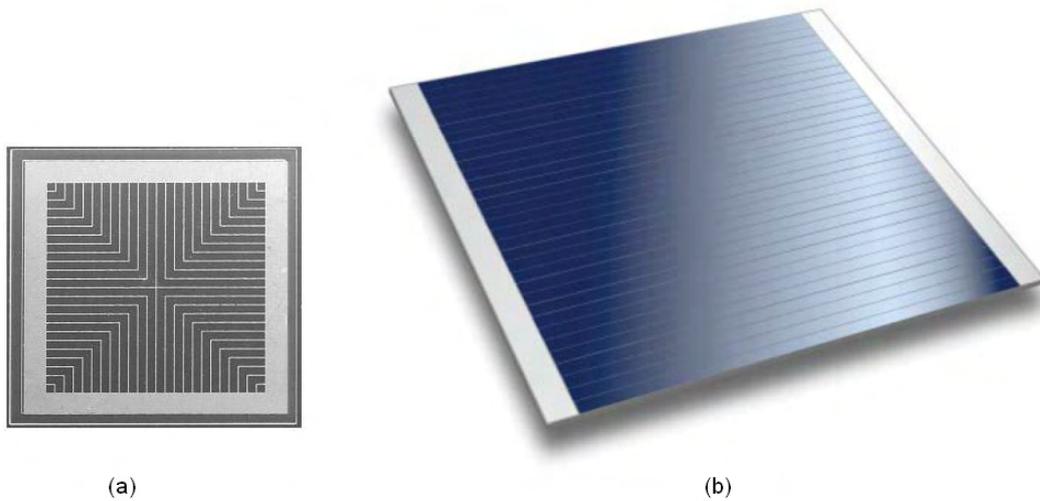


Figura 1.5: (a) Célula desnuda del IES-UPM, área activa 1 mm^2 . (b) Célula desnuda de triple unión III-V de 100 mm^2 de área activa de la empresa Emcore, tomada de [Emcore]. Las fotos están a diferente escala.

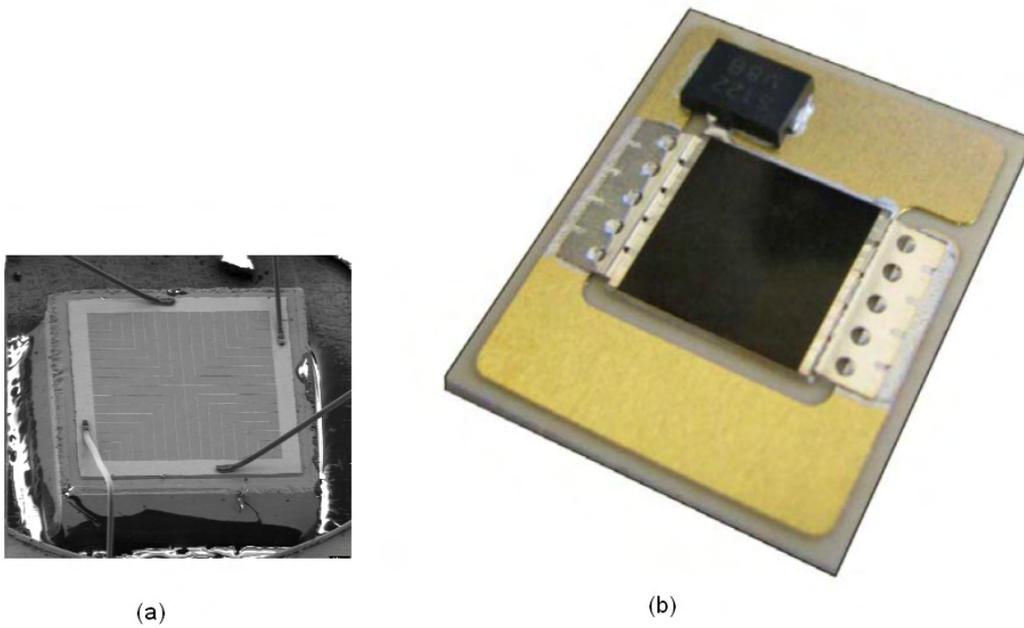


Figura 1.6: (a) Montaje de la célula solar del IES-UPM (1 mm^2) con 4 hilos de conexión (wire bonding) (b) Montaje de célula solar de triple unión III-V (1 cm^2) con cintas de conexión (ribbon bonding) al circuito, sobre el que además se monta el diodo de paso. El circuito tiene el código comercial CCA 100 C1MJ Concentrator Cell Assembly, tomado de [Spectrolab]. Las fotos están a diferente escala.

Las principales características de las dos líneas tecnológicas diferenciadas por el tamaño empleado en la célula de concentración para aplicaciones terrestres, son:

- La línea “*LED-like approach*” [ARSGG06]) patentada por el IES-UPM [Algora02], con células de área pequeña, en el orden de 1 mm^2 , Figura 1.5-a y Figura 1.6-a. Esta línea es la empleada por Semprius e Isofotón a nivel comercial y el IES e Ioffe (Rusia) como centros de investigación más representativos. El menor tamaño de la célula permite trabajar a muy altos niveles de concentración, HCPV, del orden de 1000 soles. Por ejemplo, Semprius ha desarrollado módulos fotovoltaicos a una concentración de 1000 soles, con células III-V de doble unión y un área activa de $0.6 \text{ mm} \times 0.6 \text{ mm}$.
- La línea encabezada por los fabricantes de células multiunión III-V para el espacio; Emcore, Spectrolab, y Azur entre otros, que comercializan las células con áreas más grandes, entre 30 mm^2 y 100 mm^2 . Se comercializan tanto la célula desnuda Figura 1.5-b, como montada sobre un circuito con sustrato de alta disipación térmica Figura 1.6-b. La mayor área de la célula supone una mayor potencia lumínica sobre la célula, esto define el diseño del disipador del receptor y puede limitar el rango máximo de concentración solar para no producir un aumento de temperatura excesivo en la célula, lo que afectaría a sus prestaciones de rendimiento y fiabilidad. El nivel de concentración de este tipo de células depende del tamaño de la célula y está entre aproximadamente 700X para las células mencionadas más pequeñas y 200X para las células grandes.

1.3. Fiabilidad y concentración solar

La investigación de la fiabilidad de las células III-V de los SFC ha sido parcialmente postergada hasta que la tecnología ha avanzado lo suficiente como para verse competitiva con otras fuentes de generación de energía. Sin embargo el alto coste de inversión inicial de los sistemas fotovoltaicos exige además de un elevado rendimiento, una larga durabilidad de los sistemas con el objetivo de rentabilizar el sistema. En este sentido, los módulos fotovoltaicos convencionales de silicio con

estructura fija, parten con una clara ventaja, ya que cuentan con una fiabilidad elevada contrastada.

Existe un amplio acuerdo [AUEH+05][Fried07][KGQ09], en que los niveles de fiabilidad y garantía, que actualmente se ofrecen de 25 a 30 años en módulos convencionales con células de silicio [WCNM05], no permiten suponer directamente que los SFC tendrán el mismo comportamiento en fiabilidad, básicamente porque los SFC tienen más elementos, dichos elementos son más complejos, y no existe una experiencia acumulada equiparable al caso de los sistemas fotovoltaicos convencionales de silicio, tanto en instalaciones a largo plazo en campo [WCNM05][OM09] como en ensayos acelerados [TTMQ+07][Wohl99].

Un problema para realizar la evaluación de la fiabilidad de los SFC, es que engloban diversas tecnologías a todos los niveles; material de la célula solar, tamaño de célula, receptor, óptica y seguidor solar, que compiten por el mismo mercado. Esta diversidad de tecnologías es una consecuencia de la constante evolución de la tecnología en cada uno de los elementos del SFC, ya que todavía no hay unas soluciones universalmente aceptadas por fabricantes y grupos de investigación.

Para demostrar la alta fiabilidad de los SFC es necesario primero demostrar que el elemento central y uno de los más innovadores, la célula solar, tiene muy pocos fallos y una baja degradación durante el periodo de garantía del sistema, es decir alta fiabilidad, y después hay que evaluar el resto de elementos del módulo fotovoltaico. La fiabilidad de algunos de estos elementos es de evaluación más directa por estar probados en otros productos, y la de otros elementos requerirá ensayos específicos y novedosos.

La repercusión económica de un adecuado análisis de fiabilidad previo a la industrialización se refleja en conseguir mantener la confianza en las nuevas generaciones de SFC, y poder reducir y calcular a priori el coste de mantenimiento de la instalación, y el de las reparaciones y devoluciones cubiertas en la garantía.

Como se explicará a lo largo de la memoria, la evaluación de la fiabilidad de las células solares de concentración III-V supone plantear nuevas metodologías de ensayos acelerados y demostrar su operatividad, cuantificando la fiabilidad de células de concentración III-V en las condiciones más similares posibles a las de funcionamiento real. Una vez cuantificada la fiabilidad se evidencia sí pueden ofertar los

periodos de garantía especificados, y se detectan las debilidades que deben ser corregidas en el diseño de las células y sus receptores.

Esta tesis pretende evaluar la fiabilidad de las células solares de concentración III-V durante toda su vida en campo, mediante ensayos acelerados. Los resultados de la tesis pretenden contribuir a que la tecnología de los SFC sea competitiva en fiabilidad con los sistemas fotovoltaicos ya implantados y otros sistemas de generación de energía. Además, el conocimiento generado a lo largo de la tesis pretende conseguir que el IES-UPM sea reconocido como una referencia en el área de la fiabilidad de células III-V.

1.3.1. Relación entre normas de cualificación y fiabilidad

La Norma IEC 62108 (*“CPV modules and assemblies. Design qualification and type approval”*) [IEC62108] se desarrolló para homogeneizar y mejorar la calidad de los módulos y ensamblajes de los SFC. Esto supuso directamente una importante ayuda a la comercialización de los SFC basándose en la experiencia de la Norma IEC 61215 (*“Crystalline silicon terrestrial PV modules. Design qualification and type approval”*) [IEC61215] de cualificación de módulos convencionales que supuso un garante de la calidad de los módulos a largo plazo. El Grupo de Investigación de Integración de Sistemas e Instrumentos del IES-UPM ha sido uno de los principales artífices de la Norma IEC 62108 [GA06].

La tecnología de módulos y ensamblajes de los SFC que superen la serie de ensayos de la norma de cualificación IEC 62108 tendrán una calidad inicial adecuada (cuyo “nivel mínimo” define la norma), y esta calidad se prolongará en el tiempo, ya que la mayor parte de la norma la componen ensayos acelerados en diferentes condiciones ambientales y de estrés.

Sin embargo, la cualificación no certifica el periodo en el que el módulo mantiene una calidad adecuada, ni la proporción de fallos durante su garantía. Para obtener esta información hay que realizar análisis de fiabilidad, mediante ensayos acelerados específicos mucho más prolongados en tiempo y con más elementos, con el fin de realizar los ensayos hasta que fallen un número significativo de elementos, que permitan una adecuada evaluación del ensayo. Por tanto, la certificación de calidad que tiene un producto que ha superado una norma de cualificación (IEC 62108), es diferente

a la evaluación de la fiabilidad. La certificación demuestra una calidad aceptable (según la norma) y la evaluación de la fiabilidad estima cual será la probabilidad de funcionamiento y la de fallo durante todo el periodo de trabajo en campo, y para unas determinadas condiciones de trabajo.

Como se puede concluir de los párrafos anteriores la cualificación y la fiabilidad tienen objetivos diferentes, pero están relacionadas, un producto con alta fiabilidad a largo plazo (su periodo de garantía o más) debe pasar sin problemas una norma de cualificación. Mientras que los ensayos acelerados empleados en las normas de cualificación están definidos para tener un coste y duración asequible, en los que se cualifica a los módulos para perdurar con un nivel de calidad aceptable durante un periodo significativo, los objetivos de los “*ensayos acelerados de fiabilidad*”, son mucho más amplios y más caros, ya que además de cuantificar la ley de vida del módulo en condiciones nominales de trabajo, también permite analizar mecanismos de fallo concretos para realizar un rediseño que los mitigue o elimine.

Así como existen pocas publicaciones a lo largo de los últimos años de fiabilidad y ensayos acelerados en células solares de concentración III-V para aplicaciones terrestres, la publicación y aplicación de la Norma IEC 62108 ha supuesto un relanzamiento de la investigación de la fiabilidad en el área de los SFC [RMCP+08][Botten08] [MGFL+09][HTCW+09][BSSK10]. En estos trabajos que serán tratados en el capítulo 2 del estado del arte se obtienen conclusiones importantes sobre la calidad y los modos de fallos más frecuentes de los módulos, ensamblajes, receptores y células solares. La Norma IEC 62108 ha cubierto el vacío existente en la cualificación de SFC, a nivel de módulo o ensamblaje, pero es necesaria la realización de normas adicionales para la célula, y el seguidor entre otros [MVNH+10].

En lo que respecta a la necesidad de una norma de caracterización y cualificación de células de concentración, el grupo de trabajo del IEC TAB 82 WG7, que ya elaboró la IEC 62108, ha comenzado a desarrollar trabajos para especificar la caracterización y cualificar las células de concentración. El Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM al que pertenezco, forma parte de este grupo de trabajo en el que aportaremos nuestra experiencia en células y ensayos acelerados.

Como conclusión, la certificación de calidad que tienen los módulos de un fabricante que ha superado la norma de cualificación IEC 62108, es diferente a evaluar

o garantizar una calidad aceptable durante la vida esperada del producto (25 o 30 años), ya que el proceso de cualificación no evalúa la fiabilidad del módulo, es decir, la probabilidad de fallos durante toda su vida en condiciones nominales de trabajo.

1.4. Investigación previa en el IES-UPM

En esta sección vamos a tratar de forma resumida las actividades previas a la tesis, realizadas por el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM en el área de la degradación y fiabilidad de células III-V. Esto permitirá encuadrar en qué estado se encontraba la investigación cuando comenzó esta tesis, en el capítulo 2 que se dedica al estado del arte de investigación en fiabilidad se incluirán en detalle los resultados de estos trabajos.

Gran parte del estado del arte publicado sobre degradación y fiabilidad de células de concentración III-V para aplicaciones terrestres hasta el año 2007 eran contribuciones del Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM, ya que fue un precursor en la investigación de la degradación [Rey-S01], y fiabilidad [GVNA+09] [GVAN11] para este tipo de células solares cuando el interés industrial-comercial de la tecnología no había explotado.

Para explicar la situación de la investigación en el IES-UPM previa a la realización de la tesis nos basamos en la planificación realizada con el objetivo de certificar la fiabilidad de las células de concentración III-V en aplicaciones terrestres [GARSVN+06], a la que se han incorporado los trabajos previos más relevantes realizados en el área de la degradación y fiabilidad, Figura 1.7:

- La Actividad 1, refleja los ensayos de degradación de células III-V planteados a una concentración de 1100 soles [Rey-S01] que fueron pioneros y precursores de nuevos métodos de experimentación en esta área, obteniendo resultados cualitativos importantes [RSA01][RSA03].
- La Actividad 2, enlaza los resultados obtenidos en los ensayos de la actividad A1 relacionándolos con resultados previos obtenidos en tecnologías optoelectrónicas más maduras [GRSA04]. Además se realizan ensayos adicionales a células III-V [GRSA05].



Figura 1.7: Actividades de investigación en degradación y ensayos de fiabilidad en el IES-UPM previas a esta tesis.

- A partir de la actividad 3 (A3) se desarrolló un análisis teórico más una planificación de los procedimientos adecuados para realizar una certificación de la fiabilidad de las células solares de concentración III-V para aplicaciones terrestres, considerándolas un nuevo dispositivo sin historial previo [AVNM05]. El objetivo de esta planificación [GARSVN+06], no era cuantificar la fiabilidad, es decir la probabilidad de funcionamiento de las células durante toda su vida, sino analizar y demostrar (certificar) si eran suficientemente robustas para su uso comercial, es decir para superar un periodo de garantía similar al de los módulos convencionales, 25 años. La respuesta a esta cuestión no era evidente, ya que hasta entonces los trabajos de investigación en esta área se centraban en la degradación más que en la fiabilidad de células solares, y eran meramente cualitativos; bajo un determinado estrés comparaban que tecnología de célula era más robusta, pero no se planteaban analizar su evolución a largo plazo.
- La Actividad 4, se desarrolló como trabajo complementario de investigación en fiabilidad y planteamiento de futuros ensayos acelerados sobre células

III-V. En [VARSG07] se realiza una predicción de fiabilidad y análisis de parámetros relevantes para ensayos acelerados, basándose en dispositivos optoelectrónicos similares, la mejor referencia a este respecto son los HB-LEDs (High-Brightness LEDs) de AlGaInP. Se identifican la temperatura y densidad de corriente como los parámetros que previsiblemente tendrán más influencia en la fiabilidad de las células de concentración III-V.

Las siguientes actividades A5 y A6 han sido las precursoras de esta tesis. Se amplía la información en el capítulo 2, pero para valorar detalladamente los resultados hay que acudir a las fuentes; la tesis [Gon08], y los artículos [GVNA+09] [GVAN11].

- En la Actividad 5 de ensayos de vida muy acelerados (HALT - Highly Accelerated Life Test) escalonados en temperatura, “temperatura step-stress” [Gon08] [GVNA+09], hay que considerar que fueron los primeros ensayos muy acelerados mediante estrés escalonado en temperatura, realizados a células de concentración III-V mediante emulación de las condiciones de trabajo con inyección de corriente en directa. Esto supuso un complejo y prolongado proceso de diseño, preparación y puesta a punto del ensayo [GARSV+07]. Se identificó la mejor tecnología de capa ventana de entre dos probadas sobre células de alta concentración de GaAs y área pequeña, y se observó que sólo se produjeron fallos por degradación de la potencia generada por la célula, identificándose el mecanismo de degradación que produjo los fallos, y un rango de posibles Energías de Activación y por tanto Factores de Aceleración de este mecanismo.
- En la Actividad 6 [Gon08][GAVN+08][GVAN09] se evalúa la degradación y fiabilidad de un módulo de concentración sobre un seguidor instalado en la azotea del IES-UPM. En el módulo se manipularon los receptores para tener acceso eléctrico individual a las células de concentración III-V de GaAs y área pequeña empleadas. En este ensayo se midió el comportamiento de cada célula, de la óptica y el módulo durante el funcionamiento real [GVAN11].

En el conjunto de pruebas, y ensayos acelerados a células solares de concentración III-V en el IES-UPM previos a esta tesis se ofrecieron tanto resultados cualitativos como cuantitativos de la degradación de las células durante los ensayos

acelerados, y además estimaciones de la fiabilidad de células III-V sin encapsular extrapolada a condiciones nominales de trabajo, en función de un amplio rango identificado de Energías de Activación para el mecanismo de fallo de las células [GVNA+09].

En esta tesis se intenta dar un paso más, que es identificar la degradación, fiabilidad y garantía de las células en condiciones nominales de trabajo a partir de los resultados de los ensayos acelerados, para ello es necesario contrastar un modelo matemático que relacione el tiempo de ensayo acelerado con el tiempo equivalente en condiciones nominales de trabajo en campo. A partir de la función fiabilidad se puede evaluar el coste de la garantía, el mantenimiento y otros parámetros de relevancia económica.

1.5. Motivación de la tesis

El Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM ha sido pionero en la realización de ensayos para evaluar la degradación y fiabilidad de células de concentración III-V. Este interés precoz, ha sido muy fructífero a nivel de aportación al estado del arte en esta área, como se demuestra en las publicaciones y en la colaboración con otros actores de investigación y desarrollo de SFC.

La principal motivación de esta tesis es la original cuando se empezaron los trabajos de degradación de células de concentración III-V, la necesidad del sector industrial de SFC de **obtener en un periodo de tiempo adecuado información de la degradación y la fiabilidad de la célula de concentración III-V durante todo su periodo de vida en condiciones reales de funcionamiento. Para ello es necesario realizar ensayos de vida acelerada en temperatura**, lo que nos permite reproducir la vida de la célula (30 años) mediante ensayos de una duración de semanas.

De los ensayos de vida acelerada sobre células se pueden obtener resultados de tiempos de fallo y de degradación de potencia generada durante el ensayo, y a partir de estos resultados se debe realizar la extrapolación a condiciones normales de funcionamiento. Si se consigue verificar que existe un factor de aceleración entre el ensayo acelerado y las condiciones normales de funcionamiento, es posible realizar un análisis de fiabilidad en condiciones nominales para obtener la máxima información posible. De esta forma se caracteriza la función fiabilidad $R(t)$, es decir, la probabilidad

de funcionamiento en cada instante de su vida, y otras funciones de fiabilidad de la célula relevantes en el área industrial y comercial como el coste de la garantía o de mantenimiento.

1.6. Objetivos de la tesis

El principal objetivo de esta tesis es rellenar el vacío existente en la caracterización de la degradación y la fiabilidad de las células solares III-V de concentración en condiciones nominales de funcionamiento, mediante ensayos acelerados.

Para conseguir este objetivo principal ha sido necesario proponer nuevas metodologías de ensayos acelerados, desarrollar una instrumentación específica para este propósito, realizar ensayos acelerados adecuados para obtener los resultados buscados, y a partir de los datos de degradación de las células en los ensayos y mediante modelos estadísticos, evaluar la fiabilidad en tiempo real y condiciones de trabajo en campo.

La metodología e instrumentación que se han desarrollado en esta tesis han sido aplicadas a células solares de concentración III-V desarrolladas en el IES-UPM (la descripción detallada se refleja en el Anexo I), de tecnología GaAs, área activa de 1 mm² y concentración 1000X. La experiencia conseguida en los ensayos en este tipo de células se podrá extrapolar a otro tipo de células de mayor tamaño y diferente estructura semiconductoras como se mostrará en el capítulo 7 de la memoria, no así los resultados cuantificados de fiabilidad y garantía en condiciones nominales de trabajo, ya que células con diferente proceso de fabricación o diferentes materiales tendrán otros mecanismos de degradación o fallo diferentes.

Por lo tanto, para la consecución de nuestro objetivo principal ha sido necesario cumplir los siguientes objetivos secundarios, que de forma secuencial son los siguientes:

- **Objetivo 1. Desarrollo de nueva metodología de ensayos acelerados.** Análisis y desarrollo de una metodología para estimar la degradación y fiabilidad durante toda la vida de las células en campo, mediante la realización de ensayos acelerados.

- **Objetivo 2. Desarrollo de la instrumentación para implementar la metodología de ensayos acelerados.** Desarrollo del diseño del sistema de instrumentación y caracterización de los procedimientos de medida empleados sobre las células, para permitir aplicar de forma adecuada la metodología de ensayos acelerados.
- **Objetivo 3. Obtención de los resultados cuantitativos de degradación de potencia generada y fiabilidad de las células en condiciones nominales de trabajo en campo.** Desarrollo de los ensayos acelerados, análisis de los resultados, evaluación de degradación y fiabilidad en tiempo de ensayo acelerado, y extrapolación a tiempo real y condiciones nominales de trabajo de la célula.
- **Objetivo 4. Generalización de los ensayos acelerados a otras tecnologías.** En base a la experiencia de los ensayos de células III-V y área pequeña del IES-UPM, se van a plantear análisis térmicos, y modificaciones en el sistema instrumentación y de la metodología aplicada para generalizarla a células III-V de área grande. El objetivo es que el nuevo desarrollo de ensayos acelerados permita obtener toda la información de fiabilidad obtenida en esta tesis en otro tipo de células comerciales.

1.7. Organización de la memoria

La presente Memoria muestra y explica el trabajo realizado para cumplir los objetivos planteados.

La Memoria se ha organizado de la siguiente forma. Tras la introducción a la tesis, ésta se divide en tres partes diferenciadas, la primera parte **teórica** incluye el capítulo 2 de “Estado del arte” y el capítulo 3 de “Teoría de la fiabilidad”, la segunda parte **experimental** incluye el resto de capítulos, del 4 al 7, la tercera parte es el **resumen y aportaciones** de la tesis, incluidos en el capítulo 8.

Describiendo brevemente los capítulos:

En el **Capítulo 1**, se introduce y justifica el trabajo de investigación de la tesis. Presentamos los elementos de un SFC, y planteamos diversas cuestiones sobre las normas de cualificación y la fiabilidad en SFC. Analizamos la investigación en el IES-

UPM previa a esta tesis en el área de la evaluación de la degradación y fiabilidad de células solares III-V, y por último mostramos la motivación y los objetivos de la tesis.

PARTE I: TEÓRICA

En el **Capítulo 2**, presentamos una revisión del estado del arte en el análisis de degradación de energía generada y fiabilidad en SFC y células de concentración III-V.

En el **Capítulo 3**, se realiza una breve síntesis de las definiciones y funciones empleadas en fiabilidad, centrándonos en la base teórica y en las funciones estadísticas de fiabilidad que se utilizarán al analizar los ensayos acelerados.

PARTE II: EXPERIMENTAL

En el **Capítulo 4**, se analizan los tipos de ensayos acelerados que se emplean en el área de investigación fotovoltaica de concentración, y aquellos que aún no han sido empleados en esta área. Como es el caso de los ensayos de vida acelerada (ALT – Accelerated Life Tests) en temperatura, que ha sido el tipo de ensayo elegido para ensayar las células III-V en esta tesis, con el objetivo de obtener la estimación de la degradación y la fiabilidad de células en condiciones reales de funcionamiento a partir de ensayos acelerados. Por último y basado en el análisis y conclusiones obtenidas, se expondrá el planteamiento del trabajo experimental contenido en la tesis para llegar a nuestro objetivo.

En el **Capítulo 5**, presentamos la metodología de medida y simulación de condiciones de trabajo, y la instrumentación desarrollada para la tesis. Se realiza un análisis crítico de la metodología, incluyendo el rango de incertidumbre de las medidas para caracterizar las células. Se muestra el diseño, análisis térmico y medidas térmicas del circuito de ensayos de las células solares, y posteriormente el sistema de instrumentación con el diagrama de bloques y la evaluación de los parámetros del sistema de instrumentación.

En el **Capítulo 6**, que es el núcleo de la tesis, se exponen los aspectos más importantes de la realización de los ensayos de vida acelerada (ALT) en temperatura, la obtención de resultados de caracterización de células durante los ensayos acelerados, el análisis de fallos, y evaluación de la degradación de potencia generada, fiabilidad y garantía de las células extrapoladas a condiciones nominales de trabajo en tiempo real.

Es el capítulo más amplio y donde se obtienen resultados cuantitativos de relevancia económica en la garantía de las células III-V para concentración terrestre.

En el **Capítulo 7**, se aborda la generalización de la metodología de ensayos acelerados, instrumentación y análisis de fiabilidad a células multiunión III-V de área grande. De los distintos aspectos a plantear, nos centramos en la caracterización térmica para las alternativas de circuito de ensayo acelerado para las células III-V de área grande.

PARTE III: RESUMEN Y APORTACIONES

En el **Capítulo 8**, exponemos el resumen y aportaciones de la tesis, y las líneas de trabajo a emprender en el futuro.

Por último se incluye un anexo con la tecnología de la célula ensayada, la sección de referencias, y las publicaciones del autor de la memoria.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE EN FIABILIDAD DE SFC Y CÉLULAS III-V

2.1. Introducción

En este capítulo vamos a abordar el estado del arte en los aspectos relacionados con la calidad, degradación de generación de energía y fiabilidad de los módulos de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (SFC) y las células de concentración III-V para aplicaciones terrestres.

Hay diversas revisiones que muestran la situación a nivel de tecnología, costes, empresas e instituciones punteras en investigación de SFC y células III-V [Swans00][SPAC+02a] [LS07] [LH10]. Pero si profundizamos en la búsqueda de publicaciones en degradación y fiabilidad de SFC y células III-V para aplicaciones terrestres se observa un número escaso de trabajos.

Hay que considerar tres etapas temporales claramente diferenciadas en cantidad, calidad y orientación de las contribuciones a la investigación en materias relacionadas con la fiabilidad de SFC con células III-V, estos periodos son:

1. Hasta 2007 cuando se publicó la Norma IEC 62108 [IEC62108], los trabajos en degradación y fiabilidad de SFC y de células eran escasos, y dirigidos por centros públicos de investigación. Una excepción en esta primera etapa deben considerarse los trabajos realizados en Japón por varias universidades junto con la empresa Daido Steel, fabricante de módulos de concentración con lentes fresnel, los autores plantean el control de calidad y la fiabilidad como objetivo final de sus trabajos [YTA+04] [AKUK+04] [AUEH+05] [Aa05].
2. A partir de la publicación de la Norma IEC 62108 en 2007 y con vistas a un crecimiento del mercado, la industria empezó a publicar algunos trabajos de ensayos en campo o laboratorio relacionados fundamentalmente con la norma. En esta fase es muy importante la creación y desarrollo del Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración (ISFOC) que es una plataforma para ensayar en campo los desarrollos de los principales fabricantes de SFC. En paralelo el National Renewable Energy Laboratory (NREL) empieza a aportar un mayor esfuerzo en la investigación de la fiabilidad de los módulos de concentración, las células III-V y su incidencia en la aplicación de la norma.

3. A partir de 2010, cuando se empieza a consolidar la industria de SFC con células III-V de concentración, y con vistas a un próximo futuro con crecimientos muy importantes aumentan los trabajos en ensayos de calidad y en fiabilidad tanto de la industria como de organismos de investigación públicos. El NREL financia e impulsa un congreso específico sobre fiabilidad (Photovoltaic Module Reliability Workshop) que se ha celebrado en el año 2010 [PVMRW10] y en 2011 [PVMRW11], donde se han creado sesiones de trabajo sobre fiabilidad de SFC y sus células, en las que han participado centros de investigación públicos e industriales fundamentalmente norteamericanos, tanto del área fotovoltaica como del área de fiabilidad electrónica e industrial.

No quisiera acabar esta introducción sin destacar el importante peso de España, y en concreto del IES-UPM en la investigación actual de los elementos del SFC. Para reflejar de un modo más tangible esta afirmación hemos analizado las contribuciones orales del congreso más importante de SFC, “*Internacional Conference on Concentrating Photovoltaic Systems*”, que se celebró en Seattle-USA en abril de 2011.

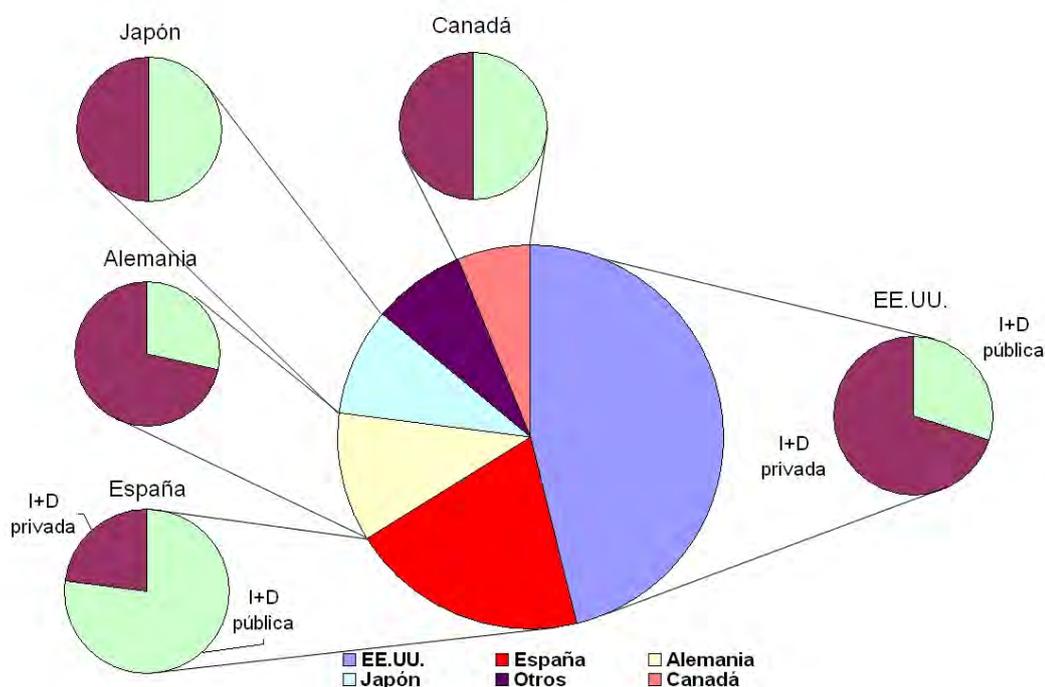


Figura 2.1: Distribución de ponencias orales de I+D en la conferencia CPV-7, clasificadas por países y por origen de la contribución.

El diagrama de la Figura 2.1 refleja la importante participación española en esta área de investigación, y por otra parte, la sustancial diferencia en el reparto de organismos que investigan en SFC, ya que el peso de la investigación de empresas privadas en SFC es mucho menor que en el resto de países. En concreto en el diagrama se consideraron las 65 contribuciones realizadas por países con 2 o más contribuciones, de las 13 contribuciones realizadas por instituciones españolas, 7 fueron trabajos exclusivos o liderados por el IES-UPM.

En las siguientes secciones expondremos la necesidad de la investigación en la degradación y fiabilidad de células III-V de concentración y SFC, y compararemos la situación en esta área con la de los sistemas fotovoltaicos convencionales. Después trataremos el estado del arte en fiabilidad de módulos de SFC para ofrecer una visión general del sistema y finalmente nos centraremos en el estado del arte en degradación y fiabilidad de las células solares III-V de concentración, que son el objetivo de la tesis. Para ordenar las contribuciones de los investigadores en estas áreas las agruparemos por el organismo de investigación al que pertenecen.

2.2. Estado del arte en fiabilidad

Una vez que los fabricantes han demostrado las altas prestaciones de los SFC es necesario dar un paso más, ya que estas prestaciones además deben ser mantenidas durante el periodo de vida del sistema. En relación a este aspecto los principales centros de investigación han concluido en sus publicaciones [AUEH+05] [KGQ09][Algora10][Bos10][FRIED10][Kur11][Swan11] la necesidad de investigar la fiabilidad de células III-V mediante la realización de ensayos acelerados, pero hay pocos trabajos cuyo objetivo sea obtener resultados cuantitativos de degradación o fiabilidad a partir de la realización de ensayos acelerados a células III-V de concentración.

La importancia de la fiabilidad en el desarrollo industrial de los sistemas fotovoltaicos, se refleja en numerosos aspectos, algunos de marketing y económicos, y otros técnicos.

Entre los aspectos de marketing y económicos podemos destacar.

- Para que el mercado de los SFC siga creciendo los sistemas deben mantener un nivel de calidad adecuado a lo largo del tiempo. Si el sistema

opera bien sólo 10 años los inversores se alejarán del mercado y será difícil recuperar su confianza. Hay que considerar que los clientes están acostumbrados a la alta fiabilidad y bajo mantenimiento de los sistemas fotovoltaicos convencionales.

- La fiabilidad tiene una influencia crítica en el coste del sistema fotovoltaico, ya que los sistemas fotovoltaicos tienen un alto coste inicial que es necesario amortizar mediante la generación de energía eléctrica a lo largo de su vida. Si se aumenta el periodo de vida útil mediante la mejora de la fiabilidad, se aumentará la rentabilidad del sistema.

En el aspecto técnico de la fiabilidad de los SFC, hay que considerar que es un tema bien estudiado en los sistemas fotovoltaicos convencionales basados en silicio, ya que existe una importante experiencia de medidas en campo a los sistemas durante decenas de años, y un amplio espectro de ensayos acelerados a las células y módulos [TTMQ+07]. Sin embargo, se puede considerar unánime la idea de que los resultados de fiabilidad y experiencia obtenida en los sistemas convencionales de silicio, no es exportable a los sistemas de concentración, como reflejan los trabajos mencionados en el primer párrafo de la sección, y de forma más concreta [KGQ09]. La diferencia se resume en que son sistemas más complejos, y con niveles de estrés muy superiores, por lo que la evaluación de la fiabilidad puede ser crítica para el buen funcionamiento del sistema.

En [KGQ09] se revisan los objetivos de fiabilidad comunes a la mayoría de las tecnologías fotovoltaicas, y los específicos de cada uno de ellas. Las causas de fallos más frecuentes encontrados en la limitada experiencia temporal en campo de SFC son el mal control térmico de la célula, el efecto de concentrar la radiación (especialmente UV) sobre los materiales del receptor, y la degradación de la óptica primaria. Para evidenciar y posteriormente resolver estos problemas proponen respectivamente: ensayos de ciclos térmicos con inyección de corriente, exposición a UV, y pruebas de abrasión.

El Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM, como se indicó en la introducción, va por delante en algunos aspectos de la evaluación de la degradación y fiabilidad de las células de concentración III-V, en concreto en ensayos acelerados térmicos sobre células. En las próximas secciones explicaremos su

contribución al estado del arte previo a esta tesis, junto con el resto de instituciones y empresas que investigan en esta área.

2.2.1. Fiabilidad en SFC

Los trabajos relacionados con la fiabilidad de módulos de SFC con células III-V de concentración sobre los que trataremos en esta sección son relativamente recientes, ya que la investigación de SFC comenzó con células de silicio, y en general tanto en silicio como en III-V se han centrado en mejorar las prestaciones de costes y rendimiento. Entre estos trabajos de calidad, degradación de potencia generada y fiabilidad destacamos:

- Los trabajos realizados en Japón por la empresa Daido Steel y universidades niponas. En uno de los primeros trabajos [YTA+04], realizan un análisis experimental de la contribución de cada uno de los elementos que componen un sistema de alta concentración a la pérdida de rendimiento del sistema instalado en campo, además indican los problemas de calidad que han aparecido en dichos elementos. En [AUEH+05] se realiza un estudio del incremento de temperatura en el módulo y en el receptor para un sistema de concentración a 400X con células III-V, en las conclusiones indican que los materiales del módulo deben estar preparados para soportar la temperatura ambiente más 30 °C, mientras que los materiales en el receptor, como la célula, el circuito al que va montada y su material de protección deben estar preparados para soportar la temperatura ambiente más 60 °C. En [AKUK+04] [Aa05] mantienen como objetivo la calidad inicial, pero además plantean los futuros objetivos de fiabilidad, tanto del conjunto del SFC con células III-V, como de diversos materiales del ensamblado del módulo instalados en sistemas de concentración en campo, en estos trabajos se analizaron los defectos y fallos una vez transcurrido un año de trabajo en campo, entre los defectos encontrados destaca la degradación en las lentes debido a los diferentes factores ambientales.
- Los trabajos realizados por el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM. En [Gon08][GVAN09][GVAN11] se realiza una actividad centrada en el módulo de concentración aunque también obtiene resultados relevantes de la célula III-V, se desarrolla un original y complejo ensayo

[GVAN09] en campo y tiempo real de módulos de concentración con células III-V. Los resultados en [GVAN11] evidenciaban el buen comportamiento de la célula con una degradación nula, sin embargo si se evidencian problemas en la óptica, los materiales de encapsulado y la alineación entre óptica y células. Parte de estos problemas han sido debidos a la manipulación manual necesaria para cablear cada una de las células del módulo de modo independiente, para la medida independiente de las curvas I-V de la célula en oscuridad e iluminación en campo. En el trabajo se reflejan además de los defectos encontrados, su posible causa y su importancia. En este trabajo hay que destacar dos aspectos, que se aporta un modelo para estimar la fiabilidad y el MTTF (Tiempo Medio Hasta el Fallo – Mean Time To Failure) de los módulos a partir de datos de degradación tomados en campo, y la innovación de medir de forma independiente cada célula respecto al conjunto de la célula y el módulo, lo que permitió evaluar de forma diferenciada la degradación del módulo en su conjunto, y la aportación a dicha degradación de la célula solar durante el año de duró el ensayo.

- Los trabajos realizados por el Grupo de Investigación en Integración de Sistemas e Instrumentos del IES-UPM, entre los que destacaré la colaboración con la empresa Solfocus, en el marco del cual se han diseñado y patentado elementos de un nuevo sistema de caracterización de módulos fotovoltaicos en concentración mediante iluminación con flash (flash test) [DAS08], [GTCL09]. Este sistema es imprescindible para caracterizar con precisión módulos y ensamblados de concentración con iluminación concentrada, pero en el ambiente controlado del laboratorio.
- La empresa B.P. Solar con una amplia experiencia en sistemas convencionales fotovoltaicos, en [Wohl10] realiza una revisión de los mecanismos de fallo relacionados con los estándares de cualificación fotovoltaica de módulos, y vuelve a remarcar que la cualificación aún siendo una herramienta para mejorar la fiabilidad, no permite evaluar la fiabilidad de los módulos. Según el autor, el objetivo de los ensayos acelerados es identificar rápidamente defectos que hayan aparecido en los sistemas instalados en campo, y que mediante estos ensayos acelerados específicos puedan aislarse y resolverse. Es necesario que toda esta experiencia en los ensayos acelerados sea transferida a los ensayos de cualificación.

- Las aportaciones del NREL han sido numerosas por lo que vamos a realizar una separación temática de estas aportaciones:
 - En [BSK09] presentan el diseño de un test basado en ciclos térmicos, para la cualificación de ensamblaje de células de concentración. Consideran que la inyección de corriente junto con el ciclo térmico es un método efectivo para cualificar los diferentes elementos del ensamblaje de las células. Se localizan células que se rompen por calentamiento excesivo debido a huecos significativos en la soldadura, que pueden ser detectados con rayos X o infrarrojos. Un año después en [BSSK10], plantean que los ensayos de ciclos térmicos de la Norma IEC 62108 no permiten detectar en numerosos casos la presencia de huecos o defectos en la base de la soldadura del chip, ya que hay módulos que pasan la norma y sin embargo tienen estos fallos de montaje. Sobre este aspecto ya existen análisis anteriores basados en elementos finitos [CBBJ+08], que analizaban problemas con la soldadura y conexiones del chip al disipador ante la presencia de ciclos térmicos. Hay que considerar que una célula de área grande y alta concentración está a una temperatura elevada cuando trabaja, y que la temperatura puede caer de forma instantánea si la irradiancia cae abruptamente por una sombra.
 - En [MKKK09] estudian la aplicación de ensayos acelerados con ultravioleta e infrarrojo para evaluar la degradación óptica de los materiales que protegen la célula (silicona, lente del receptor), teniendo en consideración que una vez se concentra la luz mediante lentes, la irradiancia que atraviesa los materiales de protección es muy elevada.
 - A partir de 2010 el NREL plantea trabajos para proponer y fundamentar futuros cambios normativos en los SFC. En [Myer10] se considera modificar la aplicación de los valores medidos de DNI (Direct Normal Irradiance W/m^2 , irradiancia normal directa) y GNI (Global Normal Irradiance W/m^2) para los SFC. El procedimiento estándar es caracterizar módulos fotovoltaicos convencionales o de concentración considerando un GNI de $1000 W/m^2$, pero el autor

- propone que los módulos de SFC que precisan de radiación directa sean caracterizados con un DNI del orden de 900 W/m^2 . En [Emer10] se proponen las propiedades que debe tener un sistema de monitorización de dispositivos fotovoltaicos. Dentro de este trabajo cabe destacar un resumen de las incertidumbres admisibles en las medidas de caracterización en exteriores para los parámetros eléctricos (para V_{oc} e I_{sc} considera un $\pm 0.2\%$ de incertidumbre admisible, y para la temperatura $\pm 1\%$ de incertidumbre admisible). El tema de la precisión necesaria en las medidas fue tratado ampliamente con anterioridad por el IES-UPM y otros organismo de investigación europeos en el proyecto C-Rating [SPAC+03], financiado por el V Programa Marco de la Comisión Europea, donde uno de los objetivos era identificar criterios y métodos estándar para caracterizar sistemas de concentración fotovoltaica.
- En [BK11] presentan el modelado con elementos finitos (FEM - Finite Element Model) de la fatiga térmica producido en el montaje de la célula de los SFC, y extrapolan la relación entre el tiempo de ensayo de ciclos térmicos de la Norma IEC 62108, y el tiempo equivalente en campo según medidas experimentales en varias localizaciones.
 - Los miembros del grupo IDEA de la Universidad de Jaén [IDEA-UJ], en [MVNH+10] plantean una revisión de la Norma IEC 62108, observando que se requiere una regulación adicional de varios elementos del sistema, así como la evidencia de problemas prácticos de aplicación de la norma. Consideran que la variedad de tipos de SFC considerados en la norma, puede hacer necesaria la subdivisión de la norma para cada tipo de SFC.
 - El grupo del laboratorio SPASOLAB del Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial (INTA) [MGFL+09], realiza ensayos en exterior e interior para probar y obtener la acreditación IEC 62108 para un determinado tipo de módulo, y muestran el análisis de los resultados, y recomendaciones prácticas sobre la aplicación de la norma.
 - Los trabajos realizados por el ISFOC (Instituto de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración, Puertollano-España) y aquellos trabajos realizados por las empresas privadas punteras en sistemas fotovoltaicos de concentración a

las que el ISFOC ofrece una plataforma de prueba de instalaciones de SFC. Esta plataforma está permitiendo la prueba de sistemas de concentración en condiciones reales de trabajo, pero en un entorno ambiental y de sistemas electrónicos controlado. Estos demostradores permiten obtener los primeros resultados reales tanto de prestaciones en campo, como de control de calidad en plantas con potencias superiores a 1 MW [RMCP+08] [MSRP+09] [NGC08]. Entre los trabajos realizados destacamos :

- El trabajo de Solfocus [SF08] que muestra los resultados de un ensayo en campo de SFC, junto con las acciones correctivas de los fallos detectados. Los principales problemas, al igual que en los ensayos de Daido Steel [AKUK+04][Aa05], fueron encontrados en la óptica que se probó con diferentes materiales de protección.
- El trabajo de Arima Eco Energy [ArimaE] [HTCW+09], muestra su experiencia tras realizar los ensayos de cualificación con la Norma IEC 62108 en el ISFOC. Trabajan con células III-V montadas en sustratos IMS (Insulated Metal Substrate) con base de aluminio aislado de los conductores de cobre. En los ensayos de 500 horas de ciclos térmicos con inyección de corriente se midió una degradación de potencia menor que un 2%, y sin embargo en condiciones reales, si se produjeron diversos defectos en las células debido a los cambios bruscos de temperatura y corriente. Esto demuestra la necesidad de optimizar la planificación de los ensayos con el objetivo de en primer lugar reproducir adecuadamente los fallos en campo, y en segundo término resolverlos con un nuevo diseño o materiales.
- En un trabajo conjunto del NREL el ISFOC y la empresa Daido Steel [KSVRA11], se propone la creación de estándares semi-cuantitativos de cualificación de módulos de SFC, los denominan “Quality Assurance Standards”. Pretenden dar un paso por delante del estándar IEC 62108 que garantiza los primeros años de vida, para ofrecer datos cuantitativos. La ventaja de esta propuesta es que puede incentivar la inversión al tener un control de calidad a más largo plazo.

- Finalmente dentro de la sesión de SFC del congreso PVMRW (Photovoltaic Module Reliability Workshop), diversos centros de investigación realizan contribuciones relevantes. En [Scot10] se muestran las definiciones de fiabilidad con aplicaciones específicas para la industria fotovoltaica, y en [McCl10] se plantea un modelo de fiabilidad para módulos fotovoltaicos, un control de la fiabilidad en los diferentes elementos del módulo, y ensayos acelerados con instrumentación electrónica para evaluar la fiabilidad de cada elemento indivisible. El siguiente paso que sería obtener resultados estadísticos de fiabilidad se analiza en [Kuit10]. En [Davi10] se plantean visiones originales de fiabilidad en el campo de los sistemas fotovoltaicos, pero que se llevan aplicando desde hace años en otras áreas de la ingeniería, se muestra que junto con ensayos previos y posteriores es conveniente planificar en el estudio el análisis de los sistemas fotovoltaicos mediante modelos eléctricos, mecánicos y térmicos, los cuales ofrecen mucha información, rapidez en los resultados y flexibilidad en el diseño. En [Fren11] se realiza un análisis y revisión de la fiabilidad y durabilidad de sistemas de baja concentración fotovoltaica, incidiendo en la durabilidad de los espejos y de las células en función de su gestión térmica. Estos sistemas tienen un nivel de estrés más cercano a los sistemas fotovoltaicos convencionales que a los HCPV (High CPV), y por tanto, según el autor en baja concentración se podrían utilizar en los módulos materiales típicos de la fotovoltaica convencional sin peligrar su durabilidad.

2.2.2. Fiabilidad en células III-V de concentración

Hasta la década de los 80 el silicio fue casi el único material semiconductor empleado en módulos fotovoltaicos, y su uso no fue cuestionado hasta el auge de la industria aeroespacial en los años 80 y las necesidades de los nuevos satélites que precisaban de periodos de vidas mayores. Al analizar los módulos de silicio empleados en los primeros satélites, se observó que su resistencia a la radiación del espacio era limitada, y por tanto su vida insuficiente [Ile01], esto supuso que las células con materiales III-V mucho más resistentes a la radiación cósmica ocupasen el nicho de aplicaciones espaciales. Una revisión muy completa de los materiales y métodos para el desarrollo de las células solares para aplicaciones espaciales, así como de la influencia de los aspectos ambientales puede encontrarse en [MHF05].

Una de las ventajas del uso de materiales III-V para células fotovoltaicas es la posibilidad de tener varias células solares físicamente superpuestas, y eléctricamente en serie en la misma oblea (células multiunión) lo que mejora el aprovechamiento del espectro de radiación solar y por lo tanto aumenta el rendimiento energético de la célula. En la década de los 80 se desarrolló la célula de dos uniones GaAs/Ge que se fabricaba y montaba en tamaños grandes (36 cm²) [Ile01] ya que se utilizaban sin concentración en satélites, y en los 90 se desarrollaron las primeras células de triple unión [MHF05]. Esto supuso un aumento del rendimiento, y un empuje definitivo para las células III-V en aplicaciones espaciales, y consecuentemente se realizó una amplia investigación en fiabilidad centrada en la radiación sufrida por la célula en el espacio [TP04]. Sin embargo, esta amplia experiencia en aplicaciones espaciales no puede trasladarse directamente a las aplicaciones terrestres en concentración porque las condiciones ambientales y de concentración lumínica son muy diferentes.

Una experiencia aprovechable para evaluar la fiabilidad de las células III-V de concentración terrestre es la de los dispositivos optoelectrónicos con materiales similares como los HB-LEDs (High-Brightness Light Emitting Diodes). Sin embargo, la equivalencia de metodologías de ensayos acelerados no es directa, ya que es fácil conseguir que el LED funcione en condiciones nominales de trabajo en la cámara climática, mediante inyección de corriente, y de ese modo poder realizar cualquier tipo de ensayo acelerado, pero existen muchos problemas prácticos y limitaciones para hacer funcionar las células solares con alta concentración lumínica dentro de la cámara climática, lo que ha ocasionado que las aproximaciones a la evaluación de la degradación y fiabilidad de las células solares III-V de media y alta concentración hayan sido bastantes tangenciales.

Los trabajos de investigación en degradación y fiabilidad de células solares de concentración son escasos, comenzaremos por presentar los realizados por el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM y después presentaremos los realizados por otras instituciones de investigación.

- En la tesis doctoral [RS01] se desarrolla entre otras actividades un análisis de la degradación en células III-V de alta concentración. Las conclusiones de los ensayos se publicaron en [RSA01] y [RSA03], donde se describen los resultados en cuatro tipos de ensayo: ensayos en alta humedad, ciclos térmicos en ambientes con humedades relativas del 30%, polarización

directa a elevados niveles de corriente equivalentes a 1100 soles, y ensayos con iluminación láser que simula una irradiancia de 1100 soles. Los resultados muestran de forma cualitativa que las células solares III-V pueden trabajar a tan altas concentraciones como 1000 soles, pero es necesario un análisis que confirme de forma cuantitativa estos resultados preliminares.

- Como continuación de esta línea de trabajo en [GRSA04] se analizan y relacionan los resultados previos obtenidos con las tecnologías optoelectrónicas más maduras. En [GRSA05] se analiza el voltaje de ruptura en polarización inversa en células III-V de alta concentración lo que produce puntos calientes en la célula y una fuerte caída de la resistencia del perímetro desde 25,2 kΩcm a 0,45 kΩcm.
- En [VNMA+05] se presenta una hoja de ruta para demostrar la fiabilidad de las células solares de concentración, considerándolos unos dispositivos sin historial previo de fiabilidad. En esta planificación destaca como primer paso la predicción de la fiabilidad a partir de la comparación con dispositivos similares de tecnología más madura, y se plantea la posibilidad de realizar diversos tipos de ensayos acelerados.
- La primera actividad de la planificación anterior se desarrolla en [VARSG07] donde se realiza un análisis de predicción de la fiabilidad de células solares basado en la experiencia previa de los HB-LED [BPL08] [Lux06]. Las células de concentración que fabrica el IES-UPM utilizan tecnologías de ensamblaje y fabricación similar a estos dispositivos optoelectrónicos, “LED-like approach” que ha sido patentada en el IES-UPM [ARSGG06] [Agora07]. El trabajo concluye que los principales factores de estrés que se espera afecten a la fiabilidad sean en primer lugar la temperatura y en segundo la densidad de corriente, que en el peor caso de las células de concentración III-V es un orden de magnitud menor que en los HB-LED. Otros factores de estrés son la humedad debido a que la célula trabaja en exterior y la fotodegradación del encapsulado debido a la concentración. Como resultado final, se concluía en este trabajo que las células de alta concentración III-V son capaces de ofrecer tiempos de operación al menos similares a los HB-LEDs de AlGaInP, con MTTF (Mean Time To Failure - Tiempo Medio Hasta el Fallo) del orden de 100.000 horas. Asumiendo al menos este valor de MTTF para las células

de concentración y considerando que sólo trabajan 8 horas por día, 100.000 horas se corresponden con 34 años de operación en tiempo real [VARSG07]. Con posterioridad y en parte por el conocimiento adquirido en este trabajo se plantean ensayos acelerados de temperatura sobre LEDs a diferentes niveles de inyección de corriente en directa [VNNB10]. Además se realizan en el mismo laboratorio otro conjunto de ensayos sobre LEDs con inyección de corriente en directa, pero con condiciones de alta presión y humedad [NVN09]. En estos trabajos se empleó el sistema de instrumentación desarrollado para las células solares de concentración que presentamos en esta memoria de tesis.

- A partir de la experiencia acumulada en el IES-UPM se realiza el desarrollo de una estrategia para certificar la fiabilidad de células solares de concentración, que integraba las actividades A3 a A6 de la Figura 1.7 [GARSA+06] [GARSV+07] [GAVN+08], al finalizar estas actividades se publica la memoria de la tesis [Gon08], aunque las publicaciones en revistas de las actividades de esta tesis ha sido en gran parte posterior en el tiempo.
- La actividad precursora de esta tesis ha sido el desarrollo de ensayos de vida muy acelerados (HALT) escalonados en temperatura (temperatura step-stress) a células de GaAs de pequeña área y alta concentración [Gon08][GVNA+09]. Se desarrolla un circuito de ensayo acelerado específico para las células que soportase alta temperatura, pero donde las células se montaron sin protección encapsulante. El modo de operación de este tipo de ensayo fue inyectar corriente en directa en las células para emular la condición eléctrica de trabajo en iluminación. En la primera fase se estresaron con una temperatura no muy elevada, para después ir incrementando la temperatura a las células con las mismas condiciones eléctricas. El ensayo transcurre durante 313,7 horas con temperaturas sucesivas de 90°C, 110°C, 130°C y 150°C, durante las cuales se va midiendo la pérdida de potencia relativa de las células. El nivel de fallo fue definido para el ensayo en una pérdida de potencia relativa superior al 10%. A partir de la curva I-V en oscuridad se identifica el mecanismo de degradación de la célula, mediante un método desarrollado en el IES-UPM basado en un modelo 3D distribuido de la célula con el simulador SPICE®, detectando que la degradación en potencia era debida a la reducción de la

resistencia paralela del perímetro, lo que indica una importante degradación del perímetro de la célula. En función de este mecanismo de fallo se buscaron equivalencias en dispositivos optoelectrónicos que utilizan los mismos materiales y similar tecnología evidenciando un rango de energías de activación entre 0,7 eV y 1,1 eV [YYLY01][AG00]. Tomando un valor intermedio de 0,9 eV se evalúa un valor mínimo de MTTF (Tiempo Medio Hasta el Fallo) con un nivel de confianza del 90%, de $2,0 \cdot 10^5$ horas, que equivale a 69,2 años [Gon08] [GVNA+09]. Debido a que la degradación se evidenció en el perímetro, y a que las células no estaban protegidas durante el ensayo, se concluyó la necesidad de proteger las células en los siguientes ensayos como medio de disminución de la degradación del perímetro y mejora de la fiabilidad.

Entre los trabajos desarrollados por otros institutos de investigación y empresas privadas vamos a destacar los siguientes:

- El Fraunhofer ISE en [vRBW03] realiza ensayos de estrés en humedad sobre células de AlGaAs/GaAs con diferentes materiales de ventana, con similares conclusiones que [RSA01]. Además realizaron un ensayo con luz ultravioleta con una lámpara xenon de 1500 W durante 850 horas, concluyendo que debido a la corta duración de la vida de las lámparas no era un método adecuado para realizar ensayos¹. En un posterior trabajo [vRB05] ampliaron el estudio sustituyendo la capa ventana con alto contenido en aluminio por AlGaInP resolviendo el problema de oxidación de los dispositivos.
- La empresa IBM en [vKAKM+09] realizan ensayos de calidad sobre células de 100 mm² con concentraciones solares reales en campo de hasta 2000 soles, para comprobar el comportamiento de las células a muy alta concentración y a la vez realizar un análisis de los disipadores.

¹ Esta limitación de periodo de vida de la fuente de iluminación que produce las condiciones nominales de trabajo, y la complejidad de transmisión de la luz hacia la célula dentro de la cámara climática, siempre esta presente a la hora de plantear ensayos con iluminación concentrada de las células dentro de la cámara climática.

- En el área relacionada con la fiabilidad de las células III-V se encuentran trabajos de Daido Steel y del NREL que se han analizado previamente en la anterior sección dedicada a módulos de SFC. En el caso de Daido Steel debido a que realizan un análisis integrado de la célula respecto al receptor y el módulo, y en el caso del NREL porque están relacionados fundamentalmente con la investigación de la puesta en marcha, y la mejora de la Norma IEC 62108, que es una norma de cualificación del módulo y no de la célula. Por lo que respecta a la investigación en células por parte del NREL se ha mostrado activo en el análisis de los parámetros ambientales que influyen en los receptores de concentración, y en el diseño de nuevas tecnologías de células III-V de concentración donde colabora con las empresas norteamericanas en esta área, además trabaja en ensayos de cualificación tanto de receptores como de células, los cuales, podrían formar parte de las nuevas normas de cualificación.
- La empresa Spectrolab-Boeing fabricante de células III-V, en [HF11] revisa su experiencia con células multiunión III-V de área grande en los aspectos de la unión al sustrato del circuito del receptor, la contaminación en la adhesión de la célula y la contaminación en el encapsulado. Como fallos más predominantes vuelven a aparecer problemas por causas térmicas, soldadura, roturas en sustratos DBC (Direct Bond Copper) del tipo “conchoidal fracture” (rotura del sustrato cerámico DBC debido a ciclos térmicos y los diferentes coeficientes térmicos de expansión del cobre y la alúmina), y desconexión de la cinta que realiza la conexión del circuito con la célula (ribbon bonds). La gestión térmica de la célula aparece como crítica para mantener su calidad a largo plazo.
- La empresa Solar Junction [SolarJ] realiza ensayos de ciclos térmicos sobre células con inyección de corriente en directa para evidenciar defectos en la célula y en la adhesión de ésta al circuito del receptor.
- Los trabajos de la empresa Emcore [Emcore10][Emcore10a] fabricante de células III-V, que indican los principales mecanismos de fallo de los módulos de SFC y de las células multiunión III-V, así como sugieren los métodos de ensayo para identificarlos, basándose en su experiencia en campo. El conjunto de su exposición se resume en una matriz de causas de fallo

(modos y mecanismos de fallo) y elementos del SFC donde se producen, “CPV Module Reliability Issue Matrix”, Figura 2.2. En base a los resultados obtenidos se plantea la propuesta de una norma de cualificación de células. Este trabajo se amplió con la propuesta de una norma de cualificación para el receptor en [FLBN+10] y más tarde en [Emcore11] presenta una propuesta más concreta de “CPV solar Cell Qualification Standard” para ser analizada en el IEC TAG-82 WG-7.

CPV Module Reliability Issue Matrix		emcore empower with light		
	Cell	Receiver	Receiver Subassembly	Module
Damp heat	Cell Corrosion		Electrolytic corrosion	Acrylic Lens Warp
Wet insulation			Must pass at Rx level for non-hermetic modules	
Dry Insulation				Hard Shorts
Outdoor Exposure		Melting coverglass	Yellowing of encapsulants	
Damp Freeze			Rx attach failures	
Power Thermal Cycle	Thermal Runaway	DBC Conchoidal Fracture		
ESD	Bare cells vulnerable			

Figura 2.2: Matriz de fiabilidad del módulo de un SFC. Realizada por Emcore. Tomada de “*Failure Modes of CPV Modules and How to Test for Them*” [Emcore10]. La matriz está compuesta por modos y mecanismos de fallo. La cabecera de la tabla indica los elementos en los que se ha identificado fallo, y en la columna izquierda los tipos de ensayo que permiten identificar los modos o mecanismos de fallo.

Como se observa la investigación en fiabilidad se ha ido incrementado a medida que se acercaba la expansión comercial, siendo inicialmente el principal objetivo de las empresas privadas resolver problemas concretos de calidad que han surgido en campo.

2.3. Conclusiones

Los SFC han evolucionado mucho en los últimos años, el aumento del rendimiento de las células multiunión III-V ha ayudado a que los SFC sean económicamente competitivos en las zonas del planeta con mayor radiación, con los sistemas fotovoltaicos convencionales y con otros sistemas de generación de energía.

Las instalaciones de SFC están creciendo y las expectativas en el plazo de dos años son que el tamaño de instalaciones se multiplique por un factor entre 10 y 100 [Kur11] con respecto a las instalaciones actuales. Estas perspectivas de negocio a corto plazo han hecho que las multinacionales como Siemens compren empresas de SFC para entrar en esta área de negocio.

Junto con las perspectivas de comercialización, ha aumentado el esfuerzo en investigación. Pero mientras que este esfuerzo se lleva realizando desde hace bastantes años para mejorar el rendimiento de la célula, el coste de la célula y la óptica, la investigación en fiabilidad se está empezando a realizar ahora. Seguramente debido a las buenas previsiones de industrialización, los organismos públicos de investigación y las empresas de SFC se han visto forzados a investigar en fiabilidad, para demostrar a los clientes e inversores que se trata de una tecnología fiable, y desde este punto de vista económico también competitiva con la tecnología de módulos fotovoltaicos convencionales.

La evaluación de la fiabilidad de los SFC se enfrenta con considerables dificultades, en especial en lo que respecta a la fiabilidad de la célula de concentración, entre estas dificultades se pueden destacar:

- Se ha tardado mucho en prestar atención a la fiabilidad de las células multiunión III-V de aplicaciones terrestre, considerando que ya se están industrializando, y se espera un fuerte crecimiento y expansión en los próximos años. Esto implicará que la expansión industrial irá acompañada de incertidumbres en lo que respecta a la calidad a largo plazo, es decir una alta fiabilidad a largo plazo. Aquellas empresas que antes y más hayan invertido en garantizar la fiabilidad de sus productos tendrán una importante ventaja comercial sobre las otras.

- Existe una problemática inherente a la realización de ensayos acelerados en células y elementos que reciben luz concentrada, porque es complejo y caro (en la mejor de las alternativas) conseguir una fuente de luz estable y duradera que simule las condiciones de concentración de la célula, pero con ésta dentro de una cámara climática. Debido a esta dificultad se están realizando ensayos acelerados tangenciales para detectar determinados tipos de fallos, que no dejan de ser importantes, pero que no se dirigen a evaluar la fiabilidad de la célula y el receptor. Entre estos ensayos están los ensayos muy acelerados para resolver el problema de soldadura de la célula, y ensayos de ciclos térmicos y simulaciones térmicas para probar el comportamiento térmico y mecánico de los elementos del receptor.
- La medida de la degradación en generación de potencia de los SFC es relativamente sencilla en campo, pero no se puede esperar 30 años para corregir los elementos que contribuyen a esa degradación. Es por ello, que los ensayos acelerados son imprescindibles para evaluar en laboratorio y en un corto periodo de tiempo esta degradación. El mismo razonamiento es aplicable a la evaluación de la fiabilidad, considerando que los fallos evaluados son la suma de fallos producidos por exceso de degradación y por fallos de tipo abrupto, como pueden ser una rotura del receptor, la célula, o un circuito abierto.
- En relación con el punto anterior, la fiabilidad de las células en campo vendrá definida además de por su degradación a lo largo de su vida, por los fallos abruptos que sufran, bien por debilidades de la fabricación, o por mecanismo adicionales de fallo a los que contribuya el ambiente en campo. Si se quiere tener información pronto, es imprescindible realizar ensayos acelerados, lo que implica superar técnica y económicamente la dificultad, indicada anteriormente, de iluminación con luz concentrada durante el ensayo acelerado dentro de la cámara climática, o buscar soluciones alternativas.

En los ensayos de vida acelerada realizados en esta tesis, que se irán explicando en la memoria, se ha intentado superar en todo lo posible las dificultades que hemos mencionado, tanto en emulación de condiciones de trabajo de la célula en la cámara climática, como en la medida de la degradación de la potencia generada durante los ensayos acelerados. De esta forma podemos obtener la mejor estimación

de la fiabilidad de la célula de concentración III-V encapsulada y en condiciones de trabajo nominales.

Capítulo 3

TEORÍA DE FIABILIDAD

3.1. Introducción

En este capítulo se ha realizado una síntesis de la teoría de fiabilidad, para encuadrar los conceptos y herramientas gráficas empleadas en el análisis de los resultados de los ensayos acelerados. Para el lector que requiera una mayor profundidad, puede encontrar información más completa y más didáctica en libros de fiabilidad que hemos referenciado en la memoria [War73][O'Con02][Yan07][Sch96][MHDBK98].

El capítulo se ha dividido en dos secciones:

- En la primera sección se realiza una revisión de las principales definiciones, parámetros y funciones relacionadas con la fiabilidad, que posteriormente se emplearán en la memoria de la tesis en el análisis de fiabilidad de los resultados de los ensayos de vida acelerada.
- En la segunda sección se muestran las principales funciones estadísticas utilizadas en fiabilidad centrándose en la función distribución de Weibull que ha sido utilizada para obtener la evolución de la fiabilidad de las células.

3.2. Definiciones

3.2.1. Definiciones relacionadas con la fiabilidad

Las definiciones básicas de fiabilidad están muy estandarizadas, ya que el comienzo de su difusión internacional fue debido a la exigencia del gobierno de los Estados Unidos del cumplimiento de normas de fiabilidad [MHDBK98] para la adquisición de material militar, especialmente en el área de la electrónica. En estas normas están definidos los parámetros y las principales funciones de fiabilidad.

Las definiciones de las normas europeas e internacionales de fiabilidad se han basado en los primeros manuales desarrollados por el ejército de los Estados Unidos, por lo que son una copia de las que aparecen en sus manuales. Por esta razón y porque se trata de un texto de difusión pública hemos decidido seguir las definiciones de parámetros y de funciones que refleja el MIL-HDBK-338B (Military Handbook

Electronic Reliability Design Handbook) [MHDBK98], que además es un manual claro y muy amplio. Su edición más reciente es la 338B, de 1998.

Basado en este manual [MHDBK98], la definición de fiabilidad es:

La fiabilidad es la probabilidad de que un elemento pueda desarrollar la función deseada durante un intervalo específico de tiempo bajo unas condiciones ambientales y de funcionamiento determinadas.

Analizando la definición de fiabilidad podemos destacar que:

- La fiabilidad es la probabilidad de que un elemento esté funcionando y por lo tanto como toda probabilidad se define con una función estadística.
- La fiabilidad depende del tiempo. En teoría de fiabilidad se supone que en el origen temporal el elemento a analizar funciona, tiene probabilidad de funcionamiento o fiabilidad igual a 1, y que a medida que pasa el tiempo la fiabilidad decrece hasta que en tiempo infinito la fiabilidad es cero.
- La fiabilidad depende de las condiciones ambientales y de funcionamiento. Las funciones y parámetros de fiabilidad tienen que ser especificados bajo unas determinadas condiciones ambientales y de funcionamiento.

Por las razones mencionadas, la fiabilidad se define en términos de probabilidad, y parámetros probabilísticos tales como variables aleatorias, funciones densidad, y funciones distribución. En teoría de probabilidad una **función densidad de probabilidad**, o función densidad de una variable aleatoria (como el tiempo hasta el fallo) es una función que describe la probabilidad para que esta variable ocurra en un tiempo dado. La función densidad de probabilidad de fallos, $f(t)$, es la probabilidad de que un dispositivo cualquiera tenga un fallo entre los instantes t y $t + dt$. Si como hemos explicado anteriormente todos los elementos de un sistema fallan entre $t=0$ y $t=\infty$ tenemos la igualdad (3.1):

$$\int_0^{\infty} f(t)dt = 1 \quad (3.1)$$

A partir de la función densidad de probabilidad se puede calcular **la función de distribución acumulativa (CDF - Cumulative Distribution Function), o sólo función**

distribución, $F(t)$ o $Q(t)$, que describe la probabilidad de que un elemento falle hasta un instante de tiempo t . $F(t)$ es la integral de la función densidad de probabilidad de fallo entre 0 y t , es decir la probabilidad de que el elemento falle antes de t , ecuación (3.2).

$$F(t) = \int_0^t f(t)dt \tag{3.2}$$

$$F(0) = 0, \quad F(\infty) = 1$$

A $F(t)$ o $Q(t)$ se le denomina **función deficiencia o inficiencia**. La acepción $F(t)$ es muy habitual en textos estadísticos o teóricos de fiabilidad, pero en textos prácticos e informes de fiabilidad también se utiliza $Q(t)$ que será la empleada en el análisis de resultados del capítulo 6 de la memoria. La función $F(t)$ es una función creciente tomando valores de 0 en el instante $t=0$ y de 1 en $t=\infty$, con la hipótesis de que todo elemento acaba fallando, y que en el instante inicial todos los elementos funcionan.

Debido a que la fiabilidad es la probabilidad de que un elemento funcione hasta el instante t , **la función fiabilidad $R(t)$ es una función distribución de probabilidad** igual a $1 - F(t)$, si recurrimos a la definición de $F(t)$, nos queda la ecuación(3.3):

$$R(t) = 1 - F(t) = 1 - \int_0^t f(t)dt = \int_t^\infty f(t)dt, \tag{3.3}$$

$$R(0) = 1, \quad R(\infty) = 0$$

La interpretación de la ecuación (3.3) es que la probabilidad de que un elemento funcione hasta el instante t , $R(t)$, es la integral de la función densidad de probabilidad de fallo ($f(t)$) entre t e ∞ , es decir el acumulado de probabilidad de fallo a partir de t .

Debido a que $R(t)$ es complementario de $F(t)$, la fiabilidad $R(t)$, probabilidad de funcionamiento, es siempre decreciente y tiene un valor de 1 en $t=0$, y 0 en $t=\infty$.

Diferenciando las ecuaciones (3.2) y (3.3) se puede deducir la función densidad de probabilidad de fallo $f(t)$ a partir de la función inficiencia o fiabilidad (ecuación (3.4)):

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} = -\frac{dR(t)}{dt} \quad (3.4)$$

Otra función de fiabilidad importante es la **tasa de fallos** $\lambda(t)$, failure rate, o densidad de probabilidad de fallo en t condicionado a no haber fallado antes de t .

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} \quad (3.5)$$

La tasa de fallos es una función fundamental en el análisis de la fiabilidad, es la densidad de probabilidad de fallo en t condicionado a no haber fallado antes de t , como expresa la ecuación (3.5). Las unidades de la tasa de fallos son las misma que las de la función densidad de probabilidad, habitualmente en unidades de fallos/hora, y en muchas normas de fiabilidad relacionadas con dispositivos semiconductores que tienen tasas de fallos muy bajas [MHDBK91] se emplea el múltiplo FIT (Failure in time); 1 FIT = $1 \cdot 10^{-9}$ fallos/hora.

La función $\lambda(t)$ típica de la mayoría de los dispositivos semiconductores y electrónicos durante toda su vida es la conocida curva de bañera, Figura 3.1, y está compuesta por tres etapas:

- Una primera etapa con tasa de fallos decreciente que se corresponde con un periodo de vida infantil, en el que los fallos son debidos a problemas de calidad en la fabricación del componente o equipo que afectan a un porcentaje de elementos que depende de la calidad del proceso de fabricación. A medida que estos elementos van fallando la tasa de fallos disminuye hasta alcanzar un mínimo cuando han fallado todos los que tenían debilidades de este tipo. A esta etapa se la denomina periodo de vida infantil.
- La segunda etapa comienza cuando han fallado todos los elementos con defectos de calidad en la fabricación. A partir de ese momento los fallos son aleatorios y se mantiene una velocidad de fallos constante, es decir, falla la misma proporción de elementos (respecto a los que aún sobreviven) al inicio de este periodo de vida que al final. La tasa de fallos se mantiene constante durante este periodo de vida que se denomina periodo de vida útil.

- En la tercera y última etapa la tasa de fallos aumenta con el tiempo y corresponde con la fase de envejecimiento. En esta etapa se produce la degradación del elemento y se denomina periodo de vida de envejecimiento o desgaste.

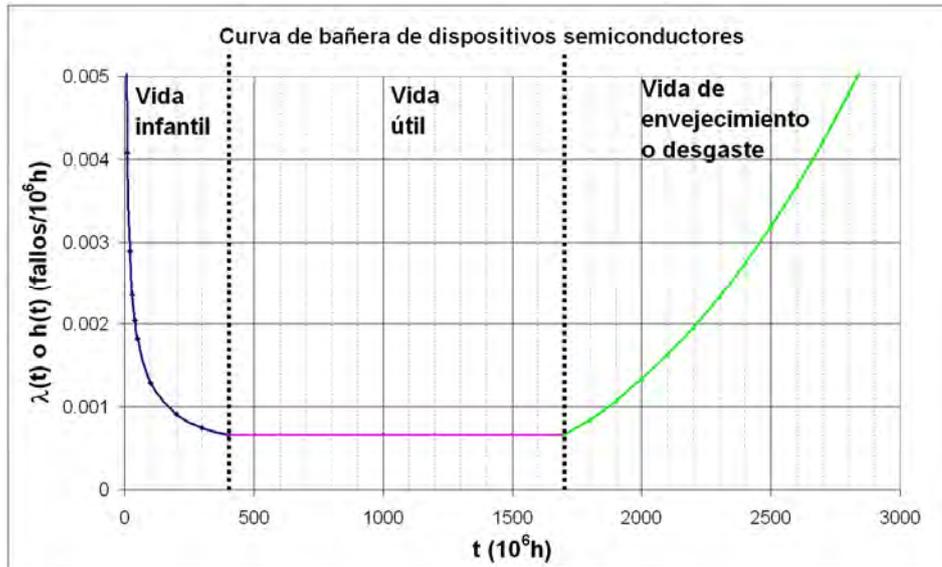


Figura 3.1: Evolución de la tasa de fallos típica de los dispositivos semiconductores. Curva de bañera.

La Figura 3.1 refleja la curva de bañera, hay que resaltar algunos aspectos importantes:

- El primero es que la mayoría de los componentes semiconductores actuales tienen un nivel de control de calidad en la fabricación que hace que comiencen a funcionar sin apenas periodo de vida infantil. Para los componentes críticos como los que van montados en satélites, además de adquirir los de mayor calidad, son sometidos a un proceso de envejecimiento controlado y limitado denominado cribado (“screening”), que es un ensayo acelerado que envejece al componente hasta comenzado el periodo de vida útil y que elimina todos los componentes con defectos de fabricación no detectados.
- El segundo es que el periodo de vida útil de un componente electrónico con bajo estrés eléctrico es mucho más largo que su periodo de vida (trabajo)

típico [SMFA07]. Esto no es así para componentes electrónicos con estrés térmico y eléctrico significativo, como los HB-LEDs, algunos transistores de potencia, o relés, que se degradan durante su periodo de vida aumentando su tasa de fallos. Si la tasa de fallos aumenta de forma significativa es necesario plantearse realizar una reposición preventiva antes del fallo.

En muchas aplicaciones, como en mantenimiento, puede ser más relevante la función de la tasa de fallos ($\lambda(t)$) que la función fiabilidad ($R(t)$), ya que la primera nos muestra la evolución de la probabilidad de fallo de los elementos supervivientes en cada instante de tiempo, y nos evidencia la necesidad de reposiciones preventivas.

Además de las definiciones de las funciones de fiabilidad, $f(t)$, $F(t)$, $R(t)$ y $\lambda(t)$, es necesario definir otros parámetros básicos de fiabilidad. Estos son el *MTTF* (Tiempo Medio Hasta el Fallo – Mean Time to Failure) y el *MTBF* (Tiempo Medio Entre Fallos - Mean Time Between Failure). Ambos parámetros son la vida media (θ) del elemento a estudiar, pero en el caso del *MTTF* para elementos no reparables, y el *MTBF* para elementos reparables.

La vida media, θ , o el *MTTF*, tiempo medio hasta el fallo se puede calcular a partir de la función densidad de fallos continua, como la esperanza matemática del tiempo hasta el fallo:

$$MTTF = \int_0^{\infty} t \cdot f(t) dt = \int_0^{\infty} t \cdot \left[-\frac{dR(t)}{dt} \right] \cdot dt \quad (3.6)$$

Integrando por partes y aplicando la regla de L'Hopital se obtiene una relación entre el *MTTF* y la función fiabilidad.

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t) dt \quad (3.7)$$

El *MTTF* y el *MTBF* tienen unidades de tiempo o unidades equivalentes como distancia, número de ciclos, etc.. El valor del *MTTF* es especialmente significativo cuando la tasa de fallos no depende del tiempo y por lo tanto es constante, $\lambda(t) = \lambda$, ya que en este caso particular el $MTTF = 1/\lambda$. Pero cuando la tasa de fallos no es constante durante toda la vida el valor del *MTTF* no ofrece una información tan relevante de toda la vida del producto ya que funciones de fiabilidad muy diferentes pueden tener el

mismo valor de $MTTF$. Esta es la razón por la que el objetivo de los ensayos acelerados, si se quiere dar información fiable, no puede ser calcular únicamente el $MTTF$, sino que debe ser además evaluar la función fiabilidad $R(t)$, y a partir de ésta el resto de funciones como la tasa de fallos, $\lambda(t)$, o la densidad probabilidad de fallo, $f(t)$.

3.2.2. Definiciones relacionadas con el fallo

En la teoría de fiabilidad se analiza la probabilidad de funcionamiento de un elemento. Para ello se asume que el elemento bajo análisis solo puede encontrarse en dos posibles estados: funcionamiento o fallo. Es por ello, que la definición de cuando un elemento está funcionando o en fallo debe ser clara y sin ambigüedades. Para las definiciones relacionadas con los fallos nos vamos a basar en la MIL-HDBK-338B. Estas definiciones son las siguientes:

- El fallo es el evento o estado no operativo, en el cual el elemento no puede desarrollar la función previamente especificada.
- El modo de fallo es la consecuencia del mecanismo por el cual se produce el fallo, por ejemplo, cortocircuito, circuito abierto, rotura, o excesiva degradación.
- El mecanismo de fallo es el proceso físico, químico, eléctrico, térmico o de otro tipo que causa el fallo.

Las dos últimas definiciones están relacionadas; el mecanismo de fallo es lo más interior lo más relacionado con la física del elemento, y el modo de fallo es lo más visible lo más exterior desde el punto de vista del ingeniero.

Por tanto, el fallo se produce cuando el elemento no cumple la definición de funcionalidad del elemento inicialmente definida. Este fallo puede ocurrir de dos formas:

- Fallo catastrófico, es el que ocurre de forma abrupta como un cortocircuito o un circuito abierto.
- Fallo gradual o debido a la degradación de las prestaciones, que hace que el elemento no cumpla las especificaciones de funcionamiento. Es por ello que a la hora de definir el fallo es necesario no solo considerar los fallos catastróficos sino también los fallos graduales o por degradación de

prestaciones. Mientras que los fallos catastróficos son más difíciles de predecir los fallos por degradación es posible predecirlos conociendo la evolución de la degradación con el tiempo y el resto de variables ambientales.

3.3. Funciones de fiabilidad

En la sección 3.1 hemos utilizado el modelo estadístico general para el estudio de la fiabilidad de un elemento en función del tiempo. Para aplicar este modelo es necesario utilizar distribuciones estadísticas que describan las leyes de fallo de los elementos a estudiar. Se han propuesto diversas funciones estadísticas como la exponencial, normal, log-normal o Weibull cada una de ellas con su campo de aplicación. En esta sección describiremos las funciones más utilizadas, y acabaremos con una explicación más extensa de la función de Weibull ya que se ha utilizado para analizar los resultados de los ensayos de vida acelerada de las células de concentración III-V.

En la Figura 3.2 se refleja el comportamiento de las funciones de fiabilidad, $f(t)$, $R(t)$ y $\lambda(t)$ (denominada en dicha figura $h(t)$), de las funciones de distribución más empleadas en fiabilidad. De ellas nos detendremos en las tres funciones clásicas de fiabilidad $R(t)$, cuyas tasas de fallos, definen las diferentes partes de la curva de bañera de un dispositivo semiconductor de la Figura 3.1. Estas funciones son:

- La función distribución log-normal. Se emplea en el análisis de la fiabilidad de semiconductores y en el análisis de la vida por fatiga de ciertos componentes mecánicos. La función log-normal se define con dos parámetros, μ y σ , que son la media y la desviación estándar del logaritmo de la variable. En el caso de que el valor de σ sea grande comparado con μ el pico máximo de la función densidad está muy cercano al origen y la tasa de fallos ($\lambda(t)$ o $h(t)$) se ajusta al periodo infantil de la curva de bañera. La distribución log-normal es también muy utilizada en estudios de reparabilidad ya que los tiempos de reparación se distribuyen alrededor de una media pero algunas reparaciones se prolongan de forma que queda bien representada por la cola derecha de la función densidad $f(t)$ de la función log-normal.

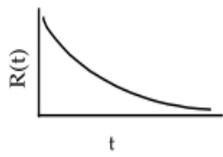
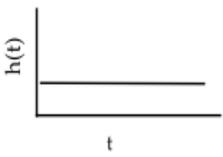
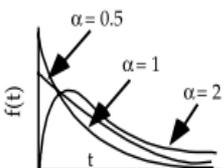
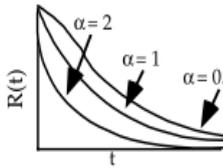
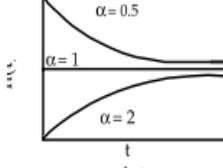
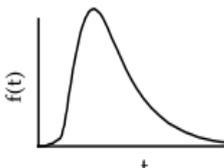
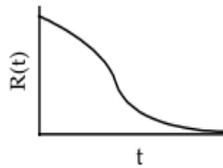
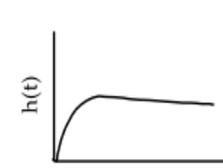
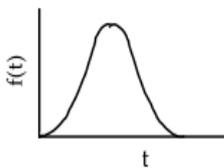
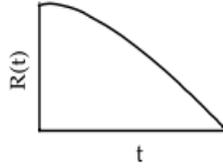
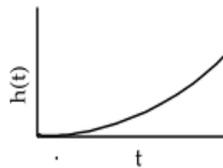
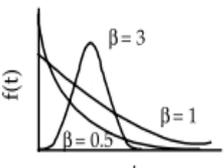
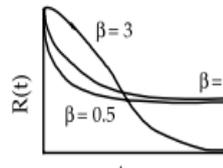
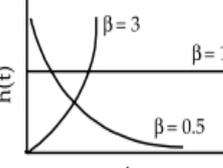
TYPE OF DISTRIBUTION	PROBABILITY DENSITY FUNCTION, $f(t)$	RELIABILITY FUNCTION $R(t) = 1 - f(t)$	HAZARD FUNCTION $h(t) = \frac{f(t)}{R(t)}$
EXPONENTIAL	 $f(t) = \lambda e^{-\lambda t}$	 $R(t) = e^{-\lambda t}$	 $h(t) = \lambda = \theta^{-1}$
GAMMA	 $f(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} (\lambda t)^{\alpha-1} e^{-\lambda t}$	 $R(t) = \frac{\lambda}{\Gamma(\alpha)} \int_t^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt$	 $h(t) = \frac{t^{\alpha-1} e^{-\lambda t}}{\int_t^{\infty} t^{\alpha-1} e^{-\lambda t} dt}$
LOGNORMAL	 $f(t) = \frac{1}{\sigma t (2\pi)} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)^2}$	 $R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)$ See Note	 $h(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi \left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma} \right)}$
NORMAL	 $f(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)^2}$	 $R(t) = 1 - \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)$ See Note	 $h(t) = \frac{f(t)}{1 - \Phi \left(\frac{t - \mu}{\sigma} \right)}$
WEIBULL	 $f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1} e^{-\left[\left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^\beta \right]}$	 $R(t) = e^{-\left[\frac{(t - \gamma)^\beta}{\eta} \right]}$	 $h(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t - \gamma}{\eta} \right)^{\beta-1}$

Figura 3.2: Gráficas de la función densidad, fiabilidad, y tasa instantánea de fallos de las funciones más comúnmente utilizadas para distribuciones continuas. Tomada de la Figura 5.3.1 del MIL-HDBK-338.

- La función distribución de probabilidad Normal o Gausiana, se utiliza en el análisis de fiabilidad de los elementos que sufren una degradación relevante, y por tanto fallan al superar el valor de degradación definido como fallo. La tasa instantánea de fallos, $\lambda(t)$, es creciente, según aumenta el tiempo hay mayor número de fallos relativos en la población respecto a los supervivientes. Por lo tanto, esta función refleja el periodo de vida de envejecimiento de los semiconductores y otros elementos. (Figura 3.1).
- La función distribución de probabilidad exponencial. Es la distribución más utilizada en fiabilidad, y es la empleada para predecir la fiabilidad de equipos electrónicos a partir de la norma MIL-HDBK-217F "Military Handbook: Reliability Prediction of Electronic Equipment" [MHDBK91]. La función exponencial describe el periodo de vida útil (Figura 3.1) donde la tasa de fallos es constante y se aplica a la fiabilidad de la mayoría de dispositivos semiconductores con bajo estrés, una vez eliminados los fallos infantiles por defectos de fabricación. El que no existan fallos infantiles en un lote ocurre o bien por tratarse de la producción de un dispositivo electrónico con la tecnología madura, o mediante la realización de un cribado a un lote de dispositivos para tener aún una mayor garantía de no sufrir fallos infantiles y por tanto tener una tasa de fallos constante durante la vida.

En el caso de la distribución exponencial, la función de densidad de probabilidad de fallos se define con un único parámetro λ :

$$f(t) = \lambda e^{-\lambda t} \quad (3.8)$$

Las funciones infiabilidad y fiabilidad, empleando las ecuaciones (3.2) y (3.3) son:

$$F(t) = 1 - e^{-\lambda t} \quad (3.9)$$

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (3.10)$$

Y la función tasa de fallos, a partir de la ecuación (3.5) :

$$\lambda(t) = \frac{f(t)}{R(t)} = \lambda \quad (3.11)$$

Como se puede ver de la ecuación (3.11) la tasa de fallos es constante para todo t .

El cálculo de la vida media es sencillo con la fórmula (3.7):

$$MTTF = \int_0^{\infty} R(t)dt = \int_0^{\infty} e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \quad (3.12)$$

Por lo tanto, en el caso de la función exponencial la tasa de fallos es constante y el $MTTF$ es inversamente proporcional a la tasa de fallos.

3.3.1. La función distribución de Weibull

La distribución de Weibull es ampliamente utilizada en fiabilidad debido a su gran versatilidad, ya que puede ajustar las funciones de fiabilidad de elementos en cualquier de las tres etapas de la curva de bañera. La función de distribución de Weibull fue desarrollada por el ingeniero sueco Waloddi Weibull en 1937 [Wei39] pero no fue ampliamente utilizada hasta su publicación en Estados Unidos en 1951 [Wei51]. Inicialmente se empleó para describir la fatiga mecánica de cojinetes [Wei51], pero se extendió rápidamente a otras aplicaciones entre ellas la fiabilidad porque los resultados eran muy buenos reflejando la vida de las muestras ensayadas, incluso cuando en el ensayo se habían empleado pocas muestras. Weibull observó que el comportamiento medido en sus ensayos no se veía satisfactoriamente modelado con las tres funciones clásicas descritas en la sección anterior y definió una función muy versátil con tres parámetros a partir de la cual, en función del valor de los parámetros, se puede aproximar a cualquiera de las tres funciones clásicas.

La función distribución de Weibull se define con tres parámetros

- γ , parámetro de origen (sólo se considera $t \geq \gamma$) que muestra a partir de que tiempo, origen, empiezan a fallar los elementos.

- β , parámetro de forma que muestra en que periodo de vida de la curva de bañera se encuentra el elemento.
- η , parámetro de escala.

Las funciones de densidad de fallos, distribución de fallos (defiabilidad) y fiabilidad para la función de Weibull son:

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.13)$$

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.14)$$

$$R(t) = e^{-\left(\frac{t-\gamma}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.15)$$

La vida media o esperanza matemática, es decir el *MTTF* para elementos no reparables, es:

$$\theta = E(\tau) = \gamma + \eta \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3.16)$$

Donde $\Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right)$ es el valor de la función gamma, $\Gamma(x)$, para $x=1+1/\beta$.

La función de tasa de fallo de la función de Weibull es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t - \gamma)^{\beta-1} \quad (3.17)$$

El análisis de la función $F(t)$ depende de estos tres parámetros, pero es habitual trabajar considerando $\gamma = 0$, lo que simplifica el análisis a dos parámetros β y η . La simplificación realizada permite un análisis adecuado en la inmensa mayoría de los casos, ya que el valor de γ es habitualmente 0 (esto implica que la función de probabilidad de fallo comienza en $t=0$) o su valor es muy pequeño comparada con la otra variable temporal η .

Si asumimos que $\gamma = 0$, los parámetros y funciones de fiabilidad de Weibull se simplifican de la siguiente forma:

La vida media o esperanza matemática, es decir el *MTTF* para elementos no reparables, es:

$$\theta = E(\tau) = \eta \Gamma \left(1 + \frac{1}{\beta} \right) \quad (3.18)$$

La función de tasa de fallo es:

$$\lambda(t) = \frac{\beta}{\eta^\beta} (t)^{\beta-1} \quad (3.19)$$

La función deficiencia es:

$$F(t) = 1 - e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.20)$$

Para analizar si una serie de datos de fallo siguen una distribución de Weibull y obtener los parámetros que los caracterice es necesario linealizar la función de Weibull. Para ello se realizan los siguientes pasos.

A partir de la ecuación (3.20) se obtiene la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{(1 - F(t))} = e^{\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta} \quad (3.21)$$

Se toman logaritmos neperianos a ambos lados de la ecuación:

$$\ln \left(\frac{1}{(1 - F(t))} \right) = \left(\frac{t}{\eta} \right)^\beta \quad (3.22)$$

Tomando otra vez logaritmos neperianos:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{(1-F(t))}\right)\right) = \beta(\ln(t)) - \beta(\ln(\eta)) \quad (3.23)$$

A partir de la ecuación anterior definimos las variables, x e y:

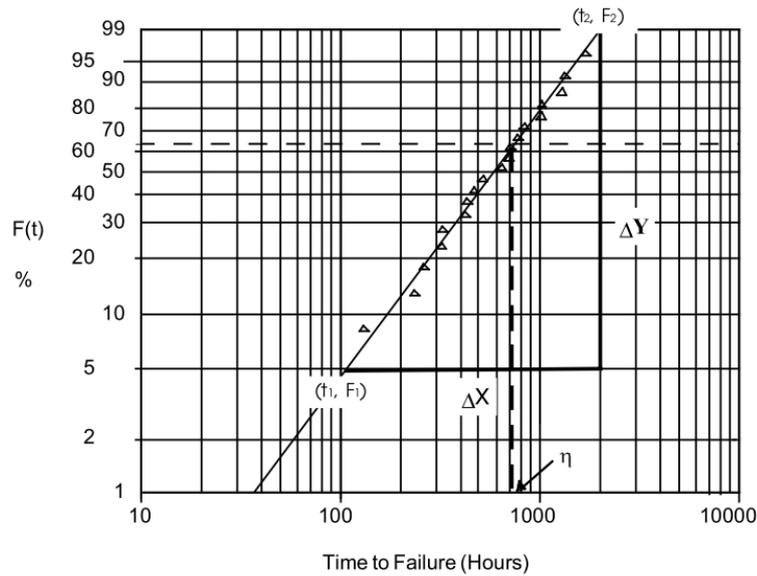
$$y = \ln\left(\ln\frac{1}{(1-F(t))}\right) \quad (3.24)$$

$$x = \ln(t)$$

La representación de $y = \ln\left(\ln\frac{1}{(1-F(t))}\right)$ con respecto a $x = \ln(t)$ se le denomina representación gráfica de Weibull. Si la representación de y con respecto a x se ajusta a una línea recta se puede deducir que la fiabilidad del elemento bajo ensayo sigue una distribución de Weibull. A partir de la recta obtenida y mediante una regresión lineal se evalúan los parámetros de la distribución, β y η :

- β o parámetro de forma es la pendiente de la recta.
- η es el instante en que la deficiencia $F(t=\eta) = 1-e^{-1} = 0,63212$ (ecuación (3.20)).

La forma tradicional de evaluar los parámetros de Weibull era utilizar el gráfico probabilístico de Weibull para realizar la representación de la probabilidad de fallo ($F(t)$), y extraer los parámetros de modo gráfico. Sin embargo, en la actualidad se utilizan herramientas de hojas de cálculo o de forma más específica herramientas de estadística de fiabilidad para evaluar estos dos parámetros. En la Figura 3.3 se observa un gráfico probabilístico de Weibull con los resultados de un ensayo acelerado (triángulos), sobre el que se ha reflejado el modo de obtener los dos parámetros de la función β y η , y su valor.



$$\eta = 739.41$$

$$\beta = \frac{\Delta Y}{\Delta X} = \frac{\ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(t_2)} \right) - \ln \ln \left(\frac{1}{1 - F(t_1)} \right)}{\ln t_2 - \ln t_1} = 1.53$$

Figura 3.3: Diagrama de Weibull y extracción de los parámetros de la función. Tomado de la figura 8.3-2 del manual MIL-HDBK-338B [MHDBK98]. Con estos valores de η y β el cálculo de θ o *MTTF* es 694,5 horas.

La gran ventaja de la función de Weibull, es que los valores de sus parámetros, como los obtenidos en la Figura 3.3, nos indican directamente información relevante sobre la función deficiencia $F(t)$, y por tanto sobre la función fiabilidad $R(t)$:

- La vida media (θ) o esperanza matemática de la función depende de los parámetro β (parámetro de forma) y η (parámetro de escala) pudiéndose realizar un cálculo exacto mediante la ecuación (3.16). Para el caso especial donde $\beta = 1$, $R(t)$ es la función exponencial, y resulta que $\theta = \eta$
- El valor de β nos indica como es la tasa de fallos $\lambda(t)$:
 - **Si $\beta < 1$** la tasa de fallos es decreciente con el tiempo, la tasa de fallos mejora con el tiempo transcurrido, lo que se corresponde habitualmente en la curva de bañera con un comportamiento de mortalidad infantil, lado izquierdo de la curva de bañera, Figura 3.1.

- Si $\beta=1$ la tasa de fallos es constante, no depende del tiempo. Esto se corresponde con la vida útil de la curva de bañera, se producen fallos de forma aleatorios a lo largo del tiempo. La función de Weibull para este caso es la función exponencial $R(t)=e^{-(t/\eta)}$, $\theta=\eta=MTTF=1/\lambda$.
 - Si $\beta > 1$ la tasa de fallos es creciente. Esto se corresponde con la zona de envejecimiento que es la zona derecha de la curva de bañera.
- Figura 3.1

Como se ha apreciado en la discusión, la función de Weibull puede ajustar a funciones de fiabilidad que se encuentran en las tres etapas de la curva de bañera, Figura 3.1. En la Figura 3.4 están reflejadas las tres etapas de la curva de bañera a partir de funciones de Weibull realizadas mediante un valor constante de η y diferentes valores de β .

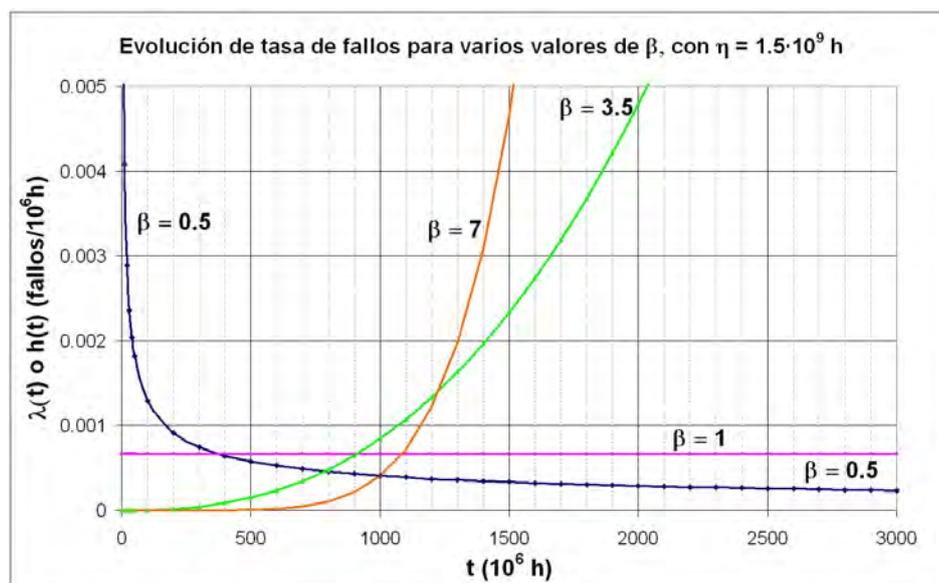


Figura 3.4: Tasa de fallos obtenida mediante la función Weibull con dos parámetros, $\eta = 1,5 \cdot 10^9$ h, y cuatro valores de β , 0,5, 1, 3,5 y 7.

Debido a la gran versatilidad de la función distribución de Weibull es ampliamente utilizada en análisis de fiabilidad, y es la que se va a utilizar en parte del análisis de fiabilidad de esta tesis.

3.4. Conclusiones

En este capítulo se ha realizado una breve introducción a la teoría de fiabilidad para una comprensión mayor del análisis de los resultados de los ensayos acelerados de fiabilidad. Como resumen de este capítulo podemos destacar:

- Se han descrito las principales funciones de fiabilidad como la función densidad probabilidad de fallos, $f(t)$, función probabilidad de fallos, $F(t)$ o $Q(t)$, función fiabilidad, $R(t)$ y la función tasa de fallos, $\lambda(t)$.
- Se ha descrito el parámetro de *MTTF* (Mean Time to Failure – Tiempo Medio Hasta el Fallo), como calcularlo y las limitaciones de su utilización como referencia de la fiabilidad del elemento bajo ensayo.
- Se han descrito las funciones de distribución estadísticas más utilizadas en fiabilidad como la log-normal, normal, exponencial y Weibull. Estas dos últimas distribuciones se han analizado con más detalle por ser las más utilizadas en fiabilidad, y la última de ellas, la empleada en parte del análisis de nuestros resultados.
- Se ha descrito la importancia de la función estadística de Weibull en la teoría de fiabilidad y los métodos para evaluar los parámetros de Weibull a partir del resultado del ensayo reflejado en papel probabilístico de Weibull.

Capítulo 4

ENSAYOS ACELERADOS EN CÉLULAS SOLARES DE CONCENTRACIÓN

4.1. Introducción

Los ensayos acelerados son una herramienta empleada en análisis de fiabilidad muy experimentada y utilizada habitualmente, estos ensayos permiten analizar la calidad de los dispositivos electrónicos tanto a corto como a largo plazo, toda la vida operativa del dispositivo. Aunque existen muchos tipos diferentes de ensayos acelerados, el ensayo típico consiste en estresar un parámetro que afecta al dispositivo manteniendo el resto de parámetros constantes en condiciones nominales de trabajo, se puede estresar un parámetro propio del dispositivo como su tensión o un parámetro externo ambiental como la temperatura.

El sobreestres en el ensayo acelerado con respecto a los valores nominales de trabajo aceleran los procesos que ocasionan degradación del dispositivo y los fallos catastróficos, por lo que aceleran la vida del dispositivo. Si se contrasta que existe un modelo que relaciona el comportamiento del dispositivo a diferentes niveles de estrés, por ejemplo niveles de temperatura de ensayo acelerado, se puede identificar el comportamiento en tiempo real aplicando el modelo para la temperatura nominal de trabajo del dispositivo. Con lo que, con varios ensayos acelerados de corta duración (semanas o meses) por una parte se puede predecir la proporción de degradación o fallos de una tecnología de dispositivos en función del tiempo de trabajo durante toda su vida (30 años), y además se tiene un procedimiento para comprobar en unas semanas de ensayo acelerado si mejoras de diseño o materiales producirán una mejora de calidad del dispositivo a largo plazo, es decir, una mejora de la fiabilidad.

En la próxima sección de este capítulo analizaremos los diferentes tipos de ensayos aplicados actualmente a los módulos y células solares III-V de concentración, y explicaremos la necesidad de plantear nuevos tipos de ensayos acelerados que se aplican habitualmente a otros dispositivos, incluidos los optoelectrónicos, pero que por lo que nosotros conocemos, nunca se han aplicado al menos de la forma exhaustiva que se desarrolla en esta tesis, sobre células III-V de concentración terrestre. Propondremos la realización de ensayos de tipo vida acelerada (ALT – Accelerated Life Test) en temperatura.

En los ensayos de vida acelerada (ALT) es necesario poner al dispositivo en condiciones nominales de trabajo eléctrico dentro de la cámara climática y aumentar sensiblemente la temperatura a la que trabaja en la cámara para acelerar su vida,

mientras que a la vez se evalúa la evolución de las prestaciones del dispositivo durante el ensayo.

Los ensayos de vida acelerada tienen que ir acompañados de modelos estadísticos que permitan evaluar el factor de aceleración en tiempo, entre el periodo de tiempo del ensayo acelerado y el periodo de tiempo equivalente en condiciones nominales de funcionamiento. A partir del análisis de los tipos de ensayos acelerados se justifica el plan de trabajo experimental de la tesis, que se presenta en la sección 4.3 que identifica las actividades concretas del *plan de evaluación de fiabilidad de células de concentración III-V* que proponemos para evaluar la fiabilidad de las células III-V de concentración terrestre. Finalmente incluimos una sección de conclusiones.

4.2. Ensayos acelerados para evaluación de la fiabilidad

La principal razón que justifica la realización de nuevos ensayos acelerados con nuevos procedimientos para la evaluación de la degradación y fiabilidad de las células solares III-V de concentración, es la necesidad de la industria fotovoltaica de concentración de obtener datos de fiabilidad en un corto periodo de tiempo, para facilitar y asegurar la comercialización, de un producto con una vida esperada de 30 años.

Como se ha reflejado en el capítulo 2 de estado de arte en fiabilidad, el grupo de investigación que más a trabajado mediante ensayos acelerados, en degradación y fiabilidad con intención de encontrar respuestas al comportamiento de la célula a largo plazo ha sido el Grupo de Semiconductores III-V del IES-UPM. La mayoría de las empresas y algunos centros de investigación se han centrado fundamentalmente en el control de calidad y mejora de diseño de los materiales, célula y ensamblaje con consecuencias a corto plazo. Esta afirmación será más evidente tras analizar los tipos de ensayos acelerados que existen.

Esta falta de resultados experimentales de fiabilidad en células solares de concentración, que se acercan a la fase de industrialización hacía necesario un análisis detallado de los diferentes tipos de ensayos acelerados aplicados a células de concentración antes de la realización de esta tesis, y la comparación de estos ensayos con los que serían necesario para obtener nuestro objetivo, la evaluación de la fiabilidad de las células de concentración III-V.

4.2.1. Ensayos acelerados en concentración fotovoltaica

La motivación de los ensayos acelerados es amplia ya que va desde identificar las debilidades del producto, o comparar varios suministradores o diseños alternativos, hasta por último evaluar la fiabilidad y sus parámetros, lo que permite cuantificar el coste de la garantía y el mantenimiento antes de comercializar el producto. La necesidad de comercializar cada vez más rápido nuevos productos y con un nivel de calidad elevado ha obligado en las últimas décadas al desarrollo de los ensayos acelerados a materiales, componentes electrónicos y equipos.

Se pueden plantear varios **enfoques sobre la clasificación** de los ensayos acelerados, en función del propósito de los ensayos, como función de los tipos de resultados que se obtienen, en función del planteamiento del ensayo; las variables que se estresan y a que nivel.

En esta memoria **vamos a enfocar los ensayos acelerados en el área de los componentes y sistemas fotovoltaicos de concentración en función del propósito del ensayo**. Dentro de la fiabilidad el término “ensayo acelerado” se emplea para describir dos tipos de ensayos diferentes, con propósitos totalmente distintos [Yuang07][EM06][Nel90]:

- 1). **ENSAYOS ACELERADOS CUALITATIVOS**. Se realizan a un número pequeño de componentes y el propósito es identificar sus debilidades, se evalúa si el componente llega a un límite que se considera fallo en dicho ensayo. Dentro de estos ensayos los podemos subdividir en dos tipos según el propósito; el primero evalúa o cualifica si existen fallos o si se supera o no un nivel de degradación definido específicamente para cada ensayo, el segundo se prolonga en tiempo o se sobre-estresa hasta que aparecen fallos en el producto y de esta forma identificar los puntos débiles. Estos dos subtipos se denominan:
 - o **1.a) Ensayos acelerados de cualificación**, como los incluidos en la Norma IEC 62108, el objetivo es identificar mediante ensayos si los productos van a superar un determinado nivel de calidad durante unos años de uso, habitualmente por debajo de sus expectativas de vida (25 o 30 años). De este tipo de ensayos se componen las normas de cualificación, donde las condiciones de ensayo están definidas y el

tiempo de ensayo es limitado. En cada ensayo descrito en las normas de cualificación se pretende identificar si el producto tiene un nivel de calidad suficiente respecto a modos de fallo que han sido previamente identificados en campo, o ensayos de vida acelerados exhaustivos. Si el producto supera los ensayos descritos en la norma de cualificación, es decir, no ha fallado catastróficamente y su degradación no es mayor que la especificada en la norma, se concluirá que el producto ha pasado la norma. Con estos ensayos no se demuestra que el producto funcionará adecuadamente durante toda su vida operativa, es decir el propósito no es evaluar en ningún caso la fiabilidad, sino que se garantiza que no se producirán durante un periodo relativamente prolongado pero no especificado, los defectos más habituales identificados en este producto.

- **1.b) Ensayos de vida muy acelerados (HALT - Highly Accelerated Life Test)**, que en el comienzo de su desarrollo, en 1990, Nelson identificó como “elephant tests” [Nel90]. Los ensayos se realizan mediante un estrés muy grande en alguna de las variables, por encima del límite operacional, hasta el fallo del producto. El estrés aplicado depende de las debilidades que se quieren detectar: si se quieren evidenciar debilidades mecánicas se aplica vibración, si se buscan debilidades eléctricas se aplica corriente o tensión, si se quiere evidenciar el comportamiento de los materiales ante el tipo de ambiente se aplica temperatura o humedad. Los objetivos suelen ser identificar cuales son las debilidades importantes del producto, o comparar dos diseños del producto o de dos suministradores diferentes.

2). ENSAYOS ACELERADOS CUANTITATIVOS. Denominados “ensayos de vida acelerada” (ALT - Accelerated Life Test). El propósito es evaluar (estimar) la fiabilidad, es decir la probabilidad de fallo a lo largo de la vida del dispositivo. Para ello es necesario utilizar modelos de aceleración, normalmente basados en la física del dispositivo, que permitan extrapolar los resultados de la célula o producto durante el ensayo acelerado a resultados en tiempo real y condiciones nominales de trabajo.

En los ensayos de vida acelerados (ALT) **se pueden medir dos tipos diferentes de respuesta del componente durante el ensayo**, las medidas pueden ser:

- *Medidas del instante hasta el fallo* de cada componente. Habitualmente se utiliza en componentes que fallan de forma catastrófica durante los ensayos acelerados y permiten evaluar la fiabilidad del componente (probabilidad de funcionamiento), pero no la evolución de las características del componente previas al instante de fallo. El análisis de los resultados incluye el análisis del mecanismo de fallo, y la evaluación de las diferentes funciones y parámetros de fiabilidad.
- *Medidas de la degradación a lo largo del tiempo de ensayo de cada componente*. Para cada componente y en cada instante de medida del ensayo, se miden las prestaciones del componente y por lo tanto su degradación, además si aparece algún otro fallo de tipo catastrófico también queda identificado. Las prestaciones que se caracterizan son aquellas por las que está definido el fallo de degradación. La ventaja de los ensayos acelerados donde los componentes se degradan hasta el fallo es que se puede inferir la fiabilidad antes de que se produzcan los fallos, si se supone que la evolución de la degradación seguirá hasta el fallo la evolución observada en los ensayos. Otra ventaja, es que los resultados son más cercanos a la física del fallo por lo que la extrapolación de los modelos de aceleración es mucho más confiable. Por último y como realizaremos en nuestros ensayos se puede evaluar la fiabilidad en función del nivel de degradación que se considere fallo. Por el contrario, el principal inconveniente es que el análisis de los resultados de degradación hasta llegar a la función fiabilidad es más complejo que en el caso anterior, se puede observar el planteamiento general en [Nel81] [MEL98] [Yan07].

Tabla 4.1: Comparativa entre los tipos de ensayo acelerados sobre células III-V y módulos de SFC.

TIPOS DE ENSAYOS ACELERADOS EN CÉLULAS Y MÓDULOS DE SFC			
ASPECTO	ENSAYOS ACELERADOS CUALITATIVOS <i>(Tipos de ensayos previos a la TESIS)</i>		ENSAYOS ACELERADOS CUANTITATIVOS <i>(Ensayos de la TESIS)</i>
	Ensayos acelerados de cualificación	HALT -Ensayo de vida muy acelerada	ALT -Ensayo de vida acelerada
Objetivo general	Ofrecer nivel mínimo de calidad-duración	Mejorar la fiabilidad	Estimar la fiabilidad
Objetivo industrial	Introducir un diseño específico en el mercado	Comparar múltiples diseños, mejorar la técnica, prestaciones o el coste	Con la fiabilidad estimada calcular el coste garantía, logística y mantenimiento
Procedimiento y propósito	Ensayo mínimo de fiabilidad/duración de un diseño específico de módulo	Ensayo extenso de cualificación que compara fiabilidad/duración de varios diseños	Ensayo exhaustivo mide la fiabilidad/duración de un diseño específico, en condiciones reales de trabajo
Información ensayo	Bajo	Medio	Alto
Coste	Bajo	Medio	Alto
Cuando realizarlo	Tras el desarrollo	En fase de diseño y desarrollo	En fase de diseño, desarrollo y después
Periodo de ensayo	Muy corto	Corto	Medio
Tamaño de muestra	Muy pequeño	Pequeño	Medio o grande
Tipo de estrés	Cualquiera que haya producido fallos en campo	Cualquiera, tan fuerte como para que sea efectivo (fallo)	Cualquiera que pueda extrapolarse a estrés en campo
Severidad del estrés	Debajo del límite operacional	Hasta el límite de destrucción	Debajo del límite operacional
Patrón de aplicación del estrés	Constante, escalonado, progresivo, cíclico, aleatorio etc.	Estrés escalonado, cíclico.	Constante, escalonado, progresivo, cíclico, aleatorio etc.
Análisis datos vida	No	No habitualmente	Si
Análisis de fallos	Opcional	Si	Opcional
Los modos de fallo ocurren en campo	Si	Es incierto	Si
Los fallos se deben principalmente a:	Carencia de robustez, o errores de diseño	Errores de diseño	Carencia de robustez, o errores de diseño
Modelo extrapolación a condiciones reales	No habitualmente	No habitualmente	Si habitualmente, requiere determinar el modelo
Protocolo de ensayo	Existe una norma de protocolo de ensayo	Existen protocolos, pero debe diseñarse uno específico	No. Desarrollar un protocolo específico a partir de conocer los modos y mecanismos de fallo y modelos
Usuario	Fabricante/Inversores/Consumidores/	Fabricante/ Inversores/Consumidores/	Fabricante

En la Tabla 4.1, se han explicado las diferencias entre los tipos de ensayos acelerados; ensayos acelerados cualitativos que se subdividen en ensayos acelerados de cualificación y los ensayos HALT, y ensayos acelerados cuantitativos ALT (ensayos de vida acelerada) que proponemos en esta tesis para la evaluación de la degradación y fiabilidad. Esta comparación se basa en nuestra experiencia y la información de [Yan07] y [Tam10].

Hasta la realización de esta tesis, tanto en células solares de concentración III-V como en paneles de SFC se habían realizado ensayos acelerados fundamentalmente cualitativos, entre los que podemos destacar:

- Ensayos de cualificación en módulos fotovoltaicos de concentración, los empleados en la Norma IEC 62108 [IEC62108] “Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies - Design qualification and type approval”.
- Ensayos de vida muy acelerada HALT puramente cualitativos, con estreses fortísimos que pueden superar los límites de operación de las células, como los realizados con humedad en [vRBW03].
- Ensayos de vida muy acelerados HALT, en concreto los de tipo escalonados en temperatura, realizados en la tesis [Gon08] desarrollada en el IES-UPM y que han sido los precursores de esta tesis como se ha explicado en los capítulos 1 y 2, y donde se obtuvieron tanto resultados cualitativos como cuantitativos, ensayando el mismo tipo de células que nosotros, pero sin encapsular. En el trabajo se presenta como conclusión que se estima para el mecanismo de fallo identificado un rango de Energías de Activación posibles (entre 0,7 y 1,1), en la siguiente sección se explica como se obtiene y la utilidad de este parámetro. En cuanto a las estimaciones cuantitativas de MTTF y fiabilidad hay que considerar que no son extrapolables a nuestros ensayos por las diferentes condiciones en las que se encuentran las células, en este ensayo sin encapsular y en el nuestro encapsuladas.

Por otra parte están los ensayos en tiempo real y campo de módulos de concentración. Es un tipo de ensayo que no es acelerado, normalmente estos ensayos se limitan a un año de vida y evalúan la calidad del diseño a corto plazo para afrontar un rediseño que ofrezca mejores prestaciones, por ejemplo son los realizados en [Aa05]

[SF08] [HTCW+09] [Emcore10] [Emcore10a]. En el IES-UPM se realizó un ensayo en paneles de concentración en tiempo real y campo [Gon08][GVAN11] donde se obtuvieron conclusiones sobre la calidad de los elementos del panel, los valores de degradación de potencia generada durante el ensayo (1 año), y además se define un modelo matemático para poder estimar la fiabilidad a largo plazo a partir del comportamiento del panel durante los primeros años de vida.

En los ensayos de vida acelerada (ALT) que hemos desarrollado en la tesis, el procedimiento es; acelerar la vida de la célula mediante estrés en temperatura respecto a las condiciones nominales de trabajo, además simular lo mejor posible las condiciones de trabajo en campo, y caracterizar las células dentro de una cámara climática durante el ensayo de vida acelerada. Si existe una relación entre los resultados obtenidos por los diferentes ensayos realizados a altas temperaturas, es posible calcular el Factor de Aceleración en tiempo entre el periodo de ensayo acelerado y el periodo de vida real equivalente, que en el caso de ensayos de fiabilidad relaciona:

- El instante de fallo del componente durante el ensayo acelerado, con el instante de fallo equivalente en condiciones de vida reales.
- El tiempo (periodo) de ensayo con una degradación dada durante el ensayo acelerado, con el tiempo (periodo) en condiciones de vida nominales en campo con la misma degradación.

A partir de estos resultados se puede evaluar la fiabilidad y sus parámetros en condiciones nominales de funcionamiento.

El planteamiento de la tesis se diferencia respecto a otros trabajos en el objetivo, que es la evaluación cuantitativa de la degradación y fiabilidad de la célula en condiciones nominales de trabajo durante toda su vida, y experimentalmente en la utilización de ensayos acelerados del tipo vida acelerada (ALT) en temperatura, este procedimiento es innovador en esta área, ya que por lo que conocemos, ningún centro de investigación lo ha aplicado antes y está claramente diferenciado respecto al estado del arte previo.

4.2.2. Modelos para evaluar la aceleración de los ensayos

La interpretación de los ensayos acelerados requiere de modelos que obtengan el factor de aceleración entre los ensayos acelerados a distintos niveles de estrés, y por tanto el modelo para extrapolar los resultados del ensayo acelerado a las condiciones nominales de funcionamiento en campo para el estrés nominal de trabajo.

Lo habitual es que durante los ensayos se produzcan múltiples procesos que concluyen en fallo del dispositivo, pero habitualmente uno de ellos es el dominante y el que antes produce la condición de fallo, y por tanto sólo es necesario identificar el factor de aceleración del mecanismo de fallo dominante. En gran parte de los ensayos el modelo matemático obtenido está basado en un proceso físico/químico ya identificado previamente en este u otro tipo de dispositivos similares.

Existen modelos de aceleración para numerosos tipos de estrés tanto ambientales; como la temperatura, la humedad y los ciclos térmicos, como eléctricos; como la tensión o la corriente, este tema está tratado ampliamente en [Nel90].

Para la realización de los ensayos acelerados en células solares de concentración hemos seleccionado la temperatura como sobreestrés al ser el más utilizado para los ensayos acelerados debido a que los modelos de aceleración en temperatura están ampliamente contrastados en numerosos dispositivos y equipos. Dentro de estos modelos el de Arrhenius es ampliamente utilizado ya que se cumple en la mayoría de los casos, aunque existen otros modelos alternativos como el Eyring [Nel90] que se deriva del modelo Arrhenius. Debido a que nuestro experimento ha seguido el modelo de Arrhenius será en el que nos extenderemos a continuación.

La ley o el modelo de Arrhenius [Arrhe1889] fue desarrollado por Svante August Arrhenius, un químico-físico sueco que obtuvo el premio Nobel en 1903. Esta ley se desarrolló para interpretar resultados experimentales concretos, tales como la influencia de la temperatura en la velocidad de una reacción química, pero su uso se ha extendido a otras áreas [DM84] entre las que se encuentra la fiabilidad de dispositivos semiconductores [EM06][Nel90][Sch96].

El modelo de Arrhenius se basa en la idea de que la velocidad de la reacción química es proporcional al número de moléculas con energía térmica suficiente para superar la barrera energética que produce la reacción, cuya energía depende del

proceso y se le denomina Energía de Activación del proceso. La velocidad de la reacción depende de la temperatura de la siguiente forma:

$$v(T) = v_0 e^{\frac{-E_A}{kT}} \quad (4.1)$$

Donde T es la temperatura en Kelvin, k es la constante de Boltzman y E_A es la energía de activación de la reacción.

Para los modelos de aceleración en fiabilidad se tiene en cuenta que existe una relación inversa entre la velocidad de la reacción física-química que produce el fallo y el tiempo en el que se produce. De esta forma, cuando se aplica esta ley a parámetros temporales de dispositivos sometidos a ensayos de vida acelerada se obtiene la relación vida-estrés de Arrhenius (Arrhenius life-stress model), que se expresa del siguiente modo:

$$L(T) = A e^{\frac{E_A}{kT}} \quad (4.2)$$

$L(T)$ indica una característica temporal cuantificable de la vida del componente y que es dependiente de T (temperatura), por ejemplo; el *MTTF*, o el instante de tiempo en que un parámetro eléctrico del componente se ha degradado durante el ensayo un % definido. k es la constante de Boltzmann ($k = 8,617343 \times 10^{-5}$ eV/°K), y E_A es la energía de activación del mecanismo que causa el fallo o la degradación. A es un parámetro de Arrhenius que depende del valor seleccionado de $L(T)$, y que no es necesario para obtener el Factor de Aceleración.

El Factor de Aceleración (*FA*) en tiempo entre dos temperaturas, T_1 y T_2 , del mecanismo de degradación que ha causado los fallos, se puede obtener a partir de la ecuación (4.2) como:

$$FA = \frac{L(T_1)}{L(T_2)} = \exp \left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \right] \quad (4.3)$$

De esta forma si conocemos $L(T)$ en un ensayo acelerado podríamos extrapolar dicho valor a la temperatura del componente en condiciones normales de funcionamiento utilizando la ecuación (4.3). Sin embargo, el principal problema para utilizar esta ecuación es que, en muchos casos, la energía de activación es

desconocida, de hecho uno de los motivos habituales de los ensayos acelerados es obtener el valor de la energía de activación del mecanismo de fallo predominante.

La E_A del mecanismo de fallo que determina los resultados del ensayo, se puede evaluar a partir de al menos tres valores de $L(T)$ obtenido a tres temperaturas diferentes y representándolos en una representación linealizada de la ecuación (4.2) [Sch96], considerando en el eje de ordenadas $\ln(L(T))$ y en abscisas $(1/kT)$:

$$\ln(L(T)) = E_A \cdot (1 / kT) + \ln(A) \quad (4.4)$$

Donde la pendiente de esta representación lineal es la energía de activación, E_A .

El rango de valores de E_A para los diferentes mecanismos de fallo de los dispositivos semiconductores tiene aproximadamente valores entre 0,3 eV y 1,4 eV [MHDBK98], pero puesto que E_A está en la exponencial de la ecuación (4.3) del Factor de Aceleración pequeñas variaciones de E_A afectan de forma importante a los Factores de Aceleración. En la Figura 4.1 se reflejan los Factores de Aceleración en representación logarítmica para un dispositivo que tiene una temperatura de uso de 60 °C, y que se ha ensayado hasta los 170 °C, para valores de E_A entre 0,6 eV y 1,4 eV. De la Figura 4.1 se puede observar la gran influencia de la temperatura y Energía de Activación en el Factor de Aceleración, y los elevados factores de aceleración en tiempo para valores altos de E_A que pueden ser superiores a 10.000. Para este valor de FA una hora de ensayo acelerado supone más de un año de vida del dispositivo.

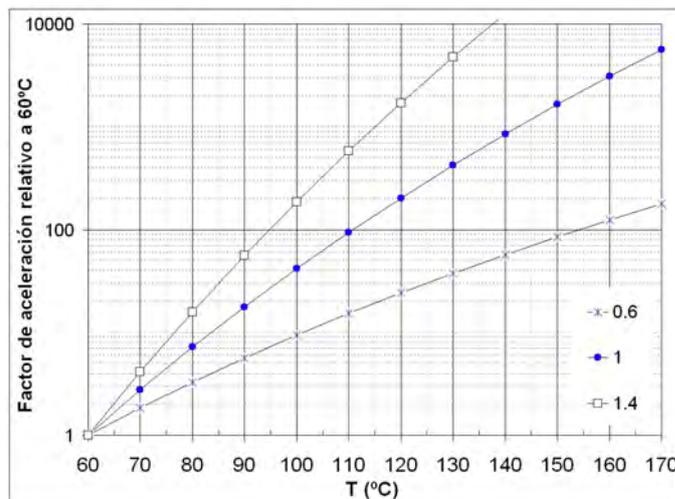


Figura 4.1. Factor de aceleración en tiempo con respecto una temperatura de operación de 60 °C, en función de la temperatura de ensayo acelerado (T), para tres valores de $E_A = 0,6$ eV, 1,0 eV y 1,4 eV.

4.3. Plan de evaluación de la fiabilidad

A partir de los factores mencionados en las secciones anteriores, se planteó el plan de evaluación de fiabilidad publicado en [NGVA+08] que se corresponde básicamente con las actividades realizadas en esta tesis, al que hemos añadido las actividades previas y precursoras de esta tesis mostradas en la introducción, Figura 4.2.

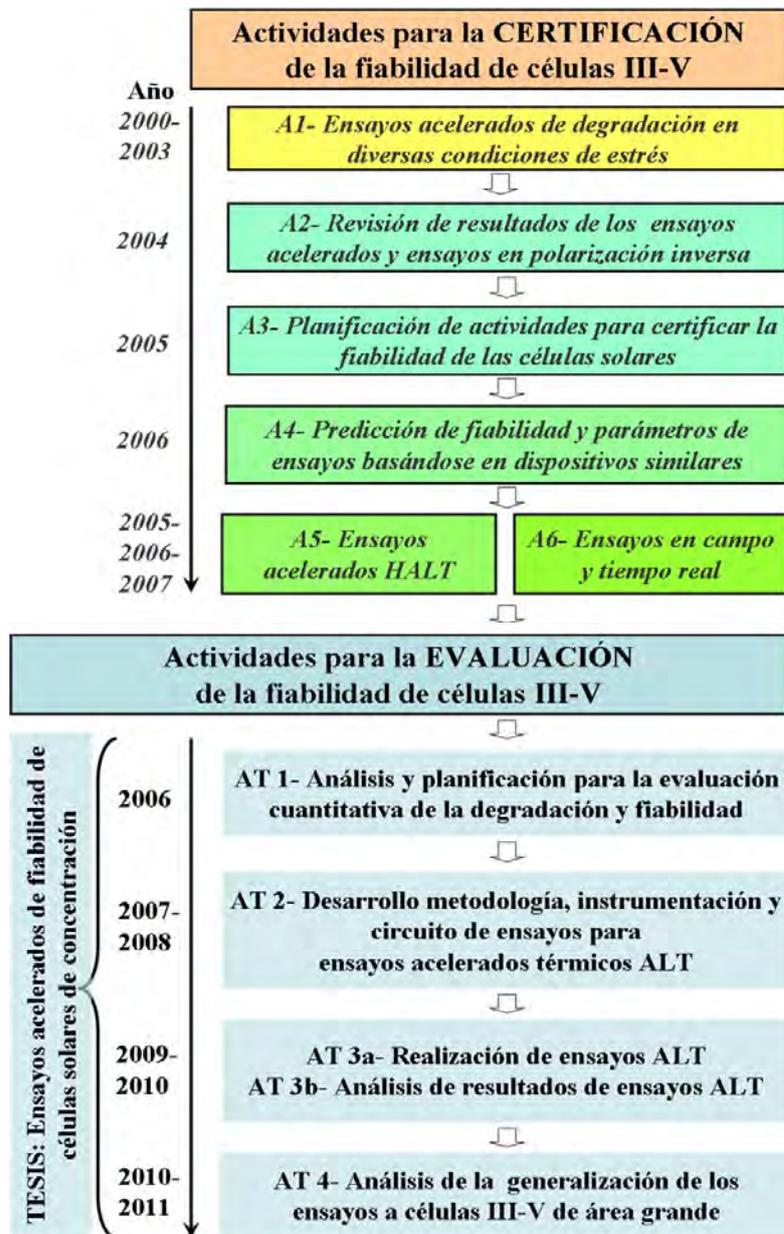


Figura 4.2: Plan de evaluación de fiabilidad. En la zona inferior Actividades de la Tesis (AT) para la evaluación cuantitativa de la fiabilidad de células de concentración III-V. En la zona superior y cursiva actividades previas a esta tesis.

De las actividades de la Figura 4.2 las actividades A1 a A6 son previas a esta tesis y han sido referenciadas y explicadas en los capítulos 1 y 2 de esta memoria. Las actividades de esta tesis como se indica son de la **AT 1** a la **AT 4**, cuyo periodo temporal de realización se ha reflejado en la figura.

Como se puede ver en la Figura 4.2 el plan de actividades para la evaluación de la fiabilidad se divide en las siguientes **ACTIVIDADES DE LA TESIS DOCTORAL**:

1. **Actividad AT 1:** En esta actividad se analizó el estado del arte en estudios de degradación y ensayos acelerados sobre células de concentración III-V, con el objetivo de planificar una estrategia que permitiese evaluar cuantitativamente la fiabilidad de las células de concentración [NVGA+08].
Plan de evaluación de fiabilidad Figura 4.2.
2. **Actividad AT 2:** En esta actividad se encuadra el diseño [Núñez06] y fabricación de los circuitos del ensayo, y el desarrollo de una instrumentación específica para simular las condiciones nominales de funcionamiento de las células y medir la degradación en potencia durante los ensayos acelerados. Se desarrolla la metodología [NVGA+10] y la instrumentación [NVGA+09][NVGJ+11] para realizar ensayos de vida acelerados (ALT) sobre células III-V de área pequeña, 1 mm². En esta actividad hay que considerar una serie de hitos secuenciales que explican la amplitud temporal de esta actividad, años 2007 y 2008, la selección y compra de los equipos especializados de conmutación y caracterización eléctrica de la célula, el posterior desarrollo y fabricación de las tarjetas de circuito impreso específicos para la instrumentación con estos equipos y de los circuitos de ensayos realizados, así como su prueba integrada del sistema a nivel hardware. Por último el desarrollo de un software de control de instrumentación en el lenguaje específico para este uso, LabVIEW, que se prolongó hasta otoño de 2008. Durante finales de 2008 y hasta enero de 2009 se realizaron pruebas de la instrumentación, primero sobre diodos comerciales, y luego sobre diversas tecnologías de células de concentración del IES-UPM. Además de la realización de los ensayos en células solares, se colaboró en dos ensayos de fiabilidad de LEDs, el primero en ensayos acelerados a alta presión en una cámara “pressure cooker” [NVN09], y el segundo en ensayos de vida acelerados en temperatura [VNNB10] donde

se empleo la instrumentación desarrollada para células, para el análisis de las curvas I-V de los LED's y medir su temperatura en la unión durante el ensayo. **Los resultados de las actividades de metodología e instrumentación se han reflejado en el capítulo 5 de la memoria.**

3. **Actividad AT 3:** La actividad de ensayos de vida acelerados ALT, está dividida en dos hitos secuenciales; la AT 3a es la realización de los ensayos y medida de la caracterización de la célula [EAGN+10][NGVEA11], y el AT 3b es el análisis estadístico de los resultados con la evaluación de la degradación y la fiabilidad de la célula en condiciones reales de funcionamiento. Se realizó una actividad previa de definición y planificación de los ensayos a finales de 2008 [NVGE09]. Los ensayos duraron desde febrero de 2009 hasta mediados de 2010 sumando más de 10.000 horas de ensayos acelerados. **Estas actividades, con los resultados y conclusiones obtenidas se han descrito en el capítulo 6 de la memoria.**

4. **Actividad AT 4.** Análisis de la generalización de la metodología e instrumentación a células III-V de concentración de área grande. Hasta esta actividad todo el trabajo se había desarrollado sobre células fabricadas en el IES-UPM de área pequeña (1 mm^2) y niveles de concentración de 1000X. En esta actividad se va a generalizar la metodología e instrumentación a células III-V grandes, con áreas entre 30 mm^2 y 100 mm^2 . Se abordan varias líneas de trabajo; el planteamiento de la metodología y planificación de ensayos, el análisis térmico mediante simulación de elementos finitos del circuito de ensayos de vida acelerada con este tipo de células, y el desarrollo de la instrumentación. **El desarrollo de esta actividad está descrito en el capítulo 7 de la memoria.** Los trabajos experimentales, en parte consecuencia de esta actividad están en marcha, pero no son objeto de la tesis.

4.4. Conclusiones

El objetivo de los ensayos de vida acelerada (ALT) es obtener la evaluación de la fiabilidad de las células III-V en un periodo de tiempo asumible, mucho menor que en condiciones reales de funcionamiento. La imposibilidad de esperar 30 años de medida de SFC en campo para obtener resultados, nos lleva a la necesidad de realizar ensayos

de vida acelerada (ALT) para la evaluación de la degradación y fiabilidad de la célula solar III-V de concentración. Las principales conclusiones de este capítulo de la memoria son:

- Se han descrito los diferentes tipos de ensayos acelerados aplicados en dispositivos y equipos electrónicos.
- Se han identificado los ensayos acelerados empleados previamente en células y sistemas de concentración fotovoltaica, todos ellos ensayos acelerados cualitativos, y se explica la alternativa cuantitativa que se desarrolla en la tesis, y que pasa por realizar ensayos de vida acelerada (ALT) en temperatura para poder obtener los valores de degradación y fiabilidad de la célula III-V de concentración en condiciones nominales.
- Se ha explicado el modelo de Arrhenius de aceleración de vida con estrés en temperatura por ser el que posteriormente hemos aplicado satisfactoriamente a nuestros ensayos, explicando la base teórica y el procedimiento de cálculo del factor de aceleración entre el tiempo de ensayo acelerado y el tiempo de trabajo en campo del componente en condiciones nominales.

A partir de todo el análisis realizado se ha definido una estrategia de evaluación de fiabilidad de células de concentración III-V, que se ha mostrado en las actividades reflejadas en la Figura 4.2. La planificación de actividades presentada en la Figura 4.2 son las actividades de la tesis que se describen en los diferentes capítulos de esta memoria.

Para aplicar los ensayos de vida acelerada (ALT) a las células de concentración ha sido necesario desarrollar una nueva metodología e instrumentación que serán descritas en el capítulo 5 de la memoria. Esta nueva metodología e instrumentación nos han permitido por primera vez realizar ensayos de vida acelerada (ALT) en temperatura en células III-V, y lo que es más importante conseguir los objetivos buscados como se verá en el capítulo 6 de la memoria de la tesis. Finalmente en el capítulo 7 se realizará un análisis de la generalización de los procedimientos e instrumentación, que en la tesis se han empleado para evaluar células III-V del IES-UPM de área pequeña y que se van a generalizar a otras células comerciales III-V de área grande.

Capítulo 5

METODOLOGÍA E INSTRUMENTACIÓN

5.1. Introducción

En este capítulo vamos a realizar una descripción detallada de la metodología de ensayos de vida acelerados empleada en la tesis, el circuito diseñado para el ensayo de las células, y la instrumentación específicamente desarrollada para la metodología y las células solares de alta concentración de GaAs de 1 mm^2 fabricadas en el IES-UPM. Estas actividades se corresponden con la Actividad de la Tesis 2, (AT2) de la Figura 4.2.

La realización de ensayos acelerados en células solares de alta concentración presenta importantes dificultades con respecto a los ensayos en otros dispositivos. Mientras que en la mayoría de los dispositivos es sencillo hacerlos funcionar y caracterizarlos dentro de la cámara climática, en el caso de las células solares es muy complejo porque tanto el funcionamiento como la caracterización requieren de iluminación a alta concentración dentro de la cámara. Estas dificultades hacen necesario desarrollos innovadores de metodologías y sistemas de instrumentación como los que se presentan en este capítulo de la memoria.

La metodología de ensayos acelerados expuesta está basada en la desarrollada en el ensayo de vida muy acelerado escalonado en temperatura (HALT) desarrollado por el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V [Gon08] [GVNA+09], sobre el mismo tipo de células que emplearemos en nuestros ensayos, pero a diferencia de las nuestras sin encapsular. Mientras que el ensayo HALT duró 313,7 horas y se realizó con equipamiento de la empresa Tecnológica S.A, experta en ensayos acelerados de dispositivos, los ensayos de esta tesis a priori debían durar miles de horas y evidenciar procesos de degradación de potencia generada por las células más lentos debido al menor nivel emulado de concentración y a la previsible menor degradación al haber encapsulado la célula, por lo que se realizó un nuevo diseño de instrumentación con nuevos equipos, con la pretensión de mejorar las prestaciones de medida, y la garantía de estabilidad y fiabilidad del sistema de instrumentación.

Además de implementar la nueva metodología e instrumentación de ensayos de vida acelerados se va a realizar un análisis crítico de las fortalezas y debilidades del método con el fin de validarlo. La demostración de la validez del método pasa al menos por obtener en todos los ensayos de vida acelerados realizados, unos resultados que sean coherentes y sigan los modelos matemáticos de extrapolación en tiempo

previsibles para ensayos acelerados en temperatura. Una garantía total de validez la darían la comparación de los resultados sobre las mismas células en ensayos acelerados y los obtenidos en tiempo real (en campo), pero de momento esto no es factible ya que el tiempo de vida del SFC en campo debe ser de unos 30 años.

Basándonos en los resultados de los trabajos precursores de esta tesis, y del análisis de los tipos de ensayos acelerados realizado en el capítulo 4, Tabla 4.1, el planteamiento de los ensayos ha sido:

Realizar **ensayos de vida acelerada ALT, mediante estrés en temperatura, evaluando la degradación de la potencia de cada una de las células a lo largo del ensayo**. Para ello se han realizado tres ensayos independientes a tres temperaturas diferentes, y se ha propuesto la metodología de simulación de funcionamiento y medida de las células.

Este capítulo de la memoria se ha dividido en las siguientes secciones; en la primera sección se muestra la metodología del ensayo acelerado en sus diversos aspectos, en la siguiente el diseño y análisis térmico del circuito de ensayo de las células, después el sistema de instrumentación, y por último las conclusiones.

5.2. Metodología

5.2.1. Antecedentes e introducción

El factor de estrés utilizado más habitualmente en los ensayos acelerados a dispositivos semiconductores es la temperatura, porque los mecanismos de fallo y degradación de los dispositivos se aceleran con la temperatura, y habitualmente el factor de aceleración debido a la temperatura sigue el modelo de Arrhenius, capítulo 4 de esta memoria, que se basa en procesos físico-químicos y que está muy contrastado para numerosos dispositivos semiconductores y para diferentes mecanismo de fallo.

Los LEDs de alta luminosidad o HB-LEDs (High-Brightness LEDs) son dispositivos de materiales y tecnología similar a las células solares III-V de concentración, pero con la ventaja de ser una tecnología madura en muchos aspectos, en la que se tiene experiencia en ensayos acelerados. Para estos componentes el procedimiento para realizar un ensayo de vida acelerada (ALT) es el siguiente:

- Colocar los HB-LEDs funcionando en la cámara climática. Para que los HB-LEDs funcionen es necesario inyectarles corriente. A una misma temperatura se pueden inyectar a diferentes grupos de LEDs diferentes niveles de corriente con el fin de analizar la influencia de la corriente en la fiabilidad [NVN09][VNNB10].
- Caracterizar periódicamente la luminosidad del LED fuera de la cámara climática a una temperatura controlada. A partir de la evolución de la potencia luminosa se puede evaluar la degradación del LED.

Si pretendemos aplicar la metodología de ensayos acelerados de los HB-LEDs a las células solares III-V de alta concentración terrestre se observan problemas en ambos niveles; condiciones de trabajo y medida durante el ensayo:

Para simular las condiciones de trabajo nominales de las células, es necesario aplicar iluminación concentrada a las células dentro de la cámara climática a alta temperatura. Se pueden plantear algunas soluciones parciales, entre ellas hemos evaluado las siguientes:

- Concentrar la luz sobre cada célula introduciendo una guía de luz dentro de la cámara climática para cada célula. La fuente de luz puede ser un láser por cada unión de la célula de concentración III-V, ya que este tipo de dispositivo puede alcanzar la irradiancia equivalente a una concentración de 1000 soles. Este procedimiento sólo es válido para células de pequeña área como las nuestras de 1 mm^2 , e implica un costo en equipamiento muy elevado. Otra opción, pero todavía no está disponible, es emplear simuladores solares a 1000 soles de concentración. Hasta el momento los simuladores solares de concentración desarrollados recientemente [DAS08] no trabajan con luz continua, sino mediante un flash de luz, y por tanto no sirven para un ensayo acelerado. Además las fuentes de luz se degradan con el tiempo lo que implica un continuo calibrado de la fuente.
- La alternativa más “simple” es introducir en la cámara climática los módulos solares completos con sus lentes de concentración, e iluminar a una concentración de un sol desde el exterior a través de una pared transparente de la cámara, mediante lámparas continuas de xenón. Esto implica cámaras grandes, y la calibración periódica de la luz suministrada

por las lámparas, que se degradan a lo largo de las miles de horas de ensayo. Por otro lado, realizar los ensayos acelerados en temperatura en módulos solares completos limita de forma importante la temperatura del ensayo, y por lo tanto el factor de aceleración, ya que muchos de los materiales de los módulos (adhesivos, plásticos) se degradan de forma importante por encima de los 100-120°C. Con este procedimiento pero sin la óptica de concentración, se realizan ensayos en módulos sin concentración con células III-V para aplicaciones espaciales.

La metodología propuesta en esta tesis para realizar los ensayos acelerados en temperatura en células solares de alta concentración consta de dos partes:

- Puesto que iluminar la célula solar dentro de la cámara climática presenta dificultades muy importantes se ha optado por simular el funcionamiento de la célula dentro de la cámara. Para ello se han simulado las condiciones eléctricas de trabajo mediante la inyección de una corriente en directa a la célula.
- La segunda parte es caracterizar la potencia generada por la célula (P_{max}) durante el ensayo acelerado en temperatura. Para poder caracterizar la célula solar dentro de la cámara climática se ha utilizado un modelo con el que se puede evaluar la curva I-V en iluminación y por tanto obtener la P_{max} , a partir de la curva I-V en oscuridad que se mide periódicamente dentro de la cámara climática.

El detalle del procedimiento de simulación de las condiciones de trabajo, y de la medida de la degradación de la potencia generada, se muestran a continuación.

5.2.2. Metodología de simulación de funcionamiento

La condición de trabajo real de la célula se ha simulado inyectando corriente en directa en el bus conductor de la célula, a la misma densidad de corriente que tiene la zona activa de la célula cuando la luz incide sobre ella a la concentración definida de funcionamiento. En la Figura 5.1 se observa la zona activa de la célula y la zona no activa, es decir, el grueso bus conductor que rodea la célula más los finos dedos conductores sobre la zona activa.

Las células ensayadas de GaAs y fabricadas por el IES-UPM, tienen una zona activa de 1 mm^2 , y trabajan a 1000 soles, con una temperatura en la unión en condiciones reales de aproximadamente $65 \text{ }^\circ\text{C}$ [Algora07]. Para más detalles de la tecnología de la célula se puede consultar en el Anexo I de la memoria.

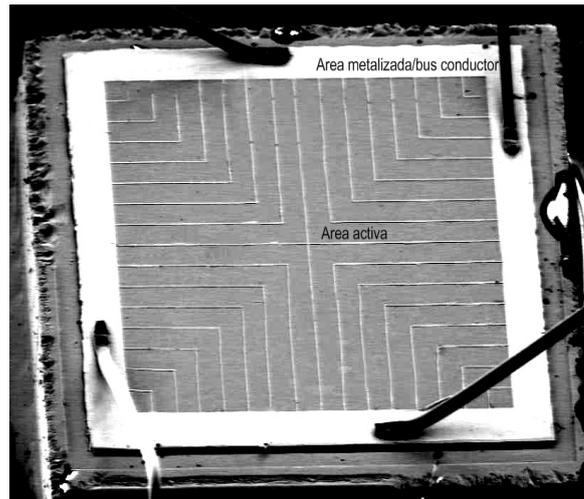


Figura 5.1: Identificación en la célula solar del IES-UPM del área activa en gris oscuro, y área del bus conductor ó metalizada, en blanco. (Tonalidades modificadas).

La densidad de corriente generada en la zona activa de la célula solar con una concentración de 1000 soles suponiendo un rendimiento del 25% es de 250 mA/mm^2 . En los ensayos realizados se han analizado células solares en dos niveles de concentración diferentes, 700 soles y 1050 soles, cuyas densidades de corriente de emulación mediante inyección de corriente en directa son 175 y $262,5 \text{ mA/mm}^2$ respectivamente.

La estructura semiconductor de la zona activa de la célula y del bus conductor es la misma, por lo que la misma densidad de corriente en ambos casos debe producir efectos de degradación equivalentes. Durante el funcionamiento de la célula solar al ser iluminada el área activa de semiconductor sobre la que incide la luz es fundamentalmente la única zona con densidad de corriente en la estructura semiconductor. En el caso de inyección de corriente en directa es necesario analizar en detalle la distribución de la corriente a través de la célula ya que parte se distribuirá verticalmente bajo el bus metálico y parte llegará de modo disperso al bus y los dedos

metálicos en la zona activa. Beatriz Galiana y otros [GAR08] realizaron simulaciones para la célula ensayada en las condiciones de funcionamiento con inyección en directa, concluyendo que la conducción en vertical bajo el bus exterior es de un orden de magnitud superior a la que se dispersa en el resto de la célula, zona activa, y dedos metálicos. Por lo tanto, en nuestros ensayos se ha considerado como área de paso de corriente en directa, el área vertical bajo el bus metálico exterior que rodea la célula.

Con las consideraciones anteriores, y a partir de las dimensiones del área del bus exterior se ha calculado la corriente en directa para conseguir las densidades de corriente equivalentes a 700 soles, 175 mA/mm^2 , y a 1050 soles, $262,5 \text{ mA/mm}^2$, obteniendo valores a inyectar en el bus de las células de 112 mA y 168 mA respectivamente. Para generar el nivel de corriente apropiado para inyectar en cada célula, se realizaron generadores de corriente ajustables.

El procedimiento de envejecimiento acelerado se basa en que la degradación producida en la estructura semiconductor por la corriente en directa bajo el área del bus, debe ser equivalente a la producida por la radiación solar en condiciones reales debido a la corriente generada en la zona activa. Relacionado con este procedimiento es necesario realizar dos consideraciones:

- No simula la degradación debido a la radiación solar que incide sobre la célula. Sin embargo, es previsible que esta degradación del semiconductor no sea significativa, porque la óptica podría llevar un filtro ultravioleta que es la radiación de mayor energía, y porque las células III-V han demostrado ser más robustas a la radiación que las de silicio. Precisamente su resistencia a la radiación en el espacio hace de los semiconductores III-V el material adecuado para las células solares en los sistemas espaciales.
- Una medida de la célula en iluminación fuera de la cámara, una vez transcurrido parte del ensayo, no evidencia toda la degradación sufrida por la célula durante el ensayo, porque el camino de la corriente en iluminación no pasa por la zona más degradada por la inyección en directa realizada en la célula. Para medir toda la degradación en la estructura semiconductor bajo el bus metálico hay que emplear un procedimiento de medida que mantenga el mismo camino de corriente que cuando se degrada, como es el caso de la curva I-V en oscuridad medida en directa.

Para extraer resultados válidos de nuestros ensayos, y no realizar generalizaciones erróneas, hay que tener en cuenta estos aspectos.

5.2.3. Metodología de evaluación de la potencia generada por la célula

La caracterización de las células durante el ensayo de vida acelerada, se ha realizado midiendo la curva I-V en oscuridad a la temperatura de ensayo, con esta medida se obtienen dos tipos de información:

1. **Análisis del mecanismo de degradación.** A partir de la evolución de la curva I-V en oscuridad a lo largo del ensayo vamos a obtener información del mecanismo de degradación de la célula. El mecanismo de degradación de la célula será analizado en el capítulo 6 de la memoria.
2. **Evaluación de las prestaciones de la célula dentro de la cámara climática.** A partir de la curva I-V en oscuridad se evalúa la curva I-V en iluminación y a partir de ésta evaluamos la máxima potencia generada (P_{max}) por la célula. Relacionando la medida inicial antes de comenzar el ensayo P_0 (P_{max} en $t=0$), y P_{t_1} la potencia máxima evaluada en la célula transcurrido un periodo de ensayo t_1 , obtenemos la potencia relativa generada por la célula a lo largo del ensayo (P_{t_1}/P_0). La evolución de la potencia relativa de cada una de las células del ensayo son el resultado del ensayo para la célula y la media de potencias relativas para un conjunto de células con la misma concentración y temperatura, el resultado de un ensayo concreto. La incertidumbre y exactitud de la P_{max} evaluada y la evolución de la potencia relativa se tratan en una próxima sección.

El modo de caracterizar propiedades de la célula en iluminación (como la potencia generada máxima) a partir de la curva I-V en oscuridad se realiza empleando el principio de superposición, que fue probado para células de silicio a finales de la década de los 70 [LFB79], [TP80]. En general la aproximación obtenida aplicando este principio es óptima para células de buena calidad, con pocos defectos, aunque un detalle pormenorizado puede verse en los anteriores trabajos.

El principio de superposición es un teorema básico de las ecuaciones diferenciales, que consiste en que si un sistema es lineal su respuesta a varias

excitaciones es la suma de las respuestas a cada excitación por separado. Básicamente se plantea que existen dos efectos en la operación de la célula solar: la generación de corriente producida por la luz incidente, y el voltaje que se produce en la célula debido a la carga. Ambos modos de operación se pueden considerar por separado [LFB79] [vOMN82]:

- Para la corriente generada por luz incidente se asume que la corriente que aparece (I_{sc}) lo hace a una tensión de célula $V=0$ sin carga.
- Para la corriente en oscuridad, se asume que no existe generación de corriente en iluminación, pero sí aparece una corriente (I_{dark}) que es función de la tensión V_{dark} aplicada en los terminales de la célula.

El principio de superposición consiste en sumar las corrientes de las dos condiciones independientes. La corriente en iluminación para un determinado nivel de tensión, es la suma del valor de la corriente en cortocircuito (I_{sc}) más el valor de la corriente en oscuridad (I_{dark}) para la tensión seleccionada, hay que considerar que ambas corrientes tienen signo contrario y por tanto se restan. El error que se introduce depende en gran parte de la calidad del material. En la Figura 5.2 se observan las curvas en iluminación y oscuridad de una célula solar, visualmente puede apreciarse esta relación.

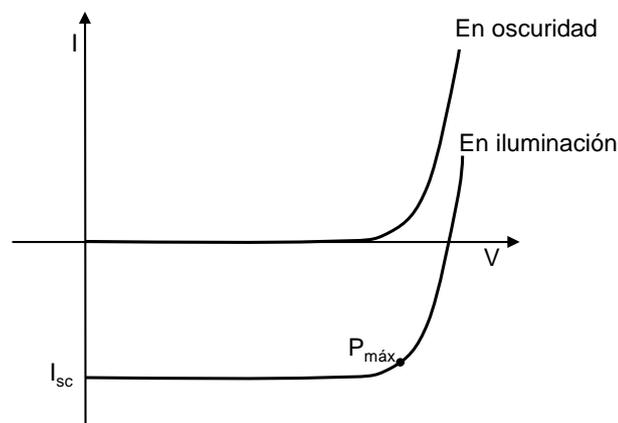


Figura 5.2: Curvas en oscuridad e iluminación de una célula solar.

El principio de superposición aplicado a células solares de concentración, que extrae la curva I-V en iluminación a partir de la curva en oscuridad, y por tanto evalúa la

potencia generada por la célula en concentración, fue desarrollado por investigadores del IES-UPM en [ASHK+03], y surge por dos necesidades concretas:

- La necesidad del Grupo de Investigación de Integración de Sistemas e Instrumentos del IES-UPM de desarrollar un método de medida para caracterizar la potencia generada por las células solares que se emplean en el proyecto EUCLIDES, la mayor instalación solar de concentración en su momento (1998), 480 kWp.
- El interés por desarrollar estándares de medida y caracterización. El proyecto europeo C-RATING (Propuesta de medida, caracterización y normalización de sistemas de concentración) iniciado en el año 2000 y liderado por el IES-UPM con la colaboración de diversas instituciones y empresas europeas tenían estos objetivos [SPAC+03][ASHK+03][Anton04]. En ese momento el desarrollo de este procedimiento era necesario porque aún no se habían desarrollado los primeros simuladores solares para alta concentración [DAS08]. Además es más fácil y más barato a nivel industrial caracterizar las células en oscuridad que en iluminación con concentración.

Las ecuaciones de las curvas en iluminación (V_{illum} , I_{illum}) (Figura 5.3) se obtienen a partir de las curva en oscuridad (V_{dark} , I_{dark}), para un nivel de corriente fotogenerada determinado I_L (es decir, la I_{sc} a 700X o la I_{sc} a 1500X, que son, la I_{sc} a un sol multiplicado por el nivel de concentración). Aplicando el principio de superposición y corrigiendo la caída de tensión en la resistencia serie según las siguientes ecuaciones y el modelo de la Figura 5.3, ambos extraídos de [ASHK+03][Anton04]:

$$\begin{aligned} V_{illum} &= V_{dark} - I_L \cdot R_s \\ I_{illum} &= I_L - I_{dark} \end{aligned} \tag{5.1}$$

Donde R_s es la resistencia serie, que ha sido obtenida ajustando la curva I-V con el modelo distribuido de dos diodos, o con el procedimiento indicado en el capítulo 2 de [Anton04], donde se extrae el valor de R_s en la zona de altas corrientes de la curva I-V en oscuridad.

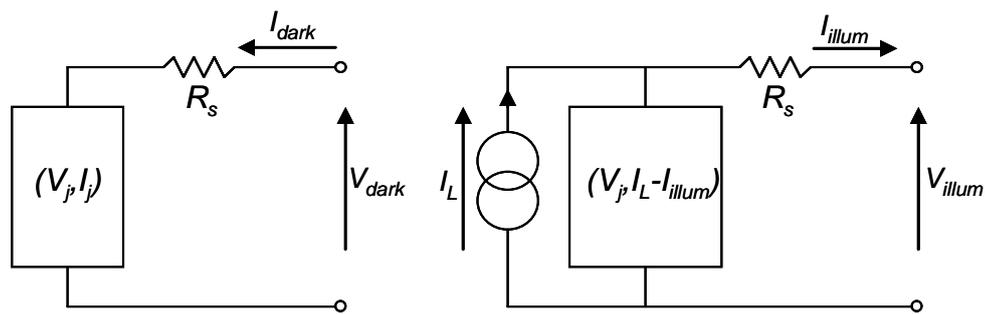


Figura 5.3: Modelo para predecir la curva I-V en iluminación a partir de la curva en oscuridad, tomado de [SPAC+02a], [ASHK+03], [Anton04].

Las ecuaciones (5.1) han sido las empleadas para obtener la potencia máxima generada por la célula a partir de la curva I-V medida en oscuridad a la temperatura de ensayo acelerado, extrapolando la curva en iluminación, y obteniendo el punto de máxima potencia generada.

5.2.4. Comparación entre procedimientos de medida de curvas I-V, P_{max} y P relativa

Para verificar la bondad del modelo sobre nuestras células se han realizado diversas comparaciones entre medidas en iluminación y en oscuridad. Las medidas en iluminación y oscuridad que se realizaron durante los ensayos de vida acelerados, fueron las siguientes:

1. Medidas en el laboratorio donde se han fabricado las células, IES-UPM:
 - a. Curva I-V en iluminación a un sol y 24,5 °C de cada célula solar, y cálculo de P_{max} . La I_{sc} empleada en las ecuaciones (5.1) es la obtenida bajo el simulador a un sol multiplicado por el nivel de concentración.
 - b. Curva I-V en oscuridad de cada célula solar a 24,5 °C. Una vez conocida R_s e I_{sc} del punto anterior, y con la ecuaciones (5.1) se extrapola la curva I-V en iluminación de la que se extrae la P_{max} .
2. Medida de la curva I-V en oscuridad en la cámara climática al comenzar y finalizar los ensayos acelerados a tres temperaturas distintas, 25°C, 65°C, y a la temperatura del ensayo acelerado. La medida a 25 °C se ha realizado

debido a que es una de las temperaturas típicas de caracterización de las células, y la de 65 °C porque es la temperatura nominal de trabajo de la célula ensayada con una concentración de 1000 soles [Algora07].

3. Durante los ensayos acelerados se han realizado periódicamente medidas de la curva I-V en oscuridad extrapolando P_{max} . Con estas medidas se caracteriza la evolución de potencia relativa de cada célula (P_{t1}/P_0).

Mientras las medidas del apartado 1 se realizaron en el IES-UPM situado en el Campus de Moncloa de la UPM en Madrid, las medidas 2 y 3 se realizaron con el equipo de instrumentación descrito en esta memoria y durante los ensayos acelerados en la EUITT-UPM (Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica de Telecomunicación de la Universidad Politécnica de Madrid) en el Campus Sur de la UPM en Madrid. La relación entre medidas del apartado 2 a baja temperatura y las de los ensayos a alta temperatura se tratan en el capítulo 6, en esta sección nos centramos en la evaluación de P_{max} y la evaluación de potencia relativa durante el ensayo.

A partir de ahora vamos a comparar las curvas I-V en iluminación real (apartado 1.a) y la curva I-V en iluminación extrapolada a partir de la medida de la curva I-V en oscuridad (apartado 1.b), y como consecuencia la diferencia entre la $P_{max_real_medida}$ (P_{max_real}) y la $P_{max_evaluada}$ (P_{max_eval}), Potencia máxima extrapolada o evaluada. Para ello se emplean las medidas en el IES-UPM con el mismo equipo y mismas condiciones ambientales, 24,5°C.

En la Figura 5.4 se muestra para una célula típica la curva I-V medida en iluminación bajo el simulador solar, la curva I-V en iluminación a partir de la medida de la curva I-V en oscuridad, y la comparación de la potencia en función de la tensión para ambas curvas. El valor de P_{max} se ha obtenido por ambos procedimientos en las 18 células de un circuito de ensayo obteniéndose las siguientes diferencias:

- Los valores de $P_{max_evaluada}$ (P_{max_eval}) son ligeramente superiores que los valores de $P_{max_real_medida}$ (P_{max_real}).
- La diferencia media de P_{max} entre ambos procedimientos de las 18 células ha sido de 1,073%.
- La célula que tuvo la máxima diferencia de P_{max} entre ambos procedimientos fue del 2%.

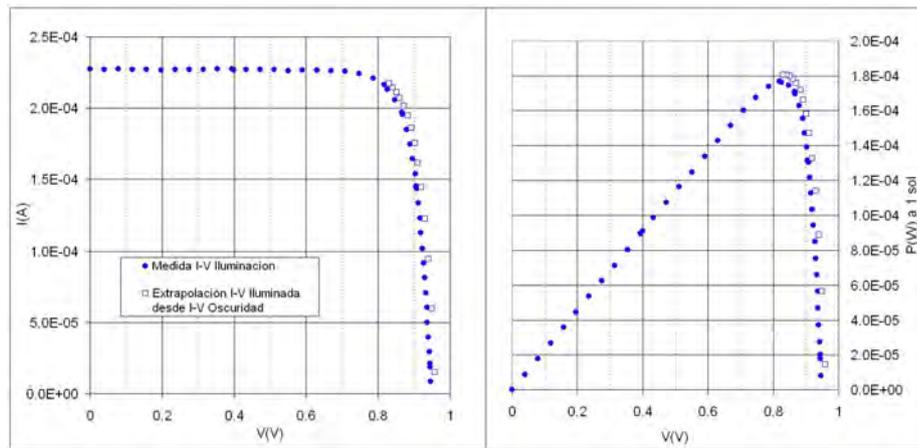


Figura 5.4: Comparación de las curvas I-V y de potencia de una célula típica medida con dos métodos. Curva I-V bajo simulador solar a 1 sol, y extrapolación de la curva en iluminación a partir de medida en oscuridad. Medidas en IES-UPM a 24,5°C.

La principal conclusión de estas medidas, es que el ajuste entre la curva I-V real bajo iluminación y la extrapolada a partir de la curva I-V medida en oscuridad es muy bueno, y la diferencia en P_{max} muy pequeña. Aunque el ajuste del modelo es bueno las diferencias en las P_{max} obtenidas son significativas con respecto a la degradación de potencia generada relativa de las células por lo que es necesario realizar un análisis más detallado.

En la medida de la P_{max_eval} evaluada hay dos fuentes de errores:

- Error al aplicar el modelo (error sistemático). Como se ha observado en la Figura 5.4 la curva I-V en iluminación obtenida a partir de la curva I-V en oscuridad no es exactamente igual que la curva I-V medida en iluminación. Lo mismo ocurre con el valor de P_{max_eval} obtenido por el modelo y el medido directamente de la curva I-V. Estas diferencias pueden ser debidas a diferentes razones como pequeños cambios en la temperatura, errores en el valor medio de R_s empleado respecto al valor en una célula concreta, o simplificaciones en el modelo entre otros. Suponiendo que el valor de P_{max} medida en iluminación es el valor real (P_{max_real}) la diferencia entre el valor real y el obtenido a partir de la curva I-V en oscuridad es un error sistemático que nos sesga la medida dándonos valores en P_{max_eval} por encima de los reales, un 1,073 % de media y un 2% como máximo.

Asumiremos que el valor del error sistemático en cada célula no varía a lo largo del ensayo.

- Incertidumbre de la medida de la curva I-V en oscuridad (error aleatorio), y por tanto en la extrapolación de P_{\max_eval} . Esta incertidumbre proviene principalmente de los equipos de medida y del sensado de temperatura en la cámara climática de ensayos, y se ha evaluado experimentalmente a 130°C resultando ser $\pm 0,01\%$ de P_{\max_eval} .

Por lo tanto, el error sistemático de la medida de P_{\max_eval} es mucho mayor que el error aleatorio o incertidumbre de la medida.

Por lo tanto, la diferencia entre P_{\max_eval} y P_{\max_real} es:

$$P_{\max_eval} = P_{\max_real} + K \pm \delta \quad (5.2)$$

Siendo K el error sistemático debido a la aplicación del modelo, que consideramos constante para cada célula y δ la incertidumbre de medida.

Sin embargo, a la hora de evaluar las prestaciones de la célula no consideraremos su potencia en cada instante sino la potencia relativa de cada célula ($P_{t_1}/P_0 = P_{relat_eval}(t_1)$) que se calcula a partir de medidas de la curva I-V en oscuridad en dos instantes diferentes, t_1 y el inicial, t_0 , si lo comparamos con la medida de la potencia relativa real ($P_{relat_real}(t_1)$):

$$P_{relat_real}(t_1) = \frac{P_{\max_real}(t_1)}{P_{\max_real}(t_0)} \quad (5.3)$$

$$P_{relat_eval}(t_1) = \frac{P_{\max_eval}(t_1)}{P_{\max_eval}(t_0)} = \frac{P_{\max_real}(t_1) + K \pm \delta}{P_{\max_real}(t_0) + K \pm \delta}$$

El valor de la potencia relativa que obtenemos de nuestras medidas experimentales $P_{relat_eval}(t_1)$ no es un valor igual al real $P_{relat_real}(t_1)$ debido a los errores de $P_{\max_eval}(t_1)$ y de $P_{\max_eval}(t_0)$. Para evaluar la incertidumbre de la medida de $P_{relat_eval}(t_1)$ y su diferencia respecto a $P_{relat_real}(t_1)$ hemos considerado el sentido de los errores aleatorios que maximizan y minimizan $P_{relat_eval}(t_1)$ en la ecuación (5.3), obteniendo las ecuaciones (5.4).

$$P_{relat_eval}(t_1)_{max} = \frac{P_{max_real}(t_1) + K + \delta}{P_{max_real}(t_0) + K - \delta} \quad (5.4)$$

$$P_{relat_eval}(t_1)_{min} = \frac{P_{max_real}(t_1) + K - \delta}{P_{max_real}(t_0) + K + \delta}$$

Si calculamos los valores de $P_{relat_eval}(t_1)_{max}$ y $P_{relat_eval}(t_1)_{min}$ y para valores pesimistas de K del 2%, el de la célula con mayor error sistemático, y de δ de 0,01% se tiene que el error entre la $P_{relat_eval}(t_1)$ medida en el ensayo, y la real $P_{relat_real}(t_1)$ es menor que el 0,08% del valor de la potencia relativa.

Aunque la suposición de que el error sistemático no depende de la degradación de la célula puede no ser en algunos casos del todo cierto, de este razonamiento podemos concluir que el error de la potencia relativa evaluada de $P_{relat_eval}(t_1)$ es mucho menor que los niveles de degradación relativa que estamos evaluando, que van al finalizar los ensayos acelerados que posteriormente detallaremos del 1,69% al 5,87%. De esta forma los valores de degradación relativa medidos a las células en oscuridad dentro de la cámara climática durante el ensayo, son mayores en más de un orden de magnitud que el error de medida de P_{relat_eval} respecto al real, y por tanto los datos que obtendremos de evolución de la potencia relativa durante los ensayos acelerados serán suficientemente exactos y precisos como para extraer con muy poca incertidumbre en este aspecto los resultados de degradación de potencia media del ensayo y fiabilidad que se describen en el capítulo 6 de la tesis.

5.3. Desarrollo del circuito de ensayo de las células

El diseño del circuito de ensayo para esta tesis fue desde el punto de vista temporal la primera actividad de la tesis [Núñez06]. Para el diseño del circuito nos basamos en la experiencia del circuito empleado en los ensayos HALT [Gon08]. Uno de los principales problemas del circuito del ensayo HALT anterior fue el deterioro del conector del circuito con el cableado, durante el periodo de ensayo a mayor temperatura (150 °C). Para mejorar la estructura mecánica de las conexiones en este nuevo circuito se prescindió del conector empleado en el circuito del ensayo HALT, y se

buscó un sustrato alternativo donde los cables de medida pudiesen soldarse directamente sobre el circuito de ensayo.

Los circuitos con conductores de lámina de cobre (como es el caso de los circuitos impresos) no requieren necesariamente conectores, ya que se puede soldar directamente sobre el conductor con una buena tracción mecánica. Si se quiere además mantener una excelente conductividad térmica con la célula, existen dos tecnologías de sustratos el DBC (Direct Bonded Copper – Cobre de unión directa) y el IMS (Insulation Metal Substrated – Sustrato metálico con aislamiento). Describiremos el DBC y las razones que nos movieron a elegirlo como sustrato del circuito.

El DBC (Direct Bonded Copper) es una tecnología de circuitos con un sustrato cerámico (alúmina Al_2O_3) sobre el que se adhiere una lámina de cobre, la unión se produce entre ambos materiales mediante un proceso de oxidación de las superficies en contacto. Al no precisar de un adhesivo la fiabilidad y calidad de la unión es muy elevada. El circuito puede ser a doble cara, y con un espesor de cobre entre $50\ \mu m$ y $300\ \mu m$. Es habitual su uso en fuentes de alimentación de alta potencia, y en el sustrato del receptor de células de concentración III-V, por ejemplo lo usan los fabricantes Emcore y Spectrolab. Otra ventaja de este sustrato es que los Coeficientes de Expansión Térmica (CTE - Coefficient of Thermal Expansion) de las células GaAs ($6,86\ ppm/^\circ C$) y del sustrato ($8,62\ ppm/^\circ C$) son similares. En el sustrato la alúmina limita la expansión del cobre, por lo que se considera como CTE del sustrato el de la alúmina.

Debido a que el DBC ya se emplea como soporte para células de concentración (Figura 1.5-b) y que los ensayos acelerados se realizan a muy alta temperatura (hasta $170^\circ C$ en nuestro caso) esta tecnología ofrece muchas garantías ya que la cerámica de alúmina y su método de unión con el cobre no se degrada a altas temperaturas, y el Coeficiente Térmico de Expansión del sustrato es similar a los del material de la célula.

5.3.1. Diseño del circuito de ensayo

Con la experiencia del circuito de ensayo anterior, en el diseño del nuevo circuito de ensayo se tomaron las siguientes decisiones:

- Mantener la estructura del circuito utilizado en el ensayo HALT, en el que los ánodos de las células estaban cortocircuitados. De esta forma se mantiene una medida a 4 hilos, y se reduce la complejidad del cableado, ya

que el número de cables de medida es la mitad más dos con respecto a no cortocircuitar los ánodos, como se explicará más adelante.

- Encapsular el circuito de ensayos con silicona óptica, lo que implicaba poner el circuito en una caja para retener la silicona. De esta forma se emula la condición de la célula en los receptores comerciales de los sistemas de concentración.
- Emplear un sustrato DBC con una capa gruesa conductora de cobre.
 - La principal restricción del uso de este material es que es un material caro. Se compraron placas DBC de grandes dimensiones con un espesor de cobre de 150 μm . Se analizó el tamaño y número de circuitos que se podían obtener de la placa base. Se optó por un circuito alargado de 8,125 cm x 4,25 cm, de los cuales cabían 6 en la placa DBC base (Figura 5.5), y para cada circuito se optó por poner dos subcircuitos simétricos longitudinalmente, con 9 células de concentración por subcircuito. El circuito tiene salida de hilos de medida por los dos laterales, lo que facilita la inspección visual de las células durante los ensayos, y la robustez de las conexiones (Figura 5.5 y Figura 5.6).

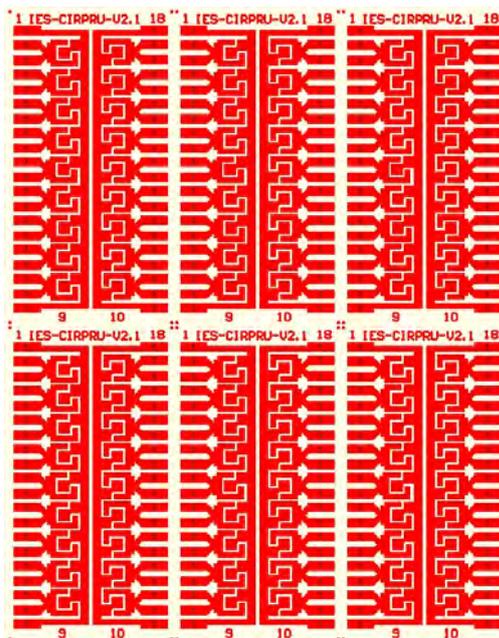


Figura 5.5: Detalle del diseño de la placa DBC con seis circuitos.

En el circuito montado (Figura 5.6) se observa el sustrato con los 2 subcircuitos de 9 células de concentración, en total 18 células. El circuito se pegó a una caja de aluminio mediante un adhesivo térmico, y se cubrió con silicona especial para aplicaciones fotovoltaicas. Finalmente, en la parte superior se tapó la caja con una fina lámina de vidrio, que permite la inspección visual.

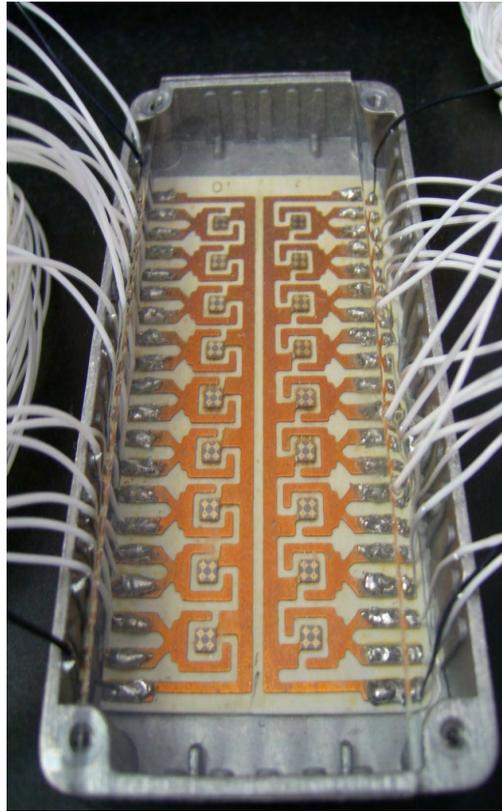


Figura 5.6: Circuito de ensayos de vida acelerada con las células encapsuladas.

5.3.2. Caracterización térmica de las células durante los ensayos

En el diseño del circuito se cuidó que la transferencia de calor de las células al ambiente fuese muy buena, por lo que a priori se asumía que las células con inyección de corriente tendrían una temperatura muy similar a la de la cámara climática, donde existen condiciones de convección forzada, debido a la renovación del aire interior de la cámara mediante un potente ventilador.

Aún conociendo que la temperatura de la célula no era muy superior a la de la cámara climática se detectó la necesidad de caracterizar térmicamente de forma precisa las células solares sometidas a ensayo por dos motivos:

- En el ensayo a 150°C se emplearon en un mismo circuito células a diferentes niveles de inyección de corriente: tres células sin inyección de corriente, diez células con una inyección de corriente equivalente a concentración 700X y por tanto que emulaban esta condición, y cinco células con una inyección de corriente equivalente a emular la condición 1050X. Medir la temperatura de las células en los tres niveles de inyección de corriente nos permite analizar si las diferencias de degradación son debidas a la inyección de corriente o además de eso a la temperatura en la célula, que aumenta por la inyección de corriente.
- El segundo motivo era validar procedimientos de medida y simulación para nuevos trabajos de ensayos acelerados más complejos. Las técnicas de medida de la temperatura de la célula y de la evaluación mediante simulaciones térmicas empleadas en este ensayo serán de utilidad para el ensayo de células de mayor área donde el incremento de temperatura debido a la inyección de corriente puede ser significativo.

5.3.3. Medida de la temperatura en la célula

Se evaluaron diferentes procedimientos de medida de la temperatura de la unión de la célula durante el periodo de inyección de corriente [CGL00], y se utilizó uno que emplea al propio dispositivo como sensor de temperatura ya que permite hacer la medida en el lugar adecuado (la célula) y con muy buena precisión dentro de la cámara climática. Aunque una descripción más detallada aparece en [ZTH08], en nuestro caso el procedimiento que se siguió para medir la temperatura de las células en el circuito de ensayo a 150 °C durante la inyección de corriente equivalente a cada nivel de concentración, consistió en:

1. **Realizar un calibrado** de la tensión en la célula a una corriente muy baja y con medida instantánea para que no se produzca autocalentamiento de la célula debido a la medida. En nuestro caso se situó a la célula en la cámara a tres temperaturas diferentes (150°C, 155°C y 160°C). Una vez estabilizada la temperatura se inyectaron 100 μ A, y se midió la tensión a cada una de las

temperaturas, obteniendo tres tensiones, $V_{150^{\circ}\text{C}}$, $V_{155^{\circ}\text{C}}$ y $V_{160^{\circ}\text{C}}$, para cada célula.

2. El siguiente paso es medir la tensión de sensado de temperatura en la célula mientras se inyecta corriente dentro de la cámara climática:
 - Primero se mantiene la condición de trabajo de inyección en corriente (de emulación de condiciones de trabajo, 700X y 1050X) en todas las células del circuito durante un periodo prolongado, más de una hora, de modo que permita estabilizar la temperatura en las células antes de la medida.
 - Una vez estabilizada la temperatura con inyección de corriente se interrumpe ésta e instantáneamente se inyecta a la célula los 100 μA de corriente de medida, midiendo su tensión en bornas. Comparando la tensión medida con la calibrada en el paso anterior se puede evaluar la temperatura en la unión en cada una de las células.

Para la inyección de corriente de sensado y medida de tensión en cada célula, se utiliza un procedimiento de medida a 4 hilos, y una fuente medidora programable de alta precisión.

5.3.4. Simulación térmica para evaluar la temperatura en la célula

Para la realización de las simulaciones térmicas se analizaron diversas herramientas software. La primera opción que se barajó fue adquirir ANSYS® la herramienta de simulación de elementos finitos con más implantación en investigación, pero su coste no estaba justificado por la necesidad esporádica de la herramienta. Se probaron varias herramientas de simulación desarrolladas con software libre y otras alternativas comerciales. Evaluando en su conjunto las herramientas nos decidimos por la herramienta comercial de simulación 3D de elementos finitos LISA® Finite Element Technologies de Sonnenhof Holdings, Canada [LISA].

Se definió en la herramienta la estructura física 3D del circuito, Figura 5.7, a la que se añadieron las características térmicas de cada material (Tabla 5.1), y la disipación de cada célula (Tabla 5.2). El modelo final incluía el circuito en su caja de aluminio y una placa cerámica bajo ella, el sistema tenía una complejidad de 3000

elementos y 4500 nodos. La estructura de nodos se ha realizado con mayor detalle en las células y materiales conductores térmicos más próximos a ellas.

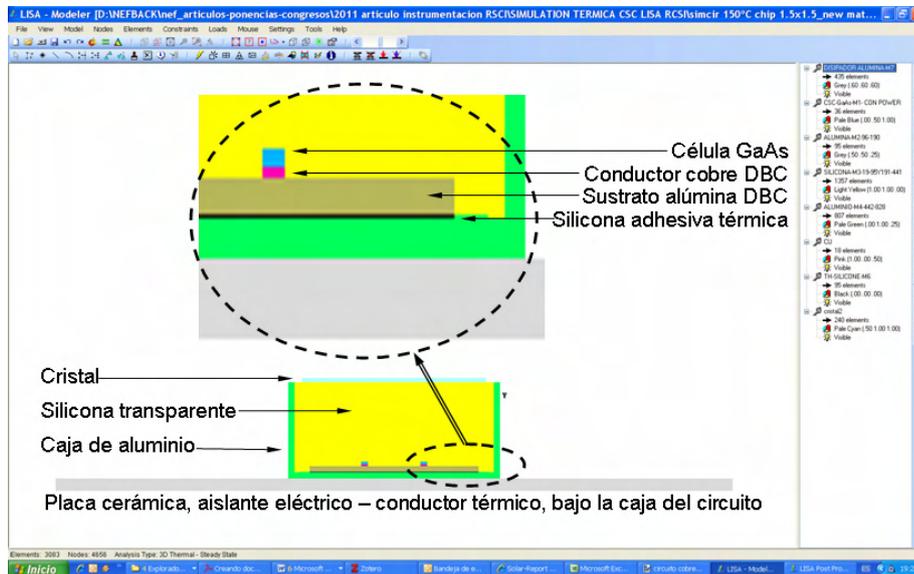


Figura 5.7: Estructura mecánica del circuito de ensayos. Definición en el software de simulación de elementos finitos.

Tabla 5.1: Características térmicas de los materiales del circuito de ensayo de las células.

Material	Conductividad térmica (W/m ² K)
Célula de GaAs	46
Conductor de cobre de circuito DBC	400
Sustrato de alúmina de circuito DBC	24,7
Silicona adhesiva térmica	2,2
Silicona óptica	0,2
Caja de aluminio embutido	155
Cristal	0,8
Placa cerámica (alúmina) bajo el circuito	24,7

Tabla 5.2: Condiciones promedio de potencia en las células del ensayo a 150°C.

Concentración emulada en la célula	Inyección de corriente (mA)	Tensión en bornas (V)	Potencia (mW)
700 X	112	1,00321	112,3
1050 X	168	1,03487	173,8

En la Figura 5.8 se muestra el resultado de la simulación, como puede verse la diferencia de temperatura entre células a diferentes niveles de inyección de corriente es pequeña como se verá numéricamente en la siguiente sección. Esta pequeña diferencia es debido a dos razones: la potencia a disipar es pequeña y el sustrato de alúmina tiene una buena conducción térmica.

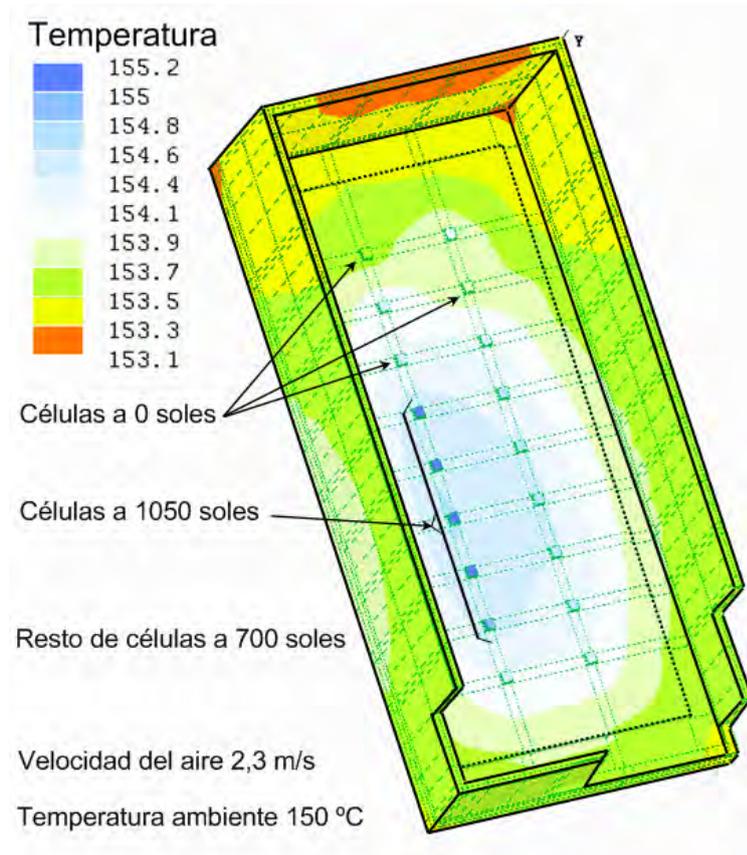


Figura 5.8: Simulación térmica de las células durante la emulación de condiciones de trabajo en el ensayo de vida acelerada 150 °C. Adaptado de [NVGJ+11].

5.3.4.1. Resultados térmicos

Los valores promedios de las medidas y simulaciones se han incluido en la Tabla 5.3. Para las medidas realizadas de la temperatura en la unión, hemos evaluado una incertidumbre de ± 0.2 °C. La diferencia de temperatura entre el incremento medio medido y el simulado (Tabla 5.3) es de 0,77 para 0X y de 0,86 en el peor caso con las células a 1050X lo que para un análisis de fiabilidad ofrece una correlación buena entre las medidas reales y las simuladas. Por lo tanto, se pueden considerar las

simulaciones térmicas realizadas con esta herramienta, adecuadas para el análisis térmico de células solares de concentración.

Tabla 5.3: Relación entre los incrementos medios de temperaturas medidas y simuladas de las diferentes células en el ensayo a 150°C.

Nivel de concentración	Incremento de temperatura medida (°C)	Incremento de temperatura obtenida en simulación (°C).
Células a 0 X	3,2	3,97
Células a 700 X	3,6	4,44
Células a 1050 X	4,0	4,87

De la **Tabla 5.3** se puede observar que las células 0X trabajan de media a 153,2 °C, las 700X trabajan a 153,6 °C y las 1050X a 154,0 °C. La diferencia media medida de incremento de temperatura debido a la concentración entre células a 0X y células a 1050X es de 0,8 °C. Esta pequeña diferencia nos lleva a una primera conclusión muy importante para el análisis de resultados de degradación:

- **La diferencia de degradación entre las células 0X, 700X y 1050X es exclusivamente debido a la diferente densidad de corriente inyectada, y no a la temperatura.** La diferencia de temperatura debido a las diferentes inyecciones de corriente es irrelevante, esto es debido a que las células comparten el mismo sustrato de alúmina (un muy buen conductor térmico) y a su baja potencia, y no justifica la diferente degradación medida que se mostrará en el capítulo siguiente.

Las diferencias de temperatura entre las distintas células, y respecto a la temperatura ambiente en la cámara son muy poco significativas para células de área pequeña como las de esta tesis, 1 mm². Sin embargo, esta cuestión debe ser considerada para las siguientes generaciones de ensayos con células multiunión comerciales de área grande, de entre 30 mm² y 100 mm², donde la inyección de corriente a considerar, implica una disipación de varios vatios por célula. Este tema lo trataremos en detalle en el capítulo 7.

5.4. Instrumentación

Una vez que la metodología ha sido desarrollada es necesario implementar un sistema automático de ensayo acelerado y medida de las células que nos permita poner en marcha la metodología propuesta. En este apartado vamos a exponer la instrumentación en su conjunto, explicando e identificando los requisitos para adaptarla a las células de concentración y condiciones de trabajo del ensayo. Para consultar detalles del diseño del hardware específico para el sistema de instrumentación, ver el Trabajo Fin de Master del doctorando [Núñez08], para consultar los detalles del software desarrollado, ver el Proyecto Fin de Carrera [Per09] del que el doctorando fue tutor.

Mientras el desarrollo del hardware se ha mantenido estable, durante la tesis se han debido introducir muchas modificaciones en el software con respecto a la versión inicial [Per09], mejoras en la precisión de las medidas, y ampliación de capacidades del software. La versión final del programa principal, permite controlar los ensayos y medir curvas I-V en oscuridad de células solares de concentración en dos cámaras climáticas a la vez, además se programaron versiones con funciones específicas para permitir medir la temperatura en la unión de las células [NVGJ+11], y también en los LEDs [NVN09], mientras los dispositivos tenían inyectada la corriente que emulaba sus condiciones de trabajo. Con el software desarrollado se realizaron algunas medidas de curvas I-V en HB-LEDs que se estaban ensayando en el mismo laboratorio [NVN09], [VNNB10]. A continuación describiremos el sistema de instrumentación desarrollado [NVGA+09], [NVGJ+11].

5.4.1. Descripción del sistema

El sistema de instrumentación se ha adaptado a la metodología y células que vamos a ensayar. Debido a la duración de los ensayos de vida acelerada (más de 10.000 horas de ensayo), a la complejidad de las medidas y a la cantidad de células a medir (hasta 36 células a la vez) es imprescindible un sistema de instrumentación automático. El lenguaje base en el que se ha desarrollado la programación para controlar el sistema automático de medida es el lenguaje LabVIEW® de National Instruments que es específico para instrumentación y que permite trabajar con el conjunto de la instrumentación como si se tratase de un único instrumento virtual [JF04], lo que supone un aumento de flexibilidad en cuanto a parámetros de

programación y un mantenimiento de la robustez frente a problemas software del conjunto del sistema.

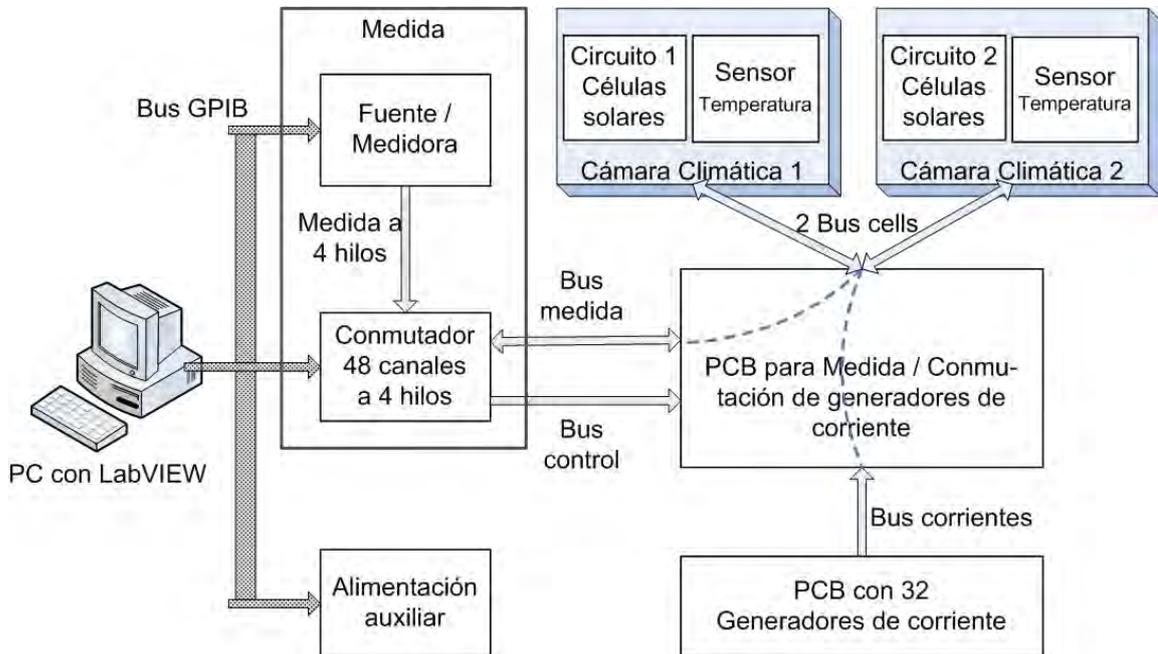


Figura 5.9: Diagrama de bloques del sistema, adaptado de [NVGJ+11].

En la Figura 5.9 se observa el diagrama del sistema de instrumentación. Los principales elementos del diagrama son de izquierda a derecha:

- Un ordenador personal (PC) con un programa específico desarrollado en LabVIEW® que trabaja como un Instrumento Virtual [JF04], que controla a través de un bus de propósito general (GPIB) toda la instrumentación. Con este software, el usuario selecciona la frecuencia de medida y controla los diferentes parámetros del ensayo, entre otros, el procedimiento de medida de las curvas I-V y la identificación del rango de células a medir y el código de ensayo. Un proceso posterior calcula la potencia generada de cada célula a partir de las curvas I-V en oscuridad.
- Un sistema de conmutación Keithley 3706, con una tarjeta multiplexora de alta densidad “3722 dual 1x48, High Density”. Dependiendo de las instrucciones ejecutadas desde el programa en LabVIEW®, la tarjeta multiplexora permite seleccionar el canal de medida de temperatura ambiente en las cámaras, o la realización de la medida eléctrica de la curva

I-V en oscuridad a 4 hilos. El sistema se ha diseñado para poder realizar dos ensayos a la vez, cada uno en una cámara climática independiente, y en cada una de ellas controlando el proceso de degradación de un circuito de ensayo con 18 células de concentración. Además este equipo proporciona las señales digitales necesarias para controlar el estado de los relés de conmutación de la placa de circuito impreso (PCB para conmutación entre medida/generación de corriente) Esta tarjeta que explicaremos posteriormente, se ha diseñado específicamente para este sistema de instrumentación.

- Una fuente de alimentación/medida Keithley 2601 (Sourceterm[®]), que entre sus funcionalidades más utilizadas está medir curvas I-V de dispositivos semiconductores, de acuerdo con las instrucciones programadas por el usuario. Dentro de los rangos de curva (I-V) medidos, la exactitud de la medida de voltaje es 50 μ V y la de la corriente 1 pA.
- Dos tarjetas de circuito impreso (PCB) con un total de 32 generadores de corriente individuales ajustables, adaptados a las necesidades de inyección y precisión de corriente de estos ensayos. Estos generadores simulan el estrés eléctrico en cada célula solar de concentración. Cada generador ha sido ajustado a la corriente adecuada poniendo en serie un multímetro Agilent 34401A con 6^{1/2} dígitos de resolución. El ajuste se ha realizado en cada ensayo con la célula a la temperatura del ensayo acelerado, y durante los ensayos se ha controlado periódicamente de forma manual que no se produjesen derivas significativas de la corriente ajustada.
- Una “PCB para conmutación de medida/generación de corriente”, que ha sido específicamente diseñada para esta instrumentación (Figura 5.10). Esta tarjeta tiene un sistema de relés que permite conmutar entre el estado de medida de las células y de inyección de corriente en directa, que simula la condición de trabajo nominal de la célula solar. Todos los relés montados en la placa son electromecánicos y tienen una impedancia máxima de contacto de 50 m Ω . Cada circuito de ensayo con 18 células está subdividido en dos subcircuitos con 9 células con el ánodo común, Figura 5.6, ya que esta configuración simplifica el cableado. Para medir las 18 células a cuatro hilos han sido necesarios 40 [(2x9+2)x2] cables especiales para alta

temperatura ya que se encuentran dentro de la cámara climática. Cuando se mide una de las células los cátodos del resto de las células quedan en abierto de modo que la inyección de corriente para medir la curva I-V sólo afecta a la célula medida. La pista de los ánodos es común a la inyección de corriente de envejecimiento de todas las células, por lo que estas pistas precisan relés de alta corriente para la conmutación.

- Dos cámaras climáticas Heraeus-Vötsch utilizadas para desarrollar dos ensayos acelerados a la vez. La temperatura en el interior ha sido medida constantemente durante el ensayo corroborando que las fluctuaciones máximas de temperatura son menores a las especificadas en el manual de servicio del modelo de cámara Heraeus-Vötsch VMT 10/140, $\pm 1^\circ\text{C}$.

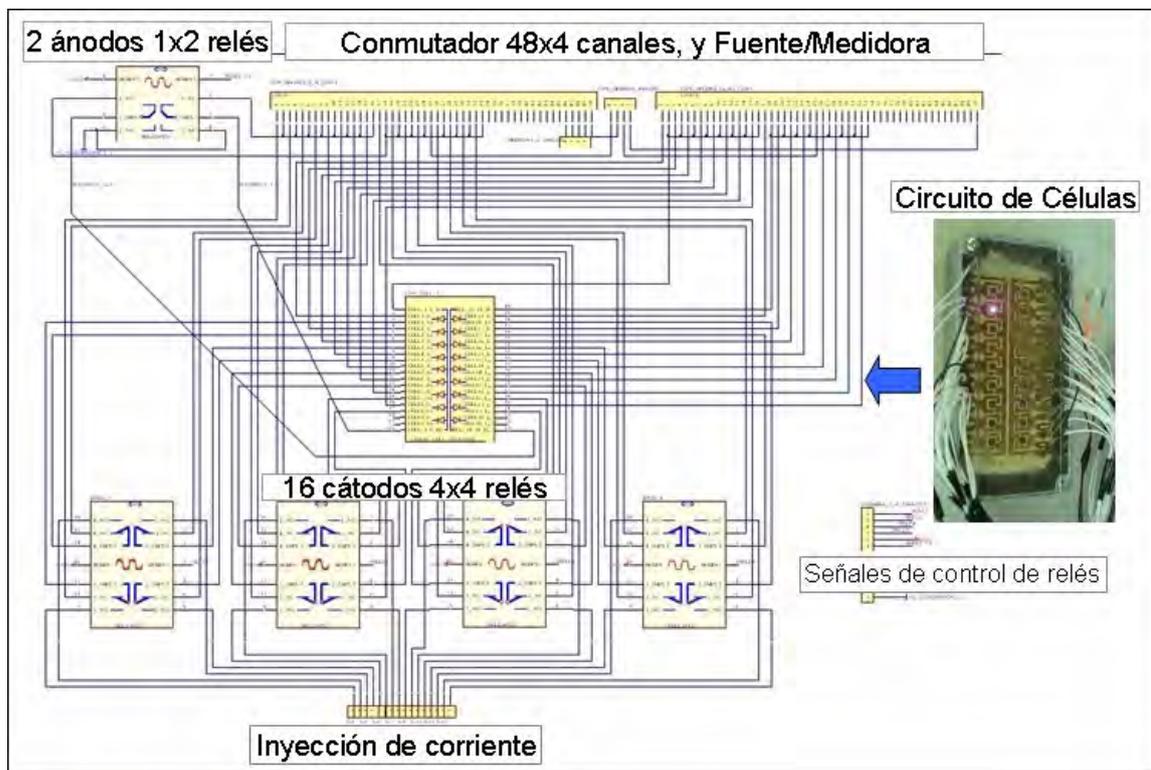


Figura 5.10: Esquema de la mitad de PCB conmutación: medida/generación de corriente. A la derecha circuito de ensayo durante la medida de la curva I-V en oscuridad, adaptado de [NVGJ+11].

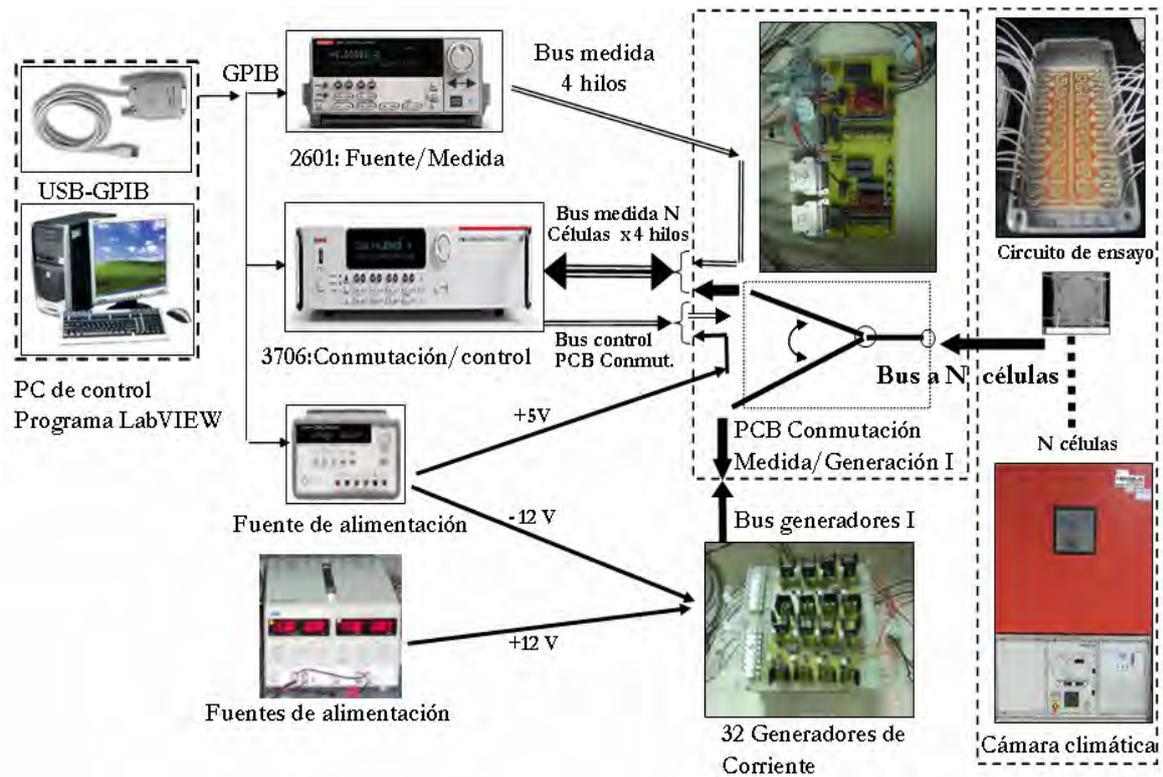


Figura 5.11: Fotografía de los elementos del diagrama de bloques.

Finalmente, en la Figura 5.11 se identifican los elementos del diagrama de bloques (Figura 5.9) con su fotografía, y en la Figura 5.12 una fotografía del sistema de instrumentación. En la zona derecha de la Figura 5.12 se observan las dos cámaras climáticas, a la izquierda el ordenador, en el centro las fuentes de alimentación y los equipos de medida y conmutación, y en la parte superior izquierda un detalle de los generadores de corriente y de la PCB de conmutación medida/generación de corriente que físicamente están situados detrás del equipo de medida.

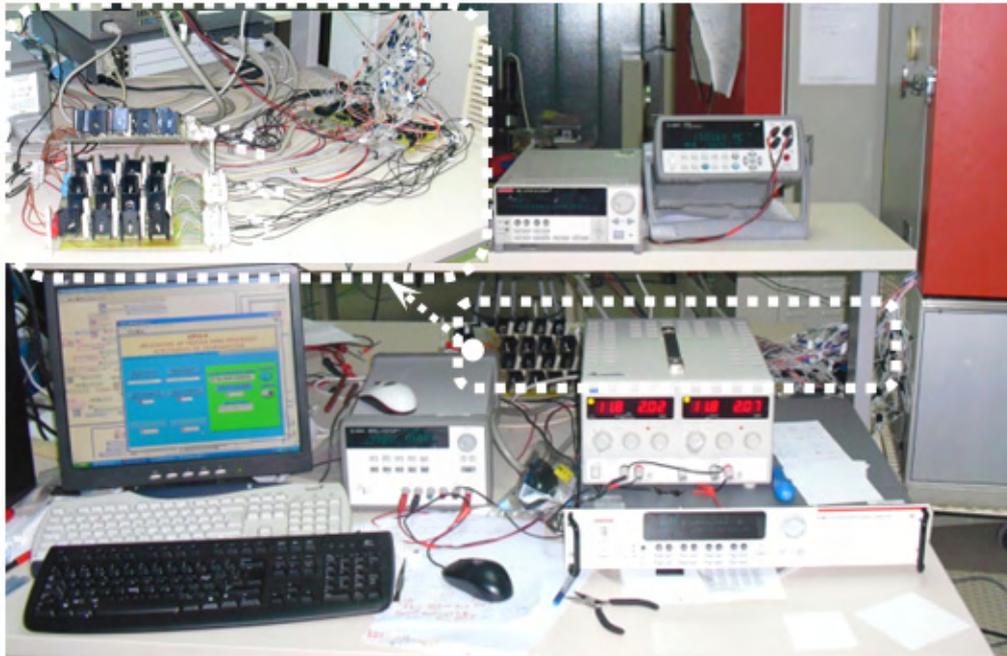


Figura 5.12: Fotografía de la instrumentación desarrollada para ensayos acelerados, Tomado de [NVGJ+11].

5.4.2. Requisitos del sistema de instrumentación

En esta sección describiremos los requisitos que tiene que tener el sistema de instrumentación en ambos estados; células solares con inyección de corriente en directa o medida de la curva I-V en oscuridad.

- Células solares en polarización directa (inyección de corriente). En este estado las células solares son polarizadas a un nivel de corriente que simula su condición de trabajo. En este estado la instrumentación debe tener los siguientes requisitos:
 - La corriente para cada célula debe ser suministrada por un generador de corriente ajustable. Se plantearon otras alternativas menos costosas y sencillas pero se descartaron por sus peores prestaciones. Una de ellas fue utilizar un generador de corriente en serie con todas las células del mismo nivel de concentración, pero si el generador de corriente falla, o una célula falla en circuito abierto, produce también un

fallo en el ensayo de todas las células, lo cual puede llegar a invalidar los resultados del ensayo a partir de ese momento.

- Los generadores de corriente deben ser independientes unos de otros, de modo que se puedan suministrar diferentes niveles de corriente a cada célula. Consideramos que la exactitud de la corriente de estos generadores debe ser del $\pm 2\%$.
- Considerando la prolongada duración de los ensayos, la corriente proporcionada por cada generador debe ser periódicamente controlada. Esto evita que anomalías en alguno de los generadores produzcan degradaciones erróneas en las células, y por tanto desvirtúen los resultados.
- Medida de la curva I-V en oscuridad. En este estado se mide periódicamente la curva I-V en oscuridad de cada una de las células, tras el periodo de inyección de corriente que emula las condiciones de trabajo. Se deben considerar los siguientes requisitos para obtener una medida exacta y precisa:
 - La curva I-V se ve influenciada por la temperatura de la célula de forma muy importante. Con el objeto de obtener resultados de medida precisos, la temperatura de las células solares debe ser mantenida estable e igual a la temperatura ambiente del ensayo. Para conseguir esto, después del estado de polarización se debe establecer un periodo de tiempo sin inyección de corriente para que se enfríe la célula hasta aproximadamente la temperatura ambiente del ensayo, y de ese modo todas las medidas se realizan a la misma temperatura. El periodo de espera se ha estimado en 15 minutos.
 - El rango de medida de voltaje y la resolución de la curva I-V para caracterizar la célula deben determinarse con mucho cuidado. La medida de la curva I-V se ha definido para obtener una buena medida de la potencia y, como se verá en el capítulo 6, para poder analizar los mecanismos de fallo a partir de la curva I-V en oscuridad mediante el modelo 3-D distribuido desarrollado en el IES [GVNA+09], [EAGN+10].

Este modelo identifica los parámetros de la célula solar a partir de su curva I-V medida en oscuridad.

- o El software desarrollado permite configurar la medida de la curva I-V en oscuridad entre diferentes posibilidades. En estos ensayos, se ha optado por la medida desde la tensión máxima de la curva I-V, a la mínima con decrementos constantes de tensión. La razón para hacerlo así es que el punto de máxima potencia está cerca de la tensión máxima de la curva I-V, y de este modo se minimiza el calentamiento de la célula durante la medida en este punto.

En la Figura 5.13 se observa la pantalla de control de los ensayos, programada con LabVIEW®. Esta pantalla permite al usuario la selección de los requisitos descritos en estos ensayos: los parámetros para medir la curva I-V en oscuridad, el intervalo de tiempo para inyección de corriente y el tiempo de espera sin corriente previo a la medida. Además se ha incluido a la derecha información del ensayo en tiempo real (cada 15 segundos), permitiendo comprobar la situación real de los dos ensayos simultáneos.

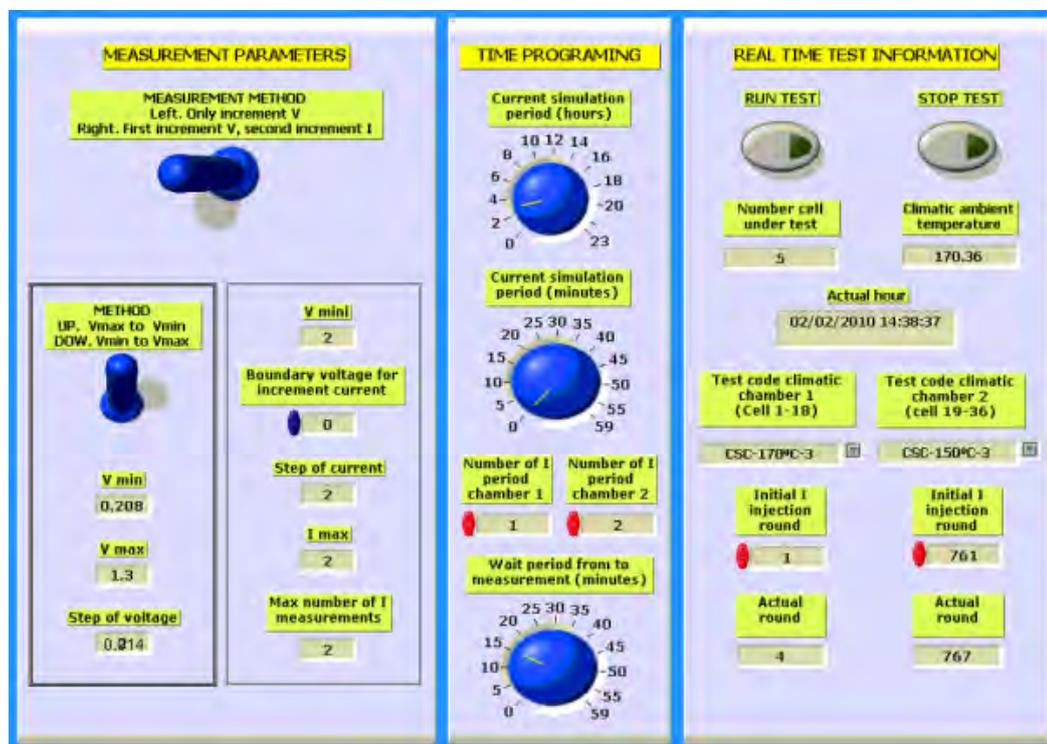


Figura 5.13: Pantalla de control del ensayo, [NVGJ+11].

En la Tabla 5.4 se ha indicado la definición y los valores de los principales parámetros de la medida de la curva I-V en oscuridad de las células durante los ensayos.

En la Tabla 5.5 se han indicado los periodos de emulación de condiciones de trabajo (inyección de corriente) entre medidas para cada ensayo, y su duración final. En cada circuito se han dejado 3 células a concentración 0X denominadas de referencia que sólo se han medido al principio y al final del ensayo, y sólo en el caso del ensayo de 170 °C se han ensayado además otras 3 células a 0X medidas dentro de la cámara cada 3 horas. En el capítulo 6 se analizan los resultados de todas estas medidas.

Tabla 5.4: Parámetros de medida de la curva I-V en oscuridad.

Parámetros de control	Condición	Valores del ensayo	Comentarios
Voltaje mínimo de curva I-V	Voltaje @ $I = 10^{-6}$ A	0,208 V	Los niveles adecuados cambian con la temperatura de ensayo
Voltaje máximo de la curva I-V	1,3 veces la tensión del punto de máxima potencia	1,3 V	
Corriente máxima de la curva I-V	1,3 veces la corriente del punto de máxima potencia	1 A	Un valor excesivo de corriente puede producir un estrés inadecuado durante la medida.
Resolución de voltaje	10 μ V a 2 V		
Resolución de corriente	100 nA a 1 A		
Proceso de medida de curva I-V en oscuridad	Saltos de tensión constate desde, V_{max} a V_{min}	$V_{max} = 1,3$ V $V_{min} = 0,208$ V	
Número de saltos de voltaje entre medidas	50 a 100.	Con 100 puntos 14 mV salto	
Precisión de cámara climática	± 1 °C	130°C, 150°C, 170°C	
Error de medida de temperatura ambiente cerca del circuito de ensayo	$\pm 0,4$ °C	PT100 type 1/3 class B + (YST AG – Y), 4 hilos	Sensor de capa gruesa, de 12 mm ² de área. Rápido tiempo de respuesta.
Retardo entre el estado de inyección de corriente y medida de las células.	15 min	15 min	Evaluación del retardo previo a los ensayos.

Tabla 5.5: Parámetros temporales de los ensayos.

Temperatura de ensayo	Niveles de concentración de las células en ensayo	Periodo de inyección de corriente entre medidas (horas)	Tiempo total de ensayo (horas)
130 °C	700 soles 0 soles como referencia.	18	4232
150 °C	700, 1050 soles 0 soles como referencia	6	5612
170 °C	700 soles, y 0 soles como referencia y en medida periódica	3	1026

5.4.3. Consideraciones adicionales en las medidas de curvas I-V

Para garantizar la estabilidad y calidad de las medidas del sistema de instrumentación se realizaron numerosas comprobaciones, entre otras:

- Comparación de la medida de la curva I-V en oscuridad a través de toda la instrumentación y en bornas de la fuente medidora Keithley 2601.
- Comparación de las curvas I-V en oscuridad medidas con la instrumentación del IES-UPM (Campus de Moncloa) y con las medidas con la instrumentación presentada, situada en la EUITT-UPM (Campus Sur). La única diferencia destacable es que las curvas I-V en oscuridad con esta instrumentación tienen menos ruido a muy bajas corrientes (10^{-8} A).
- Repetición de medidas cada 2 h y durante una semana de las curva I-V en oscuridad a temperatura ambiente para verificar que ésta no variaba.

Para mejorar la calidad de la medida de la curva I-V en oscuridad ésta se ha realizado de la siguiente forma:

- La medida de la curva I-V en oscuridad se realiza a 4 hilos con el objetivo de eliminar la influencia de las resistencias en serie.
- Para disminuir el ruido a baja corriente en la curva I-V, durante la medida se aísla físicamente la tensión de masa de los hilos de medida de las células del resto del sistema en contacto con las células (generadores de corriente), mediante relés electromecánicos.

- La curva I-V en oscuridad se realiza de mayor a menor tensión con el objetivo de minimizar el calentamiento de la célula en el punto en el que se evalúa P_{max} .
- A partir de la medida de la curva I-V en oscuridad se extrapola la potencia máxima de la célula, P_{max} . Como la curva I-V es muy sensible a las variaciones de temperatura, también influirá de forma importante en la evaluación de P_{max} . Por esta razón, antes de comenzar a medir la curva I-V en oscuridad de las células, el sistema se ha programado para esperar un periodo de tiempo de 15 minutos, de forma que las células adquieren una temperatura próxima a la de la cámara climática.
- La temperatura ambiente en la cámara se mide al inicio de cada curva I-V y el valor se introduce en la cabecera de su fichero de datos. El procedimiento de medida de temperatura es a 4 hilos mediante un sensor PT100 de alta exactitud y muy bajo tiempo de inercia térmica 9 segundos. De los dos aspectos tratados, ruido y temperatura, claramente la temperatura tiene una influencia mayor en la curva I-V en oscuridad de la que se extrapola la curva I-V en iluminación y se obtiene la potencia máxima generada, P_{max} , por los siguientes motivos:
 - El nivel de corriente en oscuridad al que se extrapola la potencia máxima en iluminación es alto, para una de las células a 130°C los valores concretos son $(V_{dark}, I_{dark})=(0,984 \text{ V}, 9,83761 \text{ mA})$, por tanto con las consideraciones anteriores el ruido eléctrico adicional es muy poco significativo.
 - El valor de la temperatura de medida sí es un parámetro crítico ya que diferencias superiores a 0,4 °C en la temperatura ambiente de la cámara climática, y por tanto en la célula pueden desvirtuar la medida de P_{max} .

La cámara climática regula su temperatura en un margen superior a 0,4 °C, en concreto en $\pm 0,5^\circ\text{C}$, este dato ha sido evaluado mediante medida directa. Este rango de temperatura respecto a la nominal de ensayo, supone que la medida P_{max} sufre incrementos o decrementos que pueden desvirtuar el valor de degradación calculado. Por esta razón durante el análisis de datos se ha corregido la potencia evaluada en la célula en función de la temperatura medida en la cámara (sensor térmico PT100)

respecto a la temperatura ideal de ensayo. Esta corrección no es relevante en términos absolutos de P_{max} ni para el conjunto del ensayo, pero sí entre medidas consecutivas de potencia relativa (P_{t1}/P_0) donde las diferencias son mínimas. El valor de corrección de P_{max} se ha calculado midiendo las P_{max} de las células a varias temperaturas e interpolando el incremento de potencia por °C de variación. Por ejemplo, para 700X se ha aplicado un ajuste a las medidas de $P_{max}/temperatura_camara$ de $3,0 \cdot 10^{-4} \text{ W/}^\circ\text{C}$.

5.5. Conclusiones

El objetivo del conjunto de la tesis es ofrecer una evaluación cuantitativa de la degradación en potencia y de la fiabilidad de las células solares de concentración bajo estudio, cuyos resultados se mostrarán en el capítulo siguiente. Sin embargo, como pasos intermedios para la consecución del objetivo ha sido necesario desarrollar una metodología e instrumentación. En este capítulo se han abordado, la metodología, el circuito de ensayos y el sistema de instrumentación para la realización de ensayos de vida acelerada (ALT) en células solares III-V de concentración.

Relacionado con la metodología para realizar ensayos de vida acelerada (ALT) en células solares de concentración, hay que exponer que consta de dos partes:

- Las células solares dentro de la cámara climática emulan su funcionamiento en iluminación mediante una inyección de corriente equivalente a la que fotogenera en condiciones normales de funcionamiento.
- Las prestaciones de las células solares se caracterizan dentro de la cámara climática a partir de la medida de la curva I-V en oscuridad

Debido a que en la metodología tanto el envejecimiento como la medida de la potencia generada en la célula se han realizado por procedimientos indirectos, es importante analizar la bondad de esta metodología. El principal problema de este análisis es la imposibilidad de comparar los resultados de esta metodología con datos reales, ya que ni la tecnología que se ensaya está suficientemente madura para tener datos en campo ni existe la posibilidad de realizar ensayos acelerados haciendo funcionar la célula solar en iluminación dentro de la cámara climática. Aunque no ha sido posible comparar la metodología con ensayos reales en campo la bondad de la metodología esta soportada además de por los resultados que se expondrán en el próximo capítulo, por las siguientes consideraciones:

- Aunque la metodología de envejecimiento solo simula la degradación eléctrica en condiciones normales de funcionamiento para células solares III-V, este es el parámetro principal de degradación ya que las células solares de III-V son altamente resistentes a la radiación.
- Se ha validado la metodología de caracterización (medida de potencia relativa) de las células a partir de la curva I-V en oscuridad.

Relacionado con el circuito de ensayo de células los principales objetivos son la fiabilidad y la buena disipación térmica. El circuito se ha caracterizado térmicamente midiendo la temperatura de las células a diferentes niveles de inyección de corriente y se ha observado que la diferencia entre temperaturas de células a distintos niveles de concentración emuladas es despreciable a efectos de degradación adicional en las células. Esto nos permite separar los dos efectos, temperatura y concentración (emulada mediante inyección de corriente), en el análisis de degradación de la célula.

A partir de la metodología propuesta se ha desarrollado un sistema de instrumentación que ha funcionado durante más de 10.000 horas de ensayo, permitiendo gracias a su precisión evaluar los pequeños incrementos de degradación de la célula durante los ensayos. A partir de los ensayos acelerados se ha evaluado la degradación y fiabilidad de las células solares como se puede ver en el capítulo 6 de la memoria. La precisión de la curva I-V se ha cuidado especialmente a bajas corrientes, no por el hecho de medir la P_{max} que se evalúa a corrientes mayores, sino porque en esa zona es donde primero se refleja la degradación de la célula que es analizada mediante la herramienta de caracterización de células 3D del IES-UPM [GARSG05].

El objetivo del sistema de instrumentación es emular la degradación de la célula en condiciones nominales de funcionamiento, y medir la evolución de los parámetros de la célula durante los ensayos acelerados, identificando los fallos abruptos y la degradación de potencia relativa de éstas. Una vez realizado el proceso de medida de la degradación de la potencia relativa durante los ensayos, las herramientas matemáticas estadísticas que se utilizan en el capítulo 6 de la memoria basadas en procesos físico/químicos nos permitirán extrapolar los resultados de degradación obtenidos en los ensayos acelerados a condiciones nominales de funcionamiento, y a partir de estos datos evaluar la fiabilidad y otros parámetros relacionados con ella, durante toda la vida de la célula.

Capítulo 6

EVALUACIÓN DE DEGRADACIÓN Y FIABILIDAD DE CÉLULAS SOLARES A PARTIR DE ENSAYOS

6.1. Introducción

En este capítulo vamos a mostrar los resultados obtenidos en los ensayos de vida acelerada (ALT – Accelerated Life Test) en temperatura realizados a las células solares III-V de concentración. El análisis de estos resultados nos ha permitido conseguir el principal objetivo de la tesis que es evaluar la degradación y fiabilidad ($R(t)$) en condiciones nominales de trabajo de la célula solar. El contenido de este capítulo se corresponde con las Actividades de la Tesis AT-3a (Realización de ensayos ALT) y AT-3b (Análisis de resultados de ensayos ALT) del plan de evaluación de fiabilidad, Figura 4.2.

En el capítulo 5 de instrumentación se han mostrado las pruebas y medidas comparativas que se realizaron para garantizar la calidad de la medida de la curva I-V en oscuridad y la extrapolación de P_{max} . Además de estas pruebas, y con el objetivo de eliminar posibles células con fallos infantiles se realizó un procedimiento específico de cribado. El objetivo de los ensayos de cribado es separar las células con posibles fallos infantiles de las células con fallos normales.

El ensayo de cribado, que es adicional al ensayo propiamente dicho, queda integrado en la exhaustiva secuencia de medida de las células (Figura 6.3) de cada uno de los ensayos acelerados. Nuestra experiencia es que en los ensayos acelerados hay que ser muy metódicos y exhaustivos a la hora de caracterizar la célula cada vez que se introduce una modificación en la condición ambiental o eléctrica de la célula, aunque esta modificación a priori sea irrelevante, ya que una vez comenzado el proceso de degradación no se puede hacer una medida de una situación previa.

Tras esta sección introductoria el capítulo se ha dividido en tres secciones:

- La sección 6.2 es la “Realización de ensayos”, incluye la temporización de los ensayos y el diagrama de flujo de medidas de cada uno de los ensayos.
- La sección 6.3 es el compendio de resultados de los ensayos acelerados, tanto las medidas directas de potencia relativa de las células, como el análisis de la influencia de la temperatura y la concentración en la degradación relativa de las células. A partir de estos análisis se identifica la

evolución de la degradación de potencia relativa media a cada concentración (700X y 1050X) y a condiciones nominales de trabajo. En esta sección también se realiza un análisis preliminar del mecanismo de degradación.

- La sección 6.4 recoge el análisis de fiabilidad a partir de los resultados de degradación de la célula. Para ello es necesario definir un nivel de degradación de potencia relativa como Límite de Fallo de la célula, y a partir de este valor estimar la función fiabilidad, el número de fallos durante la garantía, y el resto de parámetros relacionados con la fiabilidad.
- Al igual que el resto de capítulos terminamos con la a sección de resumen y conclusiones.

6.2. Realización de ensayos

Una vez el sistema de instrumentación ha sido ampliamente probado ya es posible comenzar los ensayos. Para ello se realizó la planificación de los ensayos [NV09], incluyendo el proceso de medida de las células, temperaturas previstas de los ensayos acelerados y periodo estimado de ensayo a partir de las estimaciones de MTTF obtenidas en ensayos previos [GVNA+09].

Los ensayos acelerados se han realizado sobre células de GaAs de 1 mm² con tecnología “LED-like approach” [ARSG+05], que fueron fabricadas en el IES-UPM. Se han ensayado tres circuitos de ensayo de 18 células, cada uno de ellos a una de las temperaturas de ensayo acelerado, 130 °C, 150 °C, y 170 °C respectivamente. Dentro de cada circuito las células se agruparon para probar tres condiciones de trabajo:

- Células sin inyección de corriente, denominadas a concentración **0X**. En esta condición la célula emula su situación en oscuridad o reposo en un sistema real. Por tanto son células en las que no se inyecta corriente en directa.
- Células a concentración **700X**. Se inyectan 112 mA en la célula emulando el estrés eléctrico de una concentración de 700 soles, ver sección 5.2.2.

- Células a concentración **1050X**. Se inyectan 168 mA en la célula emulando el estrés eléctrico de una concentración de 1050 soles, ver sección 5.2.2.

Los dos niveles de concentración ensayados están en el rango de concentración en el que las células de GaAs del IES-UPM ofrecen mayor rendimiento [AOR-SD+01] [Rey-S01], aproximadamente un 26,6% a 700X y 26,2% a 1050X.

6.2.1. Temporización de los ensayos

En el siguiente diagrama de Gantt se muestran las fechas de realización de los ensayos acelerados, a las que se han añadido la fase previa de prueba de la instrumentación, y la fase posterior de medida de temperatura en la unión de las células cuando eran sometidas a ensayo, sección 5.3.

Id.	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	2008		2009												2010				
				T4		T1			T2			T3			T4			T1		T2		
				dic	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr	may	
1	Prueba y calibrado instrumentación	01/12/2008	30/01/2009	[Barra azul]																		
2	Ensayo a 130°C	10/02/2009	29/09/2009	[Barra azul]																		
3	Ensayo a 150°C	01/06/2009	05/03/2010	[Barra azul]																		
4	Ensayo a 170°C	08/01/2010	15/03/2010	[Barra azul]																		
5	Medidas de Tª de unión en células	17/05/2010	26/05/2010	[Barra azul]																		

Figura 6.1: Diagrama de Gantt de los ensayos acelerados.

Como se observa en el diagrama de Gantt se comenzó con el ensayo de vida acelerado a 130°C, con la idea de realizar dos ensayos más de temperatura, uno por encima y otro por debajo. Sin embargo, pasadas 2000 horas del ensayo a 130°C, y debido a que la degradación de potencia relativa en las células era muy pequeña (tan solo una media del 1%), se decidió además de prolongar el ensayo de 130°C para tener un nivel de degradación mayor, cambiar la planificación para realizar los otros dos ensayos a temperaturas superiores, 150 °C y 170 °C.

En el ensayo acelerado de 150°C se decidió ensayar además de células a concentraciones emuladas de 0X y 700X ensayar también un grupo de células solares

a concentración de 1050X. De esta forma en el ensayo a 150°C se podrá analizar la influencia de la concentración en la degradación y fiabilidad de las células.

En la Tabla 6.1 se muestra el número de células medidas a cada concentración y la duración total del ensayo. El intervalo de tiempo entre medidas se indicó en el capítulo de instrumentación, pero es necesario aclarar que en el tiempo total del ensayo a 700X y 1050X sólo se consideran los periodos con inyección de corriente y no los de medida. Sin embargo, en el periodo de ensayo de las células a 0X sí se incluye todo el tiempo que la célula está en la cámara a alta temperatura, por simplificación no se ha reflejado en la tabla, pero si se ha considerado en las gráficas y en todos los cálculos.

En todos los ensayos se incluyeron células a 0X que se midieron sólo al comienzo y final del ensayo, que se podrían considerar células de referencia respecto a las células de su circuito con inyección de corriente. En el ensayo a 170 °C además de incluir tres células de referencia a 0X del tipo mencionado, se incluyeron otras tres células a 0X para evaluar la degradación a lo largo del ensayo, y se midieron con la misma frecuencia que las células a 700X.

Tabla 6.1: Temperatura de cada ensayo, duración total y número de células ensayadas a cada nivel emulado de concentración.

Temperatura (°C)	Duración (h)	Número de células a:		
		0X	700 X	1050X
130	4232	4	14	-
150	5612	3	10	5
170	1026	6(*)	12	-

* 3 de las 6 células que se utilizaron en esta condición de ensayo, se midieron periódicamente dentro de la cámara a la vez que las células con inyección de corriente a 700x. Las otras tres sólo se midieron al inicio y al final (del mismo modo que con las células a concentración 0X de los ensayos a 130 °C y 150 °C).

En la siguiente foto se observa el circuito de ensayo dentro de la cámara climática, con la salida de cables de medida, y los cables del sensor de temperatura

PT100 a cuatro hilos. Durante los ensayos se midió la temperatura con el sensor PT100 en el instante previo a medir la curva I-V de cada célula. Esta temperatura no es la temperatura de las células, pero es una buena referencia de las condiciones térmicas en el ambiente próximo al circuito en cada instante de medida de curvas. La medida de la temperatura ambiente es muy importante debido a la influencia de la temperatura en la curva I-V en oscuridad de las células de GaAs. La sensibilidad y rapidez de respuesta del PT100 ofrece una información mucho más precisa y fiable que la programación de la cámara climática.

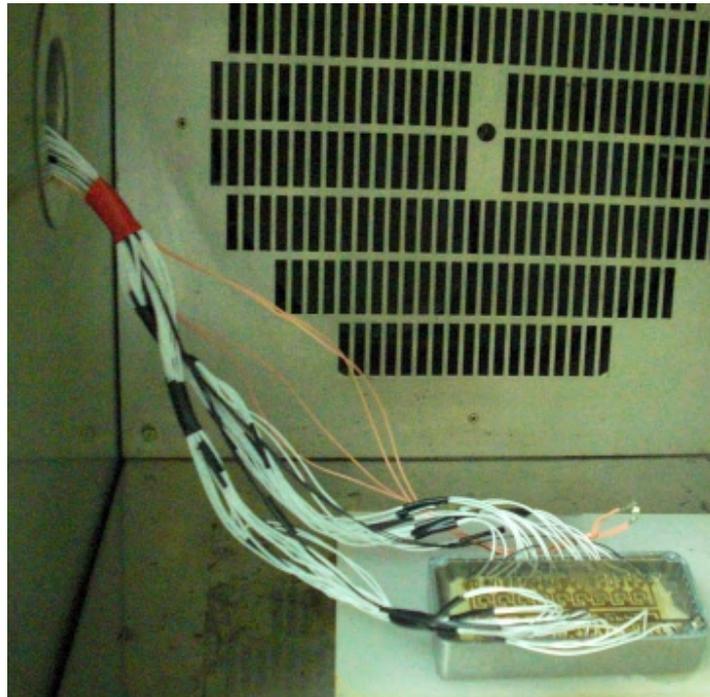


Figura 6.2: Células solares encapsuladas en un sustrato DBC (Direct Bonded Copper) cubiertas por silicona dentro de su caja de aluminio, en la cámara climática del ensayo.

6.2.2. Diagrama de flujo de medidas en los ensayos

La Figura 6.3 refleja mediante un diagrama de flujo el procedimiento de medidas de las células desde antes de estar encapsuladas hasta el final del ensayo acelerado.

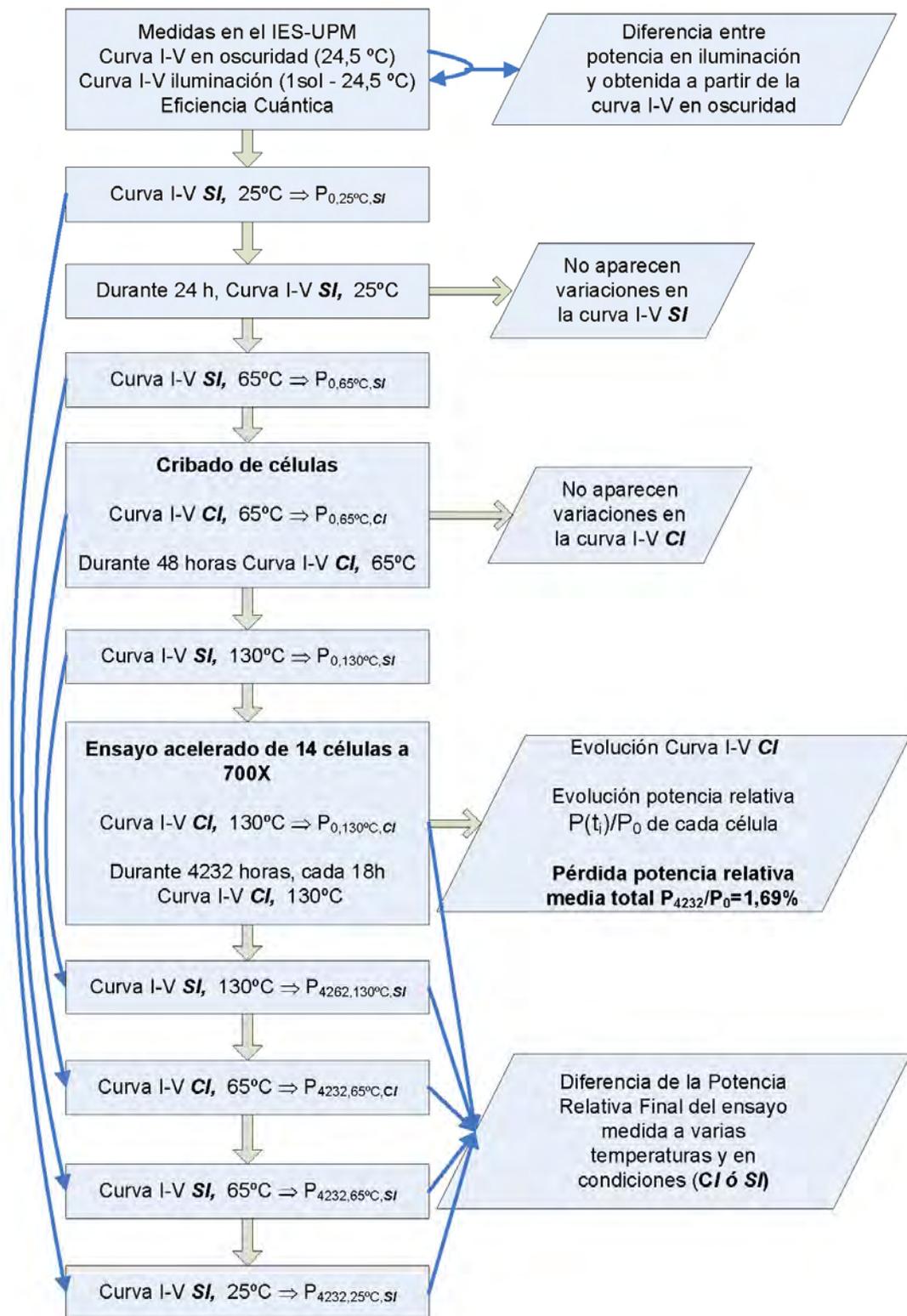


Figura 6.3: Diagrama de flujo de las medidas realizadas en los ensayos. Diagrama para el ensayo a 130°C.

A continuación se explican las diferentes medidas del diagrama de flujo:

- **Medida de la célula**, esta es la **curva I-V medida en oscuridad** dentro de la cámara climática y con el procedimiento de extrapolación explicado en el capítulo 5 se obtiene la curva I-V en iluminación, y finalmente se evalúa la P_{max} generada. Si se trata de otro tipo de medida se identificará en el texto. La medida de la curva I-V en oscuridad de la célula se puede realizar con la célula en dos situaciones:
 - **SI Sin Inyección de corriente previa** a la medida de la curva I-V en oscuridad. La célula lleva más de dos horas en la cámara sin inyección de corriente y se realiza la *medida de la curva I-V de la célula*.
 - **CI Con Inyección de corriente previa** en la célula a la medida de la curva I-V en oscuridad. Tras un periodo de inyección de corriente prolongado (varias horas) se interrumpe la corriente durante 15 minutos, y se realiza la *medida de la curva I-V de la célula*. Este periodo de espera se realiza para que la célula se enfríe y tenga una temperatura similar a la de la cámara climática, ya que durante la inyección de corriente en la célula ésta se calienta debido a la potencia que disipa. En la sección 6.2.4 comprobamos que esta espera de 15 minutos es suficiente para obtener una buena medida de la potencia de la célula.

$P(t_i)/P_0$ es la **potencia relativa de la célula**, siendo $P_0=P(t=0)$ la potencia inicial medida en la condición **SI** o **CI** para una determinada temperatura, y $P(t_i)$ la potencia medida en el instante posterior t_i para **la misma condición y temperatura. Las curvas de evolución de potencia relativa media son siempre para la condición CI** (Con Inyección de corriente previa), las medidas **SI** (Sin Inyección de corriente previa) sólo se realizaron al comienzo y final de los ensayos. La pérdida de potencia relativa en un instante en tanto por ciento es $[(1-(P_i/P_0)) * 100]$. A lo largo del análisis se utiliza esta nomenclatura, por ejemplo en el diagrama de la Figura 6.3 $P_{(4232)}/P_0=0,9831$ equivale a una pérdida de potencia relativa del 1,69%.

6.2.3. Cribado de células ensayadas

En la planificación del ensayo se decidió no considerar en el análisis de fiabilidad de las células aquellas con defectos evidentes de fabricación o montaje, es decir células con defectos infantiles, que fallarían en periodo de vida infantil durante las primeras horas de los ensayos acelerados.

Para eliminar las células con defectos infantiles se ha realizado un procedimiento de cribado. El objetivo de estos procedimientos de cribado a nivel de fabricación es eliminar componentes electrónicos débiles debido a algún defecto, y para definir un plan de cribado adecuado es habitual utilizar la norma UNE 200004-2 de 2003 “Cribado de fiabilidad mediante esfuerzos - Parte 2: Componentes electrónicos”, esta norma es la traducción de la IEC 61163-2 “Reliability stress screening - Part 2: Electronic components”. La norma UNE 200004-2 se aplica para componentes críticos por unos requerimientos muy altos de fiabilidad, como los utilizados en satélites o en comunicaciones submarinas. La norma define los ensayos de cribado que deben aplicarse a los dispositivos para que afloren los defectos infantiles (de fabricación) sin producirles envejecimiento o desgaste. A nivel práctico se utilizan ensayos a temperaturas altas para reducir los tiempos de ensayo y por tanto los costes, pero el nivel de temperatura del ensayo debe estar limitado para no introducir modos de fallos nuevos.

En nuestro ensayo de cribado sólo pretendemos garantizar que en las células que posteriormente vamos a ensayar se han identificado las células con fallos producidos durante las primeras horas por defectos infantiles como un mal montaje. Por tanto, para cada circuito realizamos un ensayo en cámara climática en condiciones nominales eléctricas de trabajo, inyección de corriente equivalente a una concentración de trabajo 700X o 1050X según la célula, y condiciones nominales de temperatura de trabajo en campo 65 °C. La duración del cribado fue de 48 horas de trabajo continuo, esto es equivalente a 6 días de trabajo en campo, suponiendo 8 horas de trabajo al día.

El resultado de los ensayos de cribado en todas las células de los tres circuitos es que ninguna de ellas evidenciaron variaciones en la potencia relativa ($(P(t=48h)/P_0) = 1$), medidas en condición **CI** y a 65 °C. De acuerdo con estos resultados no se

descartó ninguna célula de los ensayos acelerados debido a defectos de fabricación o montaje.

6.2.4. Comparación de potencia y potencia relativa medida a diferentes temperaturas

Como es conocido la potencia que generan las células solares disminuye al aumentar la temperatura. Esta disminución de la potencia de la célula con la temperatura también es observada cuando se evalúa a partir de la medida de la curva I-V en oscuridad ya que el valor de potencia generada (P_{max}) que obtenemos midiendo a 25°C, es superior a la potencia medida a 65°C, y a la vez ésta potencia es mayor que la potencia medida a la temperatura de los ensayos de vida acelerada. Para evitar este efecto en la caracterización de los diferentes ensayos, la caracterización de las células ensayadas se ha realizado a partir de las potencias relativas con respecto al valor inicial en vez de a partir de los valores absolutos de potencia.

Además, para poder comparar la pérdida media de potencia relativa en los tres ensayos (130°C, 150°C y 170°C), se debía contrastar que las degradaciones medidas eran equiparables, para ello se han comparado las potencias relativas de células en diferentes condiciones de medida y temperaturas.

Se ha realizado un análisis evaluando la potencia relativa al final del ensayo medida a la temperatura del ensayo y en condición **CI**, y se ha comparado con la potencia relativa medida a 25 °C en condición **SI**, ver Tabla 6.2. De los datos de la tabla se puede concluir que la potencia relativa media final prácticamente no depende de la temperatura de medida y de la condición **SI** o **CI** de medida (solo varía en la cuarta cifra significativa). Aunque esta comparación es el peor caso en diferencia de temperatura, también se han realizado comprobaciones con las medidas a 65 °C corroborando esta conclusión. Esta conclusión es muy importante ya que de esta forma las degradaciones medidas durante los diferentes ensayos son comparables entre sí y comparables con las condiciones nominales de funcionamiento.

Tabla 6.2: Valores de potencia relativa media final ($P(t=final)/P_0$), al acabar cada uno de los ensayos acelerados, con las células medidas a temperatura de ensayo y a 25 °C y en las condiciones de medida indicadas **CI** o **SI**. Cada subtabla está encabezada por el ensayo correspondiente, el número entre corchetes es la diferencia entre el **resultado del ensayo final**, y la medida en la condición de medida de la celda.

Temperatura	Potencia relativa final Condición de medida CI	Potencia relativa final condición de medida SI [Diferencia respecto al resultado del ensayo]
ENSAYO 130 °C		
130°C	0,98314 <i>Resultado del ensayo</i>	0,98384 [-0,00070]
25°C		0,98237 [0,00077]
ENSAYO 150 °C		
150°C	0,97219 <i>Resultado del ensayo</i>	
25°C		0,97175 [0,00045]
ENSAYO 170 °C		
170°C	0,97426 <i>Resultado del ensayo</i>	
25°C		0,97350 [0,00076]

6.3. Resultados de los ensayos acelerados

Como se ha indicado la medida que caracteriza a la célula durante los ensayos, es la curva I-V en oscuridad, a partir de ella se obtienen la curva I-V en iluminación y la P_{max} . La curva I-V en oscuridad se utilizará a lo largo del ensayo para:

- Identificar donde se producen físicamente los defectos que producen la degradación de la célula. Para ello es necesario un modelado software adecuado del dispositivo semiconductor que permita identificar qué parámetros se degradan a partir de las curva I-V en oscuridad iniciales y finales del dispositivo durante el ensayo.
- Evaluar la potencia máxima P_{max} que extraemos a partir de la curva I-V en oscuridad según los procedimientos indicados [ASHK+03][Anton04]. A partir del valor de P_{max} se representa la curva de evolución de potencia relativa respecto al tiempo de ensayo ($P(t_i)/P_0$). Y a partir de estas curvas y con los cálculos adicionales que se irán desarrollando a lo largo del capítulo

obtendremos las diferentes funciones y parámetros de fiabilidad que es el principal objetivo de esta tesis.

En los próximos apartados vamos a analizar las curvas de evolución de potencia relativa media e individual $(P(t_i)/P_0)_{\text{cell-x}}$ de cada célula en cada ensayo acelerado que se han obtenido a partir de las curvas I-V en oscuridad. Para ello seguiremos el siguiente procedimiento:

1. Descripción de los resultados de la evolución de la potencia relativa de cada célula y de la potencia relativa media de las células en las mismas condiciones de temperatura de ensayo y concentración.
2. Análisis de la influencia de la temperatura. Para ello hemos realizado el ensayo a tres temperaturas diferentes, 130°C, 150°C y 170°C. A partir de estos ensayos se evaluarán los factores de aceleración debido a la temperatura y la utilización de modelos de aceleración con la temperatura como el modelo de Arrhenius.
3. Análisis de la influencia de la concentración. Se analizará para el ensayo de 150°C la influencia de la concentración, 700X y 1050X, en la degradación.
4. Análisis de identificación del mecanismo de fallo de las células que produce la degradación en potencia. Descripción de los resultados preliminares obtenidos [EAGN+10] a partir de la herramienta de simulación 3D de células solares de concentración desarrollada por el IES-UPM [GARSG05].

6.3.1. Resultados de pérdida relativa de potencia en los ensayos acelerados

Durante los tres ensayos acelerados ninguna célula falló de forma catastrófica por lo que el análisis de la fiabilidad se ha realizado a partir de la degradación de las células. En este apartado mostraremos los resultados de la degradación de potencia de las células solares en los diferentes ensayos.

La potencia de cada una de las células ha sido medida dentro de la cámara climática periódicamente obteniéndose la evolución de la potencia relativa de cada célula con el tiempo $(P(t_i)/P_0)_{\text{cell-x}}$. En la siguiente figura se muestra la evolución de la potencia relativa de las diferentes células a diferentes temperaturas y emulación de concentración, tanto en los ensayos a 700X, como en el ensayo a 1050X.

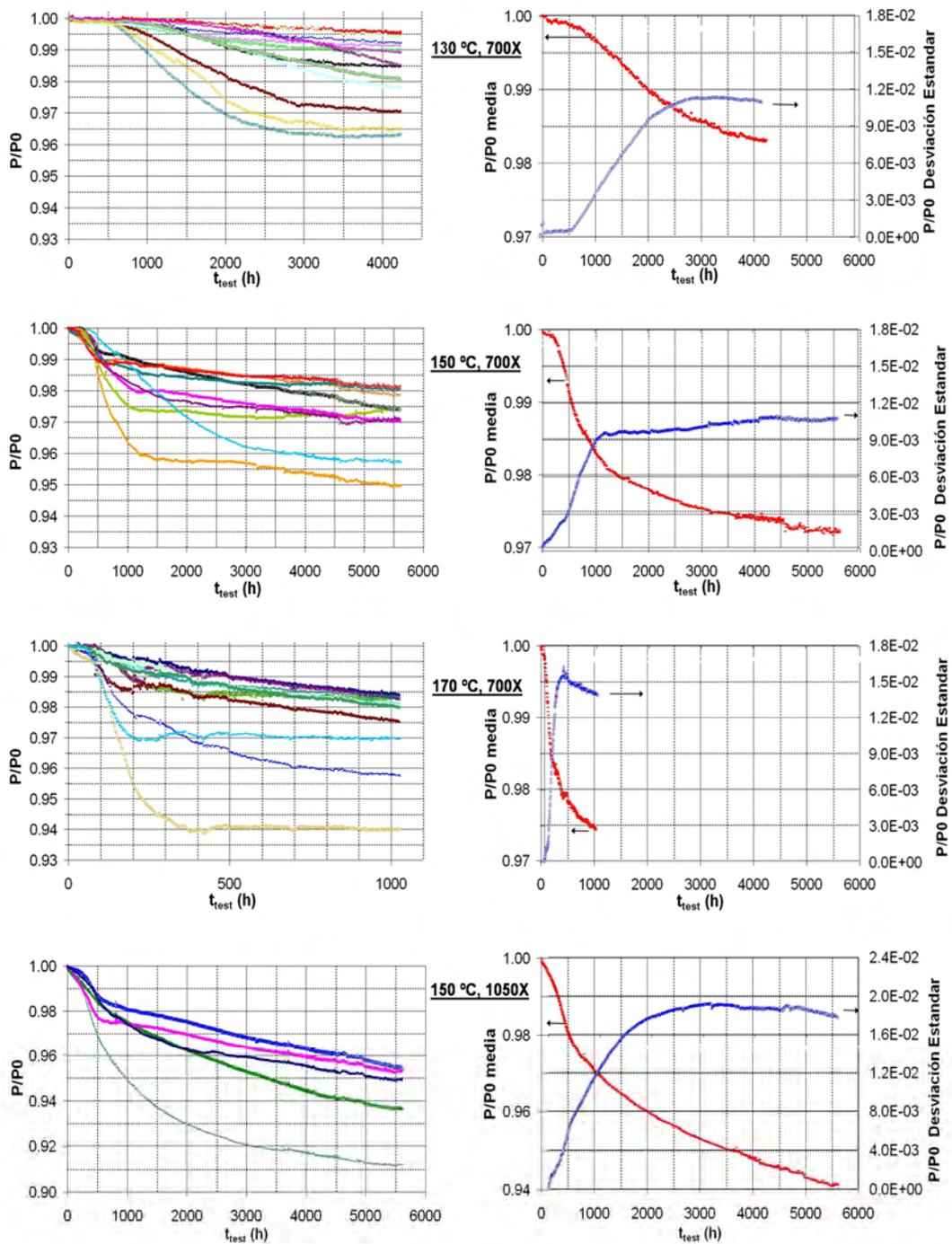


Figura 6.4: A la izquierda, potencia relativa de las células ensayadas respecto al periodo acumulado de inyección de corriente, tiempo de ensayo t_{test} . En la columna central condiciones del ensayo. A la derecha potencia relativa media (eje de *ordenadas* izquierdo) y desviación estándar de la potencia relativa (eje de *ordenadas* derecho) con respecto al tiempo de ensayo. En las figuras del lado izquierdo los ejes de tiempo están en diferente escala de tiempos.

En las curvas de potencia relativa media de las células respecto a tiempo de ensayo (lado derecho de Figura 6.4), se pueden observar tres periodos. Cada uno de los periodos se corresponde con una pendiente de la curva, y por tanto con una velocidad de la degradación. También pueden observarse en las curvas de desviación estándar de la misma gráfica aunque de forma menos clara los tres periodos a los que nos referimos:

- *Primer periodo*, es muy corto y en él la degradación es despreciable.
- *Segundo periodo*, con una velocidad de pérdida de potencia relativa fuerte. Si se observan las células de modo individual en cada ensayo se observa una pequeña proporción de células que tienen una pendiente muy fuerte respecto al resto, lo que hace que en la curva de desviación estándar (columna derecha de Figura 6.4, eje ordenadas derecho) exista un incremento muy fuerte en el *segundo periodo*.
- Tercer periodo, la degradación pasa de una pendiente fuerte a una pendiente menor que progresivamente se va acercando a la estabilización.

Como se observa estos tres periodos están reflejados en todos los ensayos en concentración, por lo que es posible que haya un factor de aceleración en tiempo que dependa de la temperatura. La cuantificación de esta relación se tratará en el siguiente apartado.

Considerando los ensayos descritos en la Tabla 6.1, y los resultados de la Figura 6.4 la pérdida de potencia relativa media al final de cada ensayo ha sido reflejada en la siguiente tabla.

Tabla 6.3: Pérdida de potencia relativa total de cada ensayo y duración del ensayo.

		Pérdida de potencia relativa en % a:		
Temperatura (°C)	Duración (h)	0X	700 X	1050X
130	4232	0,24	1,69	-
150	5612	0,68	2,78	5,87
170	1026	0,55	2,57	-

A partir de la Tabla 6.3 que muestra la degradación de los diferentes ensayos no es posible obtener información cuantitativa de la influencia de la concentración y temperatura en la degradación ya que la duración de los ensayos no es comprable. Sin embargo, como resultado preliminar sí se puede concluir que para una temperatura de ensayo determinado la degradación aumenta con el nivel de concentración emulado, como se puede ver claramente en el ensayo a 150 °C.

En el capítulo 5 de la memoria se midió la temperatura de cada célula ensayada a 150 °C, evaluando diferencias menores a 1 °C en casos extremos de inyección de corriente [NVGJ+11]. Por tanto, estas diferencias de temperatura no explican la diferencia en la degradación de las células, que viene definida por la densidad de corriente inyectada. La degradación medida a 700X o 1050X, es debida al conjunto de efectos que suponen la inyección de corriente (densidad de corriente) y la temperatura. La temperatura de la célula es debida a la temperatura de la cámara climática y al calentamiento debido a la corriente inyectada. Por tanto para evaluar su degradación a temperatura real de funcionamiento en concentración (por el día) es necesario obtener el factor de aceleración en tiempo respecto a la temperatura nominal de trabajo en iluminación, aproximadamente 65 °C [Algora07]

Además de considerar la condición de trabajo en campo en concentración hay que considerar la condición de reposo u oscuridad, donde la célula no genera energía, que emulamos con células a condición 0X que no tienen inyección de corriente, pero que comparten el circuito y la condiciones de alta temperatura del resto de células ensayadas.

La Figura 6.5 refleja la evolución de la potencia relativa media de las tres células del ensayo a 170°C (Tabla 6.1) medidas periódicamente sin corriente (0X).

En la Figura 6.5 se observa una degradación muy baja y progresiva que sigue prácticamente una relación lineal con el tiempo.

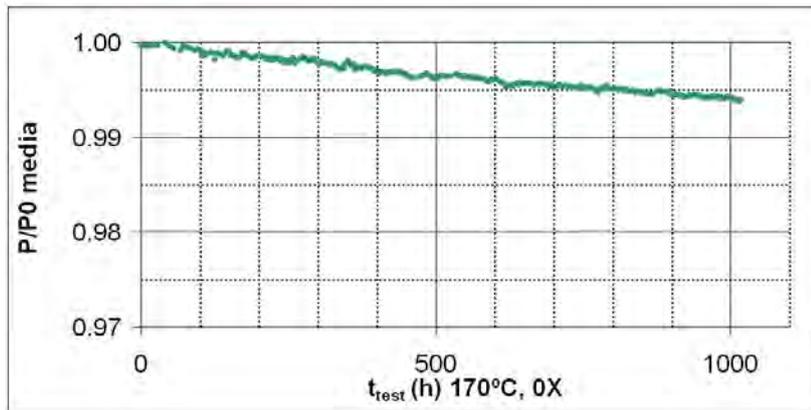


Figura 6.5: Evolución de la potencia relativa media en función del tiempo de ensayo a 170°C, para las células sin inyección de corriente (0X). Exclusivamente para el ensayo 0X, t_{test} es el tiempo acumulado de la célula dentro de la cámara de ensayo.

6.3.2. Energía de activación y *Factor de Aceleración* en función de la temperatura

El objetivo de los ensayos acelerados es obtener información de la degradación y fiabilidad de las células solares en condiciones normales de funcionamiento a partir de los ensayos acelerados que se realizan en un periodo de tiempo mucho más corto.

En los SFC con seguimiento, podemos considerar que funcionan aproximadamente durante 8 horas al día al nivel de concentración definido de la célula solar (700X o 1050X) y se encuentran las otras 16 horas del día en la condición de reposo en oscuridad sin generación de corriente (0X), al periodo de tiempo transcurrido en la condición normal de trabajo lo hemos denominado a lo largo de este capítulo t_{work} . De momento como estamos analizando siempre los ensayos considerando el tiempo acumulado de condición de inyección de corriente “continua y constante” es decir emulando que la célula trabaja en concentración sin periodos de reposo en oscuridad.

Posteriormente como se indicará en la memoria se introducirá la condición de reposo en los análisis, y por tanto se considerará que un tercio de la vida la célula se encontrará en iluminación y dos tercios en oscuridad. Entre la condición de concentración y la de reposo de noche reales, además del cambio de corriente, existe un salto térmico importante que podría afectar al SFC y en concreto a la zona del receptor y la célula, por las diferentes dilataciones de los materiales que rodean la

célula en el receptor, esto podría requerir ensayos acelerados específicos de ciclos térmicos.

La temperatura de funcionamiento de las células en iluminación y oscuridad es diferente, como ya se ha indicado previamente en el capítulo, concretamos como se tratan cada uno de los dos estados de la célula:

- Respecto a la condición de funcionamiento en iluminación y para las dos concentraciones ensayadas 700X y 1050X se ha considerado una temperatura en la célula a estas concentraciones de 65°C, como se reflejó en el análisis previo [Algora07].
- Respecto a la condición de reposo, equivalente en nuestro caso a los ensayos a 0X, se ha considerado en los cálculos una temperatura en la célula de noche de 25°C, que es un valor en general elevado para ser de noche.

Para la evaluación del factor de aceleración en temperatura vamos a analizar la degradación de las células con inyección de corriente emulando la concentración 700X, porque esta condición se ha ensayado a las tres temperaturas de vida acelerada 130 °C, 150 °C y 170 °C.

En el caso de los ensayos con estrés térmico y cuando es un mecanismo físico-químico en el dispositivo semiconductor el que produce el fallo o la degradación, el factor de aceleración en tiempo entre los resultados de dos ensayos a diferentes temperaturas sigue en la mayoría de los casos el modelo de Arrhenius, que fue explicado en el capítulo 4 de la memoria.

En el modelo de relación vida-estrés de Arrhenius (Arrhenius life-stress model), la vida del dispositivo se expresa del siguiente modo:

$$L(T) = Ae^{\frac{E_A}{kT}} \quad (6.1)$$

Como dijimos en el capítulo 4, $L(T)$ indica una característica temporal cuantificable dependiente de la temperatura (T). A es un parámetro de Arrhenius que depende de la característica temporal seleccionada de $L(T)$ y del dispositivo, k es la

constante de Boltzmann ($k = 8.617343 \times 10^{-5}$ eV/°K), y E_A es la energía de activación del mecanismo que determina los resultados de los ensayos, en este caso es el mecanismo que causa la degradación.

En nuestro análisis, $L(T)$ es el periodo de tiempo transcurrido en el ensayo con inyección de corriente, que depende del valor concreto de pérdida de potencia elegida y de la temperatura del ensayo acelerado ($t_i(x\%, T)$). Consideramos la pérdida de potencia relativa en tanto por uno ($1 - (P(t_i)/P_0)$), o en tanto por ciento ($100 \times (1 - (P(t_i)/P_0)) = x\%$). Habitualmente cuanto mayor sea la temperatura, T , menor será el tiempo al que la pérdida de potencia relativa media alcance el valor de $x\%$.

Para comprobar si el mecanismo de degradación cumple la ley de Arrhenius utilizaremos para las tres temperaturas de ensayo el valor de $L(T)$ para un nivel concreto de pérdida de potencia relativa media $x\%$. Puesto que en los ensayos con concentración 700X, el ensayo que ha acabado con menor pérdida de potencia relativa media es el de 130 °C con un 1,69 %, hemos elegido cuatro valores de $x\%$ menores a 1,69 %. Para distribuirlos equilibradamente hemos elegido los valores correspondientes al 0,4 %, 0,8 %, 1,2 % y 1,6 % (Figura 6.6). Para cada una de estas pérdidas de potencia media se tienen tres valores de tiempo, uno para cada temperatura, 130 °C, 150 °C y 170 °C. A estos tres valores de tiempo les aplicaremos el modelo de Arrhenius con el objetivo de evaluar la energía de activación que podría relacionarlos, y si es así extrapolar los datos a condiciones normales de funcionamiento.

El primer paso de la evaluación es linealizar la ecuación (6.1), aplicando logaritmos neperianos a ambos lados:

$$\ln(t_{i(x\%, T)}) = E_A \cdot (1/kT) + \ln(A) \quad (6.2)$$

Utilizando una representación gráfica de Arrhenius, representamos $\ln(t_i(x\%, T))$ con respecto a $1/kT$ obteniendo mediante mínimos cuadrados la pendiente (E_A) y el termino independiente de la recta ($\ln(A)$). Si los puntos están alineados tendremos una pendiente para cada $x\%$ (pérdida de potencia relativa media) definido.

En la Figura 6.6 se muestran las cuatro representaciones de Arrhenius, una para cada una de las cuatro pérdidas de potencia relativa elegida (0,4%, 0,8%, 1,2% y 1,6%). Si se observa en la Figura 6.4 el ensayo a 700X y 130°C, los periodos de tiempo

de ensayo correspondientes a estos valores de potencia relativa media, los tres primeros están en el *segundo periodo* de la curva, y el mayor (1,6%) al comienzo del *tercer periodo*.

Como se puede observar cada una de las cuatro representaciones de Arrhenius sigue una línea recta lo que implica que el mecanismo de degradación se ajusta a una ley Arrhenius. También de la gráfica se puede observar que las cuatro rectas tienen la misma pendiente por lo que la Energía de Activación, E_A , es la misma durante el proceso de degradación analizado (todo el segundo periodo y parte del *tercero*). A partir de la E_A calculada se puede evaluar el factor de aceleración en tiempo entre dos temperaturas cualesquiera, ecuación (6.3).

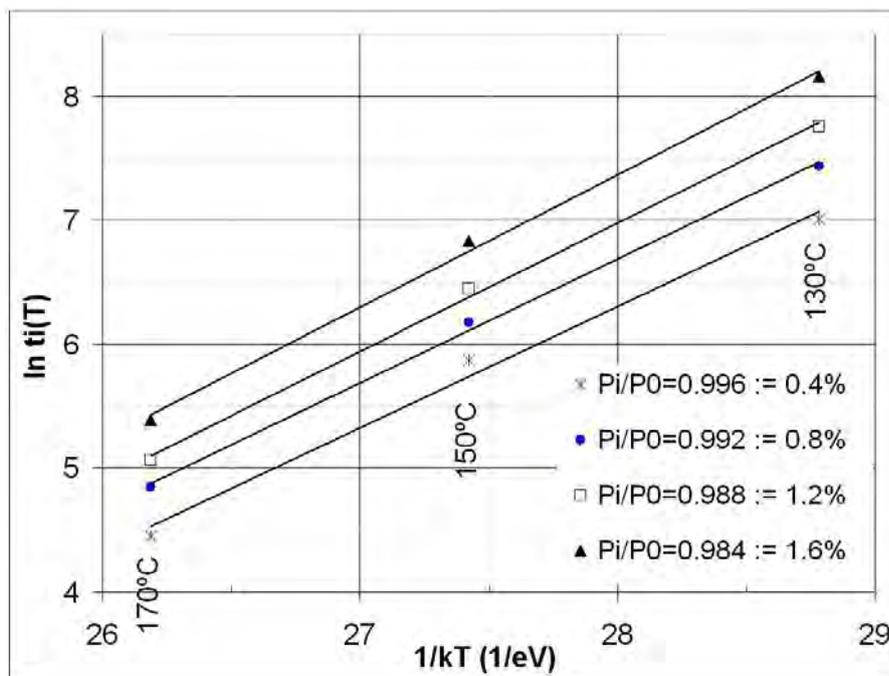


Figura 6.6: Diagrama de vida-estrés de Arrhenius, para los tres ensayos acelerados a concentración 700X y 4 valores de potencia relativa.

La energía de activación (E_A) evaluada mediante la pendiente de las rectas de la Figura 6.6 tiene un valor de $1,02 \pm 0,04$ eV. Una vez que se ha evaluado la energía de activación (E_A), el factor de aceleración (FA) en tiempo del mecanismo de degradación se puede obtener a partir de la siguiente ecuación:

$$FA = \frac{t_i(T_{uso})}{t_i(T_{ace})} = \exp \left[\frac{E_A}{k} \left(\frac{1}{T_{uso}} - \frac{1}{T_{ace}} \right) \right] \quad (6.3)$$

Donde T_{uso} es la temperatura de funcionamiento nominal prevista (65°C), y T_{ace} es una de las temperaturas de ensayo acelerado.

Debido a que en la Figura 6.6 se han evaluado pérdidas de potencias relativas medias de hasta el 1,6%, (el máximo de 130°C era 1,69%) y sin embargo los ensayos a 150°C y 170°C a 700X tienen posteriormente valores de degradación superiores, es necesario comprobar si la energía de activación calculada también es aplicable en el rango de degradaciones superiores a 1,6%.

La Figura 6.7 refleja la evolución con el tiempo equivalente a 130°C de la potencia relativa media de los tres ensayos a concentración 700X. En el ensayo a 130°C se ha mantenido el tiempo real de ensayo (t_{test}), en los ensayos a 150°C y 170°C se ha multiplicado su respectivo tiempo real de ensayo por el Factor de Aceleración correspondiente considerando para cada uno de ellos una temperatura de uso de 130°C. Para ello aplicando la $E_A=1,02$ eV en la ecuación (6.3) el Factor de Aceleración en tiempo del ensayo de 150°C con respecto a 130°C es 4,01. Del mismo modo el Factor de Aceleración de 170 °C con respecto a 130°C es 14,18.

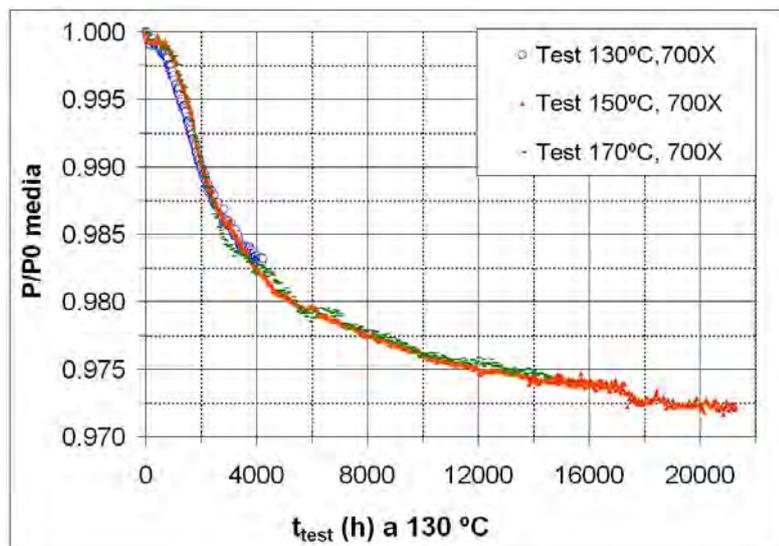


Figura 6.7: Evolución de las potencias relativas medidas de los tres ensayos acelerados a 700X. En el eje de ordenadas el tiempo de ensayo a 130 °C.

El excelente ajuste entre los tres ensayos observado en la Figura 6.7 hasta la finalización del ensayo a 130°C, y el mantenimiento del ajuste entre los otros dos ensayos con tiempo equivalente más prolongado, 150°C y 170°C, justifica que la Energía de Activación (E_A) obtenida puede aplicarse a todo el rango de evolución de los ensayos. Por tanto, dado que existe una única E_A durante todos los ensayos, se puede concluir que en las células se mantiene el mismo mecanismo que produce la degradación de potencia generada por las células durante el transcurso de todos los ensayos.

Una vez evaluada la energía de activación y validada durante toda la duración de los ensayos, es posible extrapolar la curva de degradación (potencia relativa media) con el tiempo a cualquier temperatura, para ello se ha empleado la curva de degradación del ensayo a 150°C que es la más prolongada en tiempo equivalente, como se puede apreciar en la Figura 6.7.

En la Tabla 6.4 se han calculado mediante la ecuación 6.3 los factores de aceleración de la curva de degradación a 150°C de la Figura 6.4, respecto a la temperatura de uso real de 65 °C, y otras posibles temperaturas de utilización dependiendo de las condiciones de disipación de la célula. Estos factores de aceleración en función de la temperatura de uso van a permitir realizar un análisis de la degradación y posteriormente de la fiabilidad a distintas temperaturas de trabajo.

Tabla 6.4: Factor de Aceleración del instante de ensayo-degradación a 150°C respecto a diferentes temperaturas de uso.

	FA a T_{uso} 50 °C	FA a T_{uso} 65 °C	FA a T_{uso} 80 °C	FA a T_{uso} 95°C
$E_A=1,02$ eV	5786,7	1138,0	257,0	65,5

En la Figura 6.8 y Figura 6.9 se puede observar la evolución de la potencia relativa media de las células a 700X y 1050X respectivamente, a diferentes temperaturas de operación posibles. Estas graficas reflejan que la temperatura de operación tiene una influencia muy importante en la evolución de la potencia relativa. Además, puesto que en los ensayos acelerados con inyección de corriente emulando concentración, sólo se han considerado las horas con inyección de corriente, los ejes de tiempos de ambas figuras reflejan horas continuadas e ininterrumpidas de

emulación de trabajo, es decir horas de recepción de sol al nivel nominal de concentración sin periodo de reposo nocturno, denominaremos al tiempo $t_{\text{concentr_continua}}$. Posteriormente tendremos en cuenta el ciclo de 8 horas de trabajo y 16 horas de reposo por día.

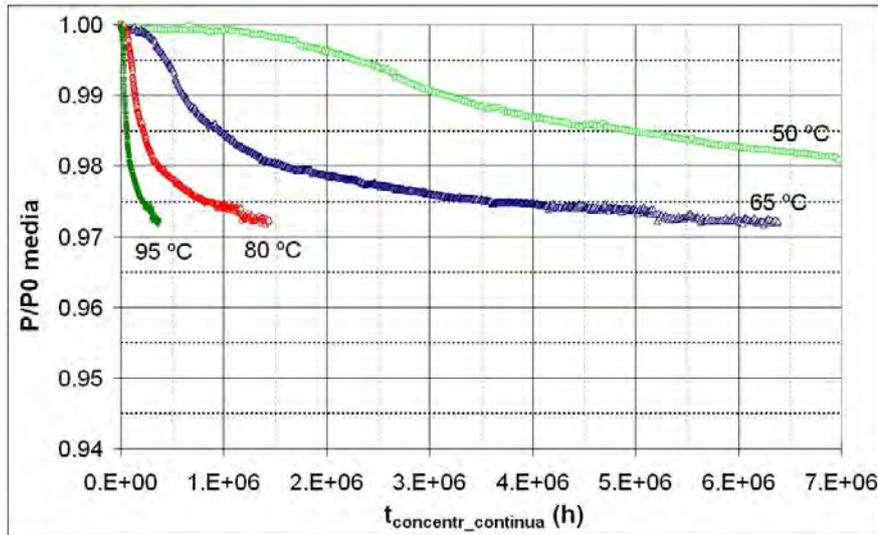


Figura 6.8: Gráfico de evolución de la potencia relativa media de las células a 700X considerando tiempo de trabajo continuo ($t_{\text{concentr_continua}}$) sin periodo de reposo nocturno, en función de diferentes temperaturas de operación (T_{uso}).

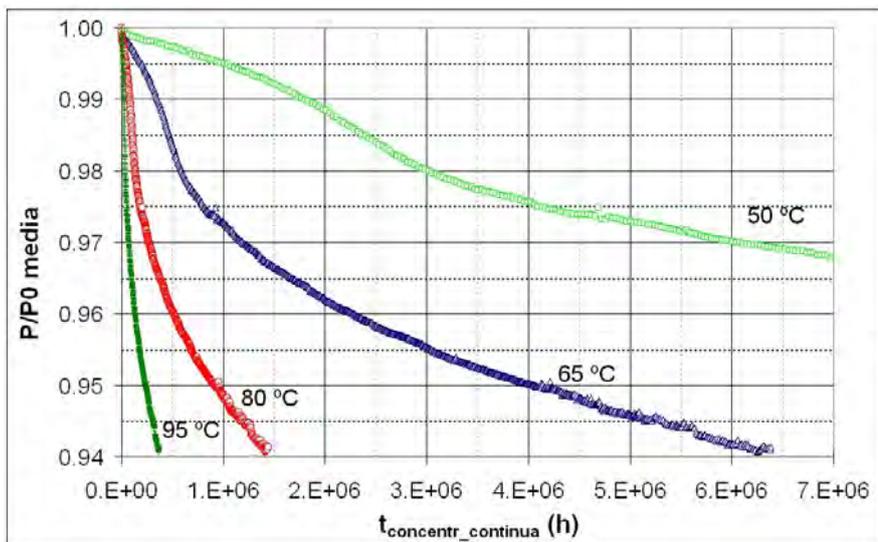


Figura 6.9: Gráfico de evolución de la potencia relativa media de las células a 1050X considerando tiempo de trabajo continuo ($t_{\text{concentr_continua}}$) sin periodo de reposo nocturno, en función de diferentes temperaturas de operación (T_{uso}).

Hasta ahora aún no hemos tenido en cuenta que las células solares solo trabajan durante las horas de iluminación. El número de horas de iluminación depende de la localización pero en una primera aproximación se puede considerar que en un SFC con seguimiento solar el número de horas de iluminación es aproximadamente de 8 horas al día. Para ello se supondrá que durante 8 horas al día la degradación sufrida por la célula es la del ensayo con inyección de corriente, 700X o 1050X, mientras que las 16 horas restantes la degradación de la célula corresponde a la de las células sin inyección de corriente, 0X (Figura 6.5). El cálculo combinando sucesivamente 8 horas en condiciones de concentración a temperatura de uso (típicamente 65 °C, aunque reflejamos información con otras temperaturas) y 16 horas en oscuridad a temperatura ambiente 25°C permite extrapolar al tiempo combinado de funcionamiento normal, t_{work} .

A partir de ahora, hablaremos de **tiempo de funcionamiento normal (t_{work})** que se corresponde con el tiempo en que la célula se encuentra en el SFC en condiciones nominales de trabajo, 8 horas de iluminación al día a 65 °C o a las otras temperaturas analizadas, más las 16 horas restantes sin iluminación a 25 °C.

En la Figura 6.10 y Figura 6.11 se han incluido dos gráficas que representan la evolución de la potencia relativa media a diferentes temperaturas nominales de trabajo en concentración, para cada uno de los dos niveles de concentración; 700X y 1050X. En cada una de ambas figuras la grafica de la izquierda tiene una escala de tiempo de funcionamiento normal (t_{work}) de 10^7 horas que cubre todo el tiempo de ensayo extrapolado a temperaturas nominales de trabajo de 95 °C y 80 °C. Dado que este tiempo es muy largo comparado con la vida de un SFC en la gráfica de la derecha se han representado únicamente las primera 500.000 horas (aproximadamente 57 años) de la evolución de la potencia relativa media.

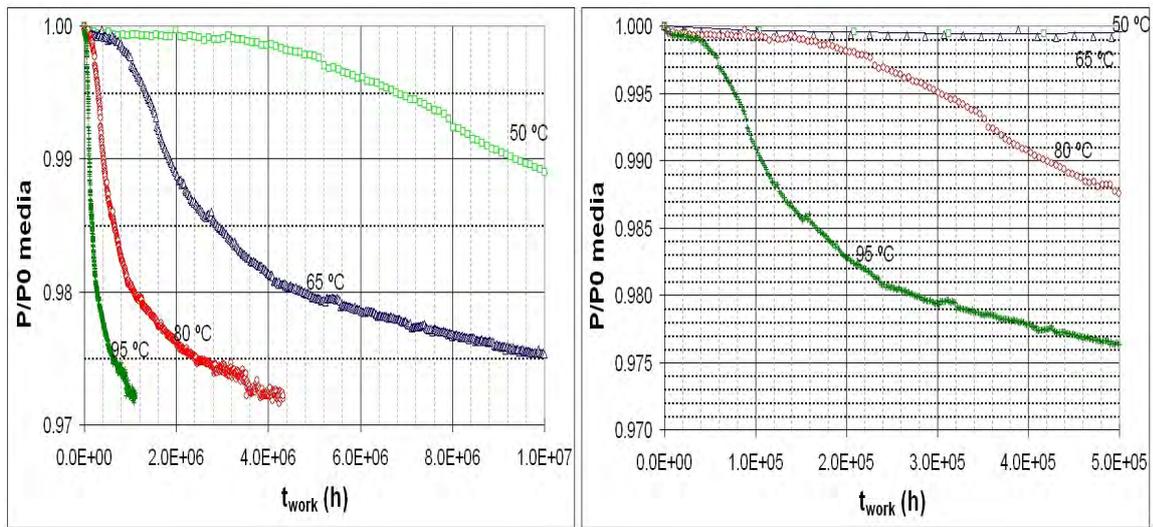


Figura 6.10: Evolución de la potencia relativa media de las células a 700X, en función de temperaturas de operación (T_{uso}), y considerando el ciclo real de trabajo (t_{work}), 8 horas concentración y 16 horas reposo-noche. Escala del eje de abscisas: a la izquierda tiempo de operación de todo el ensayo y a la derecha tiempo de operación de las primeras 500.000 horas (aproximadamente 57 años).

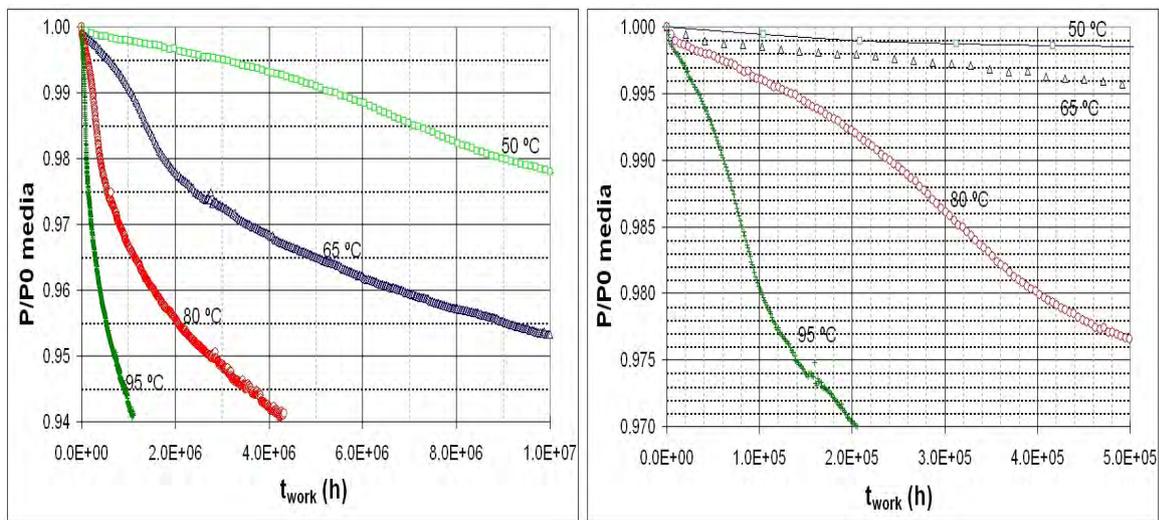


Figura 6.11: Evolución de la potencia relativa media de las células a 1050X, en función de temperaturas de operación (T_{uso}), y considerando el ciclo real de trabajo (t_{work}), 8 horas concentración y 16 horas reposo-noche. Escala del eje de abscisas: a la izquierda tiempo de operación de todo el ensayo y a la derecha tiempo de operación de las primeras 500.000 horas (aproximadamente 57 años).

En ambas graficas podemos identificar los tres periodos:

- El *primer periodo* a concentración 700X y 65°C dura hasta las $6 \cdot 10^5$ horas, aproximadamente 68 años. En el caso de concentración 1050X la duración del *primer periodo* es casi despreciable y la degradación directamente empieza en el *segundo periodo*.
- El *segundo periodo* a 700X y 65°C va desde las $6 \cdot 10^5$ horas hasta las $2,4 \cdot 10^6$ horas (272 años) y a partir de entonces empieza una prolongada transición hasta un *tercer periodo* con una pendiente de degradación mucho menor. El *segundo periodo* a concentración 1050X y 65 °C, va desde prácticamente el inicio de la vida hasta también aproximadamente $2,4 \cdot 10^6$ horas, donde comienza la transición al *tercer periodo*.
- A partir de $2,4 \cdot 10^6$ horas comienza el *tercer periodo* de tiempo con una velocidad de degradación menor.

Una primera conclusión es que considerando un periodo de vida de 30 años, las células a 700X y 65°C de temperatura nominal de trabajo pasarían toda la vida en el *primer periodo* de la curva de degradación de los ensayos, es decir sin apenas degradación. Las células a 1050X y 65°C después de 30 años de vida estarían en el *segundo periodo* de degradación del ensayo. Otra conclusión inmediata de la Figuras 6.10 y 6.11 es la importante influencia de la temperatura de operación en la evolución de la potencia relativa. Esta influencia lleva a la necesidad de tener un cuidado especial en el análisis térmico de la célula en condiciones reales de trabajo.

6.3.3. Influencia de la concentración en la evolución de la potencia relativa media

En esta sección vamos a analizar la influencia de la concentración en la degradación de la potencia. Para ello las células se han ensayado en tres condiciones diferentes, 0X, 700X y 1050X.

En este análisis se ha considerado, como indican las medidas térmicas del circuito que se mostraron en el capítulo anterior, que los dos grupos de células a diferente concentración (700X y 1050X) tienen una temperatura similar cuya diferencia

no influye en los resultados. Por tanto, la diferencia de la degradación a ambas concentraciones observada en el ensayo es debida exclusivamente a la densidad de corriente y no a la temperatura.

La relación entre las dos concentraciones empleadas en los ensayos (700X y 1050X) es 1,5, y por lo tanto la relación de corrientes inyectadas para emular los niveles de concentración es la misma. La experiencia en ensayos sobre dispositivos optoelectrónicos HB-LEDs a diferentes niveles de corriente nos muestran que la degradación del dispositivo se acelera en tiempo con la corriente en una relación mayor que lineal y en algunos casos la aceleración en tiempo aumenta con el cuadrado de la relación entre las dos corrientes de ensayo [VNNB10].

En la Figura 6.12 se representan las evoluciones de potencias de los ensayos a 150 °C a las dos concentraciones probadas. Se han superpuesto líneas de tendencia en los *periodos segundo* y *tercero* indicando la ecuación de estas pendientes, con texto en **negrita** en el *segundo periodo*, y sin **negrita** en el *tercer periodo*.

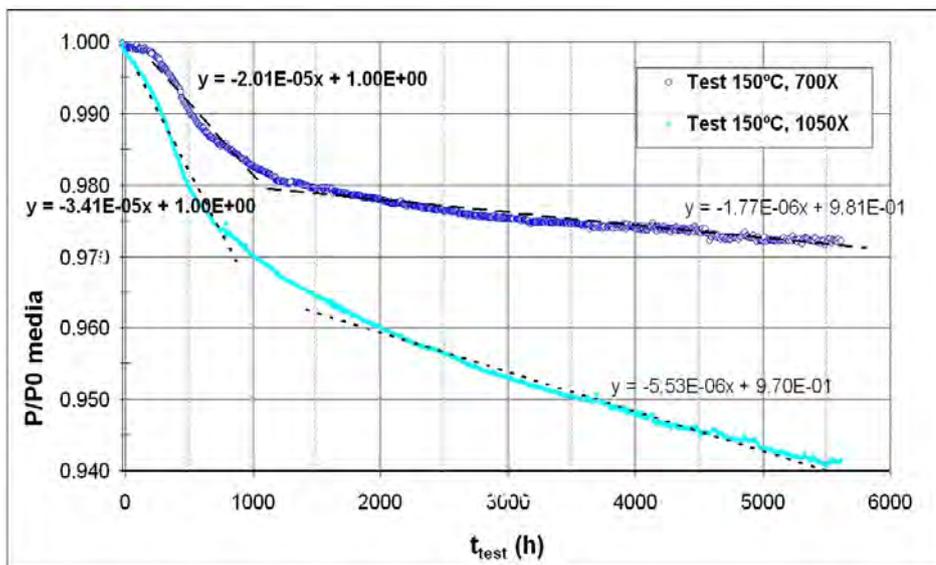


Figura 6.12: Evolución de las potencias relativas medias de las células a 150°C y concentraciones 700X y 1050X, respecto al tiempo de ensayo (t_{test}).

De la información que ofrece la Figura 6.12, que refleja la degradación de potencia respecto al tiempo de ensayo a 150°C y de los cálculos que hemos realizada con dicha información durante los tres *periodos* que establecimos en las gráficas se pueden derivar las siguientes conclusiones:

- En el *primer periodo* de la curva, de degradación irrelevante, a concentración 700X tiene una duración de aproximadamente 200 horas mientras que a 1050X la duración es mucho menor, de tan sólo unas horas, y no se observa visualmente en la gráfica. Esta diferencia así como la mayor pendiente de degradación a 1050X puede ser debido a que el aumento de la densidad de corriente inyectada a 1050X acelera en el tiempo los fenómenos físico-químicos que generan la pérdida de potencia del dispositivo.
- Durante el *segundo periodo* la relación entre las velocidades de degradación en las dos concentraciones es de aproximadamente 1,7, ligeramente superior a la relación entre las concentraciones que es de 1,5.
- Durante el *tercer periodo* la velocidad de degradación en ambos casos tiende a disminuir pero en el caso de 700X en mayor medida. La relación entre las velocidades de degradación aumenta en este periodo a 3,12 que es ligeramente superior al doble de la relación entre las concentraciones y también superior al cuadrado de la relación de corrientes 2,25.
- Relacionado con el *tercer periodo* el ensayo a 700X tiende a estabilizarse mientras que en el ensayo a 1050X no se observa tendencia a la estabilización al menos durante la duración de los ensayos a 150°C. Si asociamos con un mecanismo físico-químico la evolución de la degradación, a 700X este proceso físico-químico tiende a saturarse y no introduce más defectos en el dispositivo semiconductor, mientras que esto no ocurre a mayor densidad de corriente (1050X) ya que la degradación no se estabiliza.
- Otro efecto que se observa tiene que ver con el tiempo necesario para alcanzar en ambas concentraciones el mismo valor de degradación. La relación entre estos tiempos depende de en que periodo de la curva se encuentre el valor de degradación que analicemos.
 - Si elegimos un valor de pérdida de potencia relativa del *segundo periodo*, por ejemplo 1 %, el factor de aceleración entre ambas

concentraciones o la relación entre el tiempo que tarda en degradarse un 1% a 700X y a 1050X está por debajo de 2.

- Si elegimos un valor de pérdida de potencia relativa media que se encuentre en la *tercer periodo* de 700X, por ejemplo el 2,5 %, y evaluamos el factor de aceleración entre ambas concentraciones obtenemos un valor de 4,5, mucho mayor que en el anterior periodo. Esto es debido a que a 700X la degradación tiende a saturarse claramente en el *tercer periodo*, mientras que a 1050X lo que se produce es una reducción de la velocidad de degradación, pero no una tendencia a la saturación.

Por lo tanto, el factor de aceleración en tiempo entre las dos concentraciones analizadas durante el periodo de ensayo, no es constante durante todo el ensayo sino que es mayor cuanto mayor es la pérdida de potencia relativa media.

Una de las relaciones que aparecen más comúnmente entre las velocidades de degradación cuando se ensayan dispositivos optoelectrónicos en varias condiciones de inyección de corriente, es la Ley Inversa de la Potencia (para corrientes) [Nel90] [Yan07], que implicaría que para una relación de corrientes de 1,5 la relación entre las velocidades de degradación en ambas condiciones es de $1,5^n$, es decir para el caso muy típico de $n=2$ sería de 2,25.

En nuestro caso la relación entre las velocidades de degradación a ambas concentraciones es más compleja ya que no es constante a lo largo del tiempo, y por tanto cuando analicemos la fiabilidad y garantía a ambos niveles de concentración, aunque aplicaremos la misma metodología en ambos casos, el análisis lo haremos de forma independiente en cada una de las concentraciones, con la curva de potencia relativa media obtenida a concentración 700X y la obtenida a 1050X, ambas a 150 °C.

6.3.4. Análisis del mecanismo de degradación

En todas las células ensayadas sólo se observó una disminución progresiva de la potencia generada, no se produjeron fallos catastróficos. Para analizar el mecanismo físico de degradación de las células vamos a analizar la evolución de las curvas I-V medidas en oscuridad, que son la principal fuente de información sobre el

comportamiento de la célula a lo largo del ensayo. Primero cualitativamente comparando la evolución de las curvas a diferente nivel de concentración y luego mediante una herramienta de análisis 3D para estas células.

La Figura 6.13 representa en la parte superior y central respectivamente la evolución de la curva I-V de dos células a 700X y 1050X ensayadas a 150 °C y en la parte inferior la evolución de la potencia relativa de estas células. Se han elegido dos células representativas de las que han ofrecido mayor degradación (la célula 11 a concentración 700X y la célula 4 del ensayo a 1050X) en sus respectivos ensayos, en las dos gráficas superiores se ha marcado con una flecha el punto donde tras extrapolar la curva I-V en iluminación se obtiene el valor de P_{max} . En la evolución de las curvas I-V se han elegido intervalos de tiempo diferentes según avanza el ensayo; primero cada 200 h, luego cada 400 h y finalmente cada 1000 horas, los instantes de medida se han marcado con flechas en la gráfica de evolución de potencia relativa.

Del análisis concreto de las curvas de la Figura 6.13, y del resto de gráficas equiparables en otras células, se obtienen las siguientes conclusiones:

- La evolución de las curvas I-V en oscuridad de todas las células siguen un mismo comportamiento, independientemente de la temperatura y la concentración.
- La evolución de las curvas I-V en oscuridad durante el *primer periodo* (con nula degradación) es insignificante.
- La evolución de las curvas I-V en oscuridad durante el *segundo periodo* es importante y de similar comportamiento en ambas concentraciones ensayadas (700X y 1050X). El tiempo acumulado entre el *primer* y el segundo periodo es de gran importancia ya que supera de forma importante el tiempo de vida del SFC. Por lo tanto, el análisis del mecanismo de degradación en el segundo periodo a partir de las curvas I-V en oscuridad es de gran importancia.
- En el *tercer periodo* las evoluciones de las curvas I-V a 700X y 1050X son ligeramente diferentes, porque en el primer caso se estabiliza la potencia y las curvas I-V en oscuridad también se estabilizan, Figura 6.13. El comportamiento a 1050X es diferente porque se sigue produciendo una pérdida de potencia, pero con menor pendiente que en el segundo periodo

de esta concentración y también se siguen produciendo variaciones en la curva I-V aunque menores que en el *segundo periodo*.

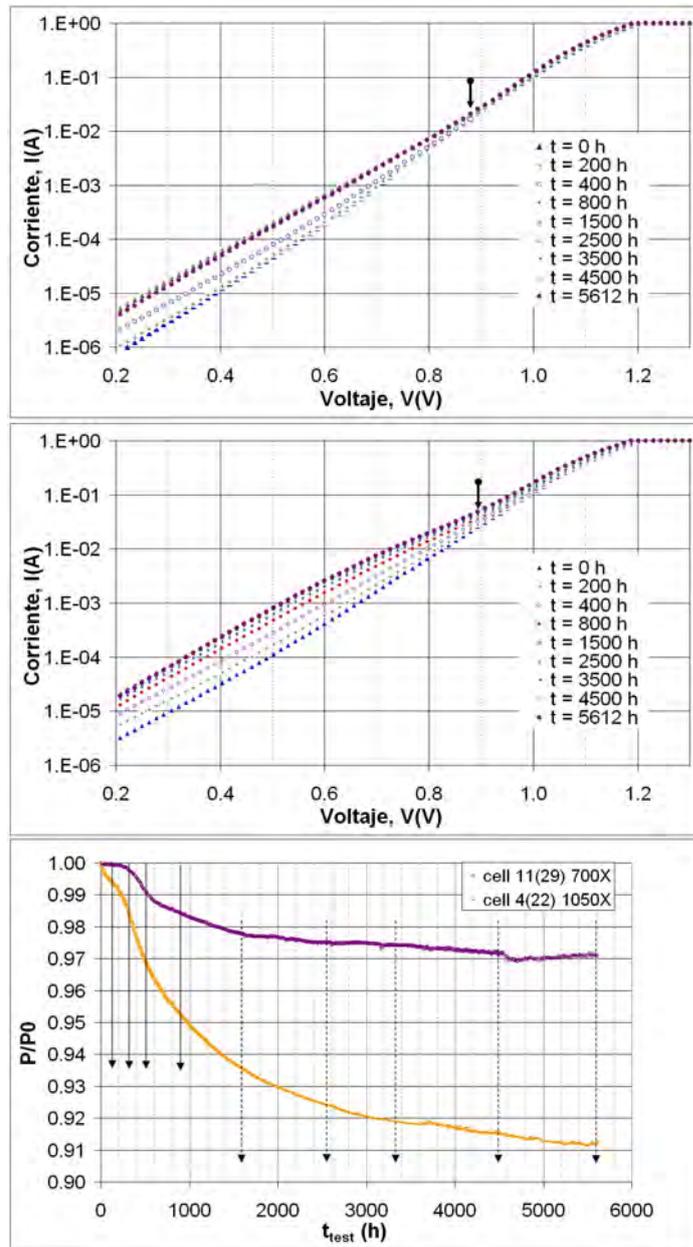


Figura 6.13: Curvas I-V en oscuridad de 2 células durante ensayo a 150 °C y 700X (gráfica superior) y 1050X (intermedia) y evolución de potencia de ambas células (inferior). Las flechas con bola de las dos gráficas superiores indican la tensión a la que se mide la máxima potencia, y las de la gráfica inferior los instantes de tiempo donde se han representado las curvas I-V.

Adicionalmente a este análisis comparativo se ha realizado un análisis preliminar del mecanismo de degradación mediante una herramienta de modelado 3D de las células que analiza las diferencias entre la curva I-V en oscuridad inicial y final medidas a 25 °C en el ensayo a 700X y 130 °C [EAGN+10]. Este periodo de ensayo cubre el *primer* y *segundo periodo* de la curva de degradación de potencia relativa, y pasándola a tiempo en campo supone un periodo de tiempo muy superior a su vida esperada en campo. Estas curvas, Figura 6.14, son representativas de lo ocurrido en todas las células.

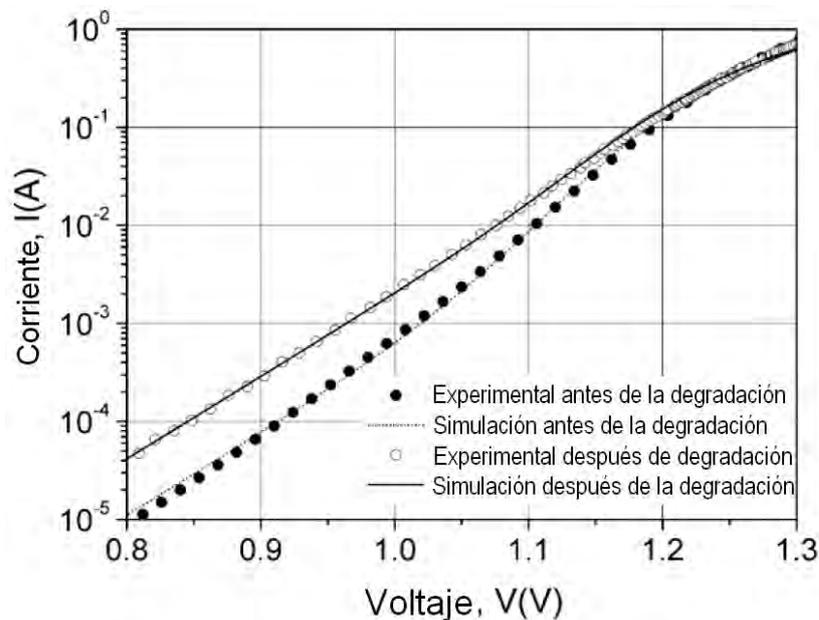


Figura 6.14: Medida de la curva I-V en oscuridad antes (círculos rellenos) y después (círculos vacíos) de la degradación durante el ensayo. El ajuste con el modelo distribuido 3D antes (línea discontinua) y después (línea continua), adaptado de [EAGN+10].

En el modelo 3D de las células empleado para ajustar las curvas I-V inicial y final, la célula solar se divide en unidades elementales y se asigna a cada unidad un modelo de circuito equivalente, dependiendo de la geometría y posición en la célula solar: perímetro, oscuridad e iluminación (Figura 6.15). La célula solar se modela con un circuito eléctrico obtenido conectando cada unidad elemental con su adyacente. El resultado está formado por miles de circuitos equivalentes interconectados, y se resuelve con el simulador de circuitos SPICE[®]. La exactitud y utilidad de este modelo

para el análisis de los mecanismos de degradación se deriva del tratamiento de una manera distribuida de la variación de la curva I-V ocasionada por la degradación de la célula. Un detalle mayor del funcionamiento de este modelo está descrito en [EAGN+10] [GARS08].

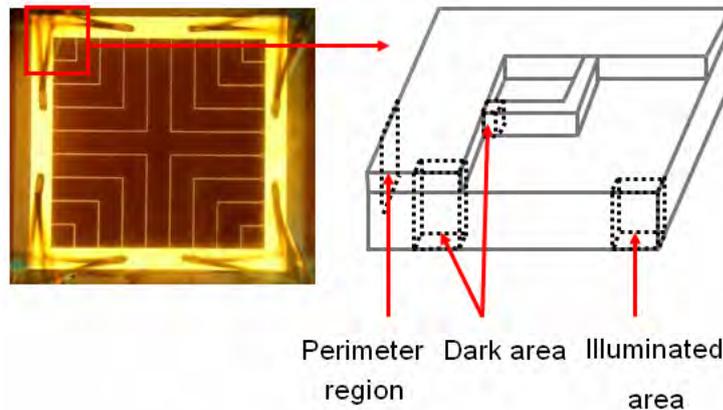


Figura 6.15: A la izquierda fotografía de una célula monounión GaAs, y a la derecha se indican las diferentes zonas en que se ha dividido la célula en la aplicación del modelo de red 3D, tomado de [EAGN+10].

Para analizar el mecanismo de degradación se han realizado diferentes ajustes de las curvas I-V en oscuridad con el modelo 3D. Del análisis de la evolución de las curvas I-V se ha evidenciado que el único parámetro que ha cambiado es la densidad de corriente de recombinación en la región de depleción del perímetro [EAGN+10]. Después del ensayo acelerado que ha degradado la célula, el valor de la corriente de recombinación se ha multiplicado por 4. En estos ensayos el perímetro ha sido pasivado con silicón, pero aún así el perímetro es la zona más frágil de la célula solar: la corriente que fluye bajo el bus conductor externo favorece la progresión de defectos en el perímetro del dispositivo.

Por lo tanto, las conclusiones fundamentales del análisis son que los ensayos no causan cambios morfológicos significativos en las células, y que la degradación se produce en la región del perímetro debido a que la densidad de corriente de recombinación en el perímetro se incrementa en un factor de 4 [EAGN+10].

6.4. Evaluación de la fiabilidad y la garantía

La función fiabilidad, $R(t)$, es la probabilidad de que la célula funcione transcurrido un determinado tiempo de operación en campo, en sus condiciones nominales de funcionamiento. En los ensayos acelerados de las células no se han producido fallos abruptos, pero se ha detectado una degradación progresiva de la potencia generada por la célula. Esta degradación puede llegar a considerarse fallo, si supera un determinado nivel que debe ser definido.

En los módulos fotovoltaicos convencionales de silicio, la definición de fallo por degradación de potencia generada es una pérdida de potencia con respecto a la nominal del 20% [VRS08]. Suponiendo la misma definición aplicable para el módulo o ensamblaje del SFC, en dicho 20% hay que considerar un reparto del objetivo de degradación límite entre todos los elementos que componen el SFC. Los elementos (Figura 1.3) que contribuyen a la degradación son más que en un módulo convencional: el seguidor, óptica primaria, y los elementos del receptor; ensamblado y protección de la célula, la óptica secundaria, la pérdida de unión térmica entre la célula y el disipador, y la célula. Por este reparto de elementos que aportan degradación de potencia en el módulo decidimos situar el **límite de degradación en la célula que se considera fallo de la célula en un 2,5% de pérdida de potencia relativa [NVGA+10]**.

Una vez definido el Límite de Fallo, $LF = 2,5\%$ de pérdida de potencia en esta sección vamos a calcular la fiabilidad, $R(t)$ y otras funciones y parámetros relacionados. Estas funciones y parámetros dependen del nivel definido como fallo, por esta razón se ofrecerán resultados con varios posibles niveles de fallo, y además como las curvas de degradación dependen de forma importante de la temperatura de la célula se analizará también la influencia de la temperatura de la célula.

6.4.1. Evaluación de la fiabilidad

Al haberse producido exclusivamente fallos por degradación paulatina que llega a superar el 2,5 % de pérdida de potencia respecto a la potencia inicial generada por la célula es necesario evaluar cual es la probabilidad de que una célula solar sobrepase la degradación límite. Para ello es preciso aplicar un modelo de evaluación de

fiabilidad basado en degradación. Estos modelos son comunes en fiabilidad y se aplican para los elementos que fallan predominantemente por degradación y no de forma catastrófica. En el caso de los dispositivos semiconductores los dispositivos que fallan por degradación suelen ser dispositivos con un considerable estrés eléctrico.

El análisis que se describe para la evaluación de la fiabilidad de estas células solares ha sido aplicado de modo similar en trabajos anteriores sobre módulos fotovoltaicos convencionales de silicio [VRS08]. El modelo consiste en calcular la fracción de células solares que se degradan por debajo del límite de degradación que se considere fallo (Figura 6.16). Para ello, es necesario tener datos del promedio de pérdida de potencia relativa, y de la dispersión de los valores que han generado dicho promedio. Ambas informaciones han sido medidas en los ensayos y están reflejadas en las gráficas de la columna derecha de la Figura 6.4, en función del tiempo de ensayo acelerado. El valor promedio de potencia relativa en condiciones de trabajo nominales (t_{work}) está reflejado en la Figura 6.10 para 700X y la Figura 6.11 para 1050X. La dispersión de las medidas de potencia relativa se obtienen con la aplicación de los factores de aceleración calculados en la ecuación (6.3) para la E_A obtenida.

En la Figura 6.16 se muestra el procedimiento de obtención de la función fiabilidad $R(t)$ para concentración 700X y temperatura de las células 65 °C. Primero se dibuja en línea punteada la potencia media relativa de las células en función del tiempo de funcionamiento normal, t_{work} . Con línea discontinua gruesa se ha indicado el límite de degradación que supone fallo (Límite de Fallo), $LF = 2,5\%$. Se ha dibujado alrededor de la línea de potencia media relativa, la distribución de la potencia relativa de la población de células en dicho instante. Debido a la asimetría de la densidad de potencia relativa de la población (Figura 6.4 lado izquierdo) se ha empleado una función log-normal para ajustar la densidad de probabilidad, la cola de esta función se corresponde con las células con mayor dispersión en la degradación. Con el valor medio de la potencia relativa y su distribución de la potencia relativa (densidad de probabilidad) es posible evaluar la fracción de células que están por debajo del límite de fallo (LF) y por lo tanto han fallado. Este procedimiento ha sido realizado para todos los instantes de tiempo del ensayo, obteniendo la función probabilidad de células con fallo en cada instante (defiabilidad $Q(t)$ o $F(t)$), y la función complementaria, $R(t) = 1 - Q(t)$, que es la función fiabilidad buscada.

Como ejemplo del cálculo del porcentaje de población con fallo en la Figura 6.16, se han elegido cuatro instantes de la curva (siendo $1 \cdot 10^6$ h = 114,155 años). Este mismo procedimiento se ha realizado con las células ensayadas a concentración 1050X.

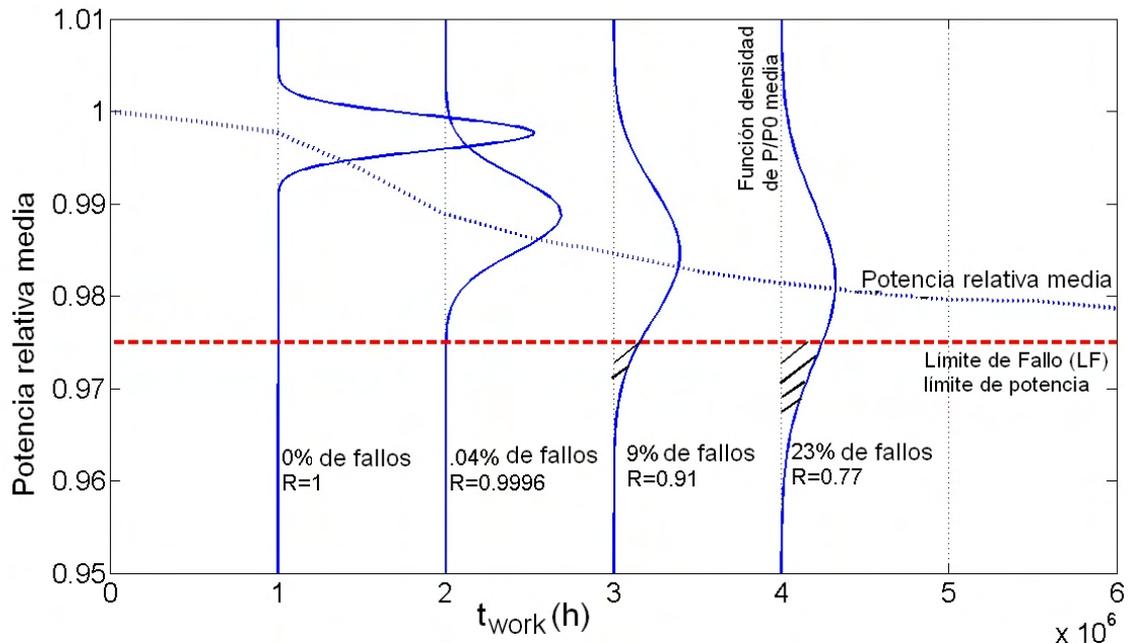


Figura 6.16: Evolución en tiempo de trabajo (t_{work}) de la potencia media relativa, y de la función densidad de la potencia relativa a 700X y a 65°C de temperatura de la célula. También se muestra el valor de la fiabilidad para cuatro instantes de t_{work} . Límite del Fallo (LF) del 2,5%.

Este modelo aplicado a distintos Límites de Fallo, permite evaluar la función fiabilidad para cualquier Límite de Fallo (LF). En la Figura 6.17 a 700X, y en la Figura 6.18 a 1050X se ha representado la función fiabilidad, $R(t)$, a 65°C para varios niveles de LF, valores entre el 1% y el 10%. De la gráfica se puede observar la gran influencia de la selección del Límite de Fallo en la fiabilidad de la célula.

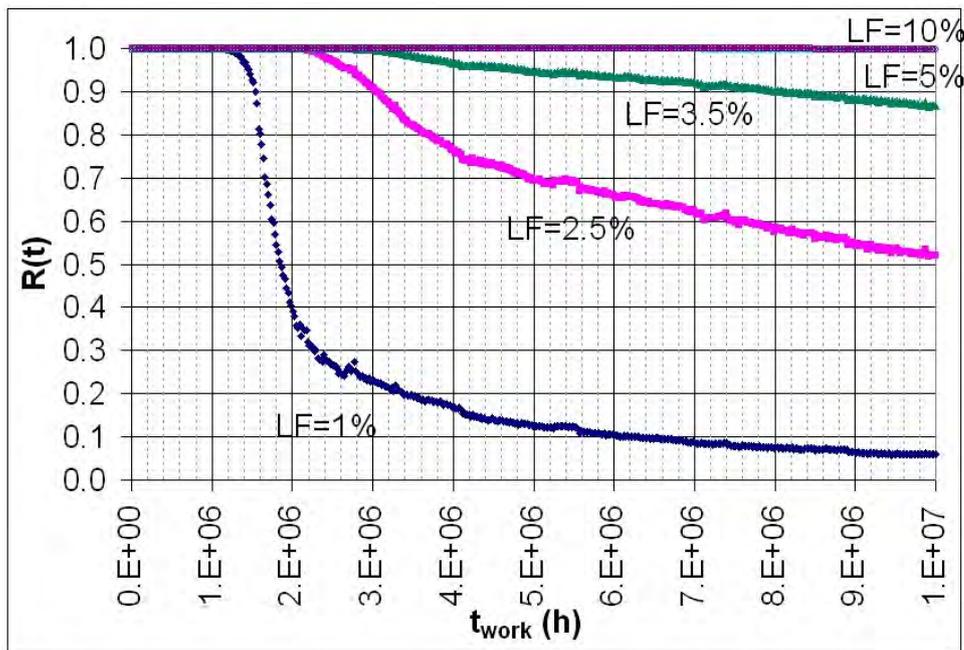


Figura 6.17: Fiabilidad de las células a concentración 700X, a una temperatura de operación en concentración de 65 °C, y para varios valores de Límite de Fallo (LF).

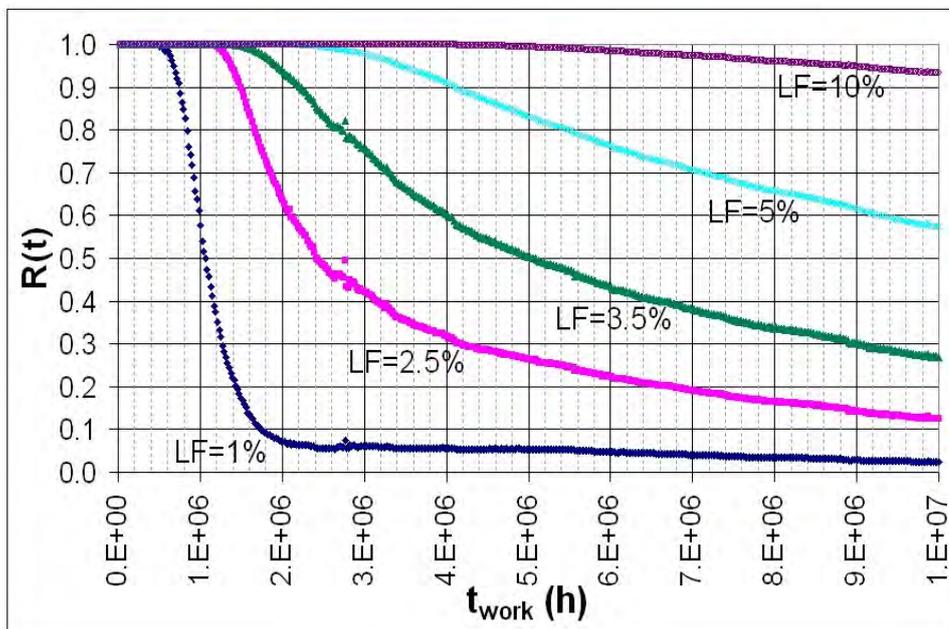


Figura 6.18: Fiabilidad de las células a concentración 1050X, a una temperatura de operación en concentración de 65 °C, y para varios valores de Límite de Fallo (LF).

Las Figura 6.17 y Figura 6.18 reflejan que el LF influye de forma muy importante en la fiabilidad de la célula solar. Sin embargo, si tenemos en cuenta que la vida del SFC es de varias decenas de años solo tienen interés desde un punto de vista industrial las primeras 300.000 horas (aproximadamente 34 años). De las Figura 6.17 y Figura 6.18 se puede deducir que si el FL es mayor que 2,5% la fiabilidad de las células solares a alta concentración (700X o 1050X) es muy alta en el periodo de vida del SFC.

Una vez evaluada $R(t)$ a temperatura de célula 65 °C, con niveles de fallo distintos (LF), puede extrapolarse a otras temperaturas de funcionamiento de la célula bajo concentración. Para ello hay que calcular el Factor de Aceleración (FA) entre 65 °C y la nueva temperatura y aplicarlo al eje de tiempo de trabajo.

6.4.2. Evaluación del $MTTF$

El $MTTF$ (Tiempo Medio Hasta el Fallo – Mean Time to Failure) es la esperanza matemática de la función distribución de fallos. En el capítulo 3 se explicó que el $MTTF$ se puede calcular por dos procedimientos: a partir de la función fiabilidad $R(t)$ (ecuación 3.7), o a partir de la representación de la función deficiencia (complementaria a la fiabilidad) en papel probabilístico de Weibull, la obtención de sus parámetros, y la aplicación de la ecuación 3.16.

Vamos a evaluar el valor de $MTTF$ mediante la ecuación 3.7, que supone integrar la función fiabilidad $R(t)$ entre sus valores extremos 1 y 0. La función fiabilidad ya sido evaluada previamente entre el valor inicial 1, y el valor final que se produce al parar en este caso el ensayo acelerado a 150 °C que es el más extenso. En la Figura 6.17 y Figura 6.18 no se ha representado todo el tiempo equivalente de ensayo realizado, que para el Límite de Fallo del 2,5% en el ensayo a 700X se prolonga hasta que $R(t)=0,38$, y en el ensayo a 1050X hasta $R(t)=0,03\%$, un valor muy cerca del límite inferior de integración. Por tanto, para el último caso con concentración 1050X el cálculo del $MTTF$ es directo aplicando la ecuación 3.7, mientras que en el ensayo a 700X hay que extrapolar la evolución de la fiabilidad desde $R(t)=0,38$ hasta $R(t)=0$.

En la Tabla 6.5 mostramos los valores de $MTTF$ calculados con la ecuación 3.7, correspondientes a las dos condiciones de concentración y a varios límites de fallo. Los

valores de *MTTF* obtenidos son muy elevados si se comparan con las 219.000 y 262.800 horas que suponen 25 y 30 años de trabajo respectivamente.

Tabla 6.5: *MTTF* para células con temperatura de trabajo en concentración 65 °C, y operación en campo para varios Límite de Fallo (*LF*).

	<i>LF</i> = 1.0%	<i>LF</i> = 2.5%	<i>LF</i> = 3.5%
<i>MTTF</i> a 65°C&700X (horas)	3,8x10 ⁶	2,6x10 ⁷	8,2x10 ⁷
<i>MTTF</i> a 65°C&1050X (horas)	1,6x10 ⁶	4,6 x10 ⁶	7,9x10 ⁶

6.4.3. Análisis de la función fiabilidad a partir de la representación de Weibull

Vamos a representar las funciones fiabilidad (*R(t)*) obtenidas en los ensayos mediante papel probabilístico de Weibull (descrito en el capítulo 2, y que en lugar de emplear la *R(t)*, emplean la función deficiencia *Q(t)*) lo que nos permitirá observar nuevas características de las funciones fiabilidad evaluadas, a partir de los parámetros de la función de Weibull.

En la Figura 6.19 se muestra la representación en papel probabilístico de Weibull de los valores de la deficiencia ($Q(t) = 1 - R(t)$) correspondientes a las células del ensayo de 700X y 65 °C (Figura 6.17) y en la Figura 6.20 los correspondientes a las células del ensayo de 1050X y 65°C Figura 6.18.

Si nos concentramos en el análisis para *LF* =2,5% de las representaciones de Weibull (a 700X (**Figura 6.19**) y a 1050X (**Figura 6.20**)) se puede observar que aparecen dos líneas rectas, y por tanto dos valores de β , la primera con una fuerte pendiente, casi vertical, y otra con menor pendiente. Estas líneas definen tres zonas, la primera hasta el comienzo de la primera línea y las otras dos zonas se corresponden con ambas líneas. Las gráficas de Weibull donde aparecen funciones con varias pendientes, como es el caso, se denominan funciones de Weibull mixtas, las razones para que se produzcan funciones mixtas pueden ser varias. En nuestro caso la razón es que el mismo mecanismo de fallo a lo largo del proceso de envejecimiento tiene dos pendientes de degradación distintas debido a la evolución de la *degradación de*

potencia con el tiempo y esto se refleja de esta forma en la $R(t)$ y $Q(t)$. Un análisis de gráficas mixtas puede ser encontrado en [JM95]. Las zonas diferenciadas son:

- **La primera zona** es un periodo de tiempo importante donde la probabilidad de fallo es muy baja, no aparece en la gráfica de Weibull al ser inferior al 0,01%. Este periodo es aproximadamente de $2 \cdot 10^6$ horas a 700X (**Figura 6.19**) y $1 \cdot 10^6$ a 1050X (**Figura 6.20**), ambos periodos muy superiores a los 30 años de vida. Si se observa la Figura 6.16 para 700X, es la zona donde toda la función densidad de potencia relativa (función log-normal dibujada en sentido vertical) está por encima del límite de fallo. En este periodo de tiempo transcurre todo el periodo de garantía de la célula en campo.
- **La segunda zona** ya alejada del periodo de garantía en campo de las células, tiene una pendiente muy pronunciada lo que implica un parámetro de Weibull β mucho mayor que uno, y por tanto una tasa de fallos creciente. Cuando finaliza este periodo la probabilidad de fallo de las células es aproximadamente el 25% a 700X y el 70% a 1050X. Los fallos se producen de forma concentrada en este periodo porque la potencia relativa media se aproxima al Límite de Fallo 2,5% con un descenso de la degradación rápido y una dispersión de potencia relativa de las células es pequeña, ver Figura 6.16.
- **La tercera zona** con una pendiente mucho menor corresponde con la estabilización tanto de la potencia media relativa como de la dispersión que es el *tercer periodo* de la degradación. El límite de esta zona es el fin del ensayo acelerado, aproximadamente $2 \cdot 10^7$ horas, llega hasta el 63% de probabilidad de fallo a 700X y supera el 95% de probabilidad de fallo a 1050X. Si suponemos que a partir de este instante el comportamiento del ensayo sigue siendo igual a la zona precedente, para llegar al final de la vida de las células (por ejemplo las de concentración 700X), bastaría con prolongar la pendiente de esta zona hasta llegar a aproximadamente el 100% de fallos en el papel probabilístico de Weibull.

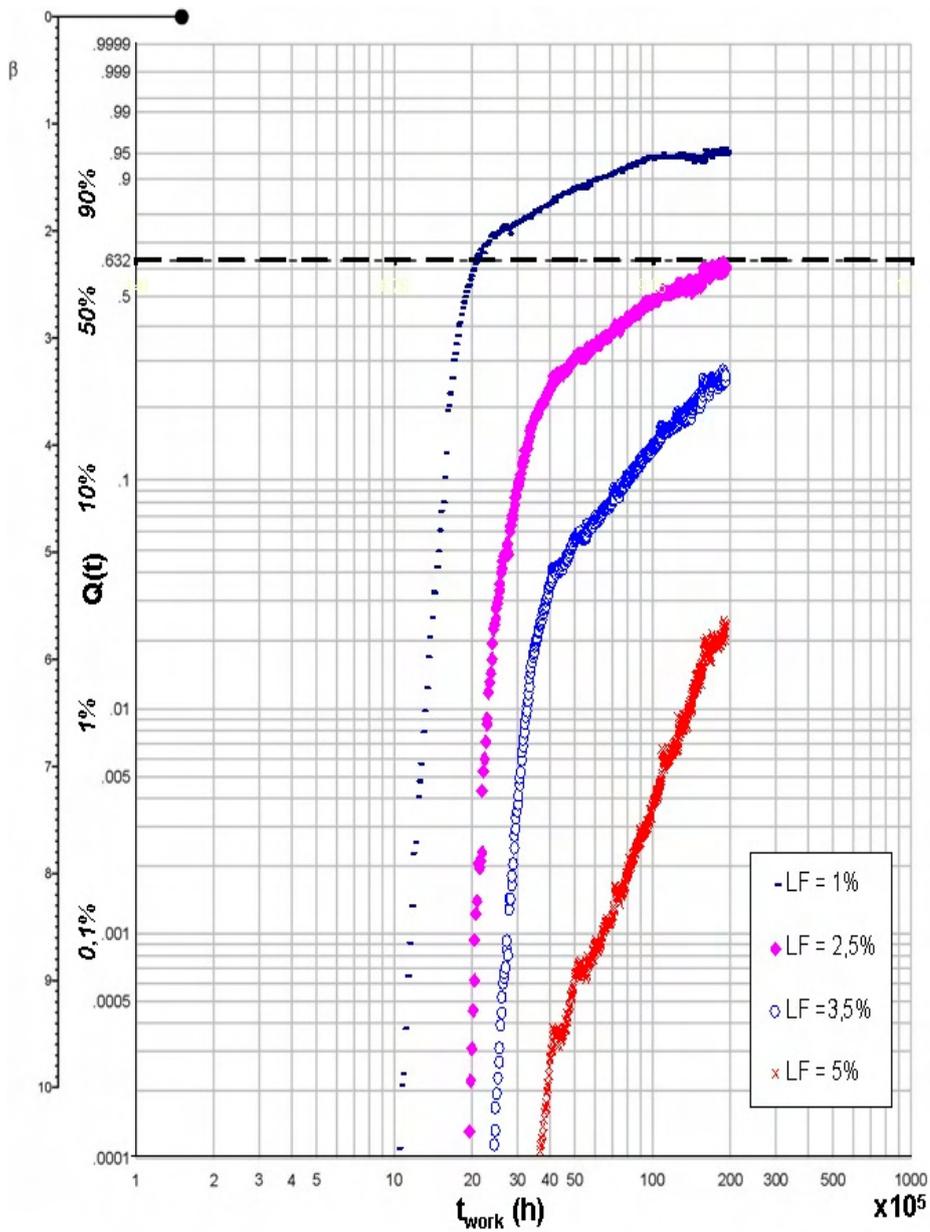


Figura 6.19: Representación de Weibull con las funciones $Q(t) = 1 - R(t)$ (Defiabilidad, probabilidad de fallo) obtenidas en el ensayo a 700X y temperatura 65°C, para las diferentes condiciones de Límite de Fallo indicadas en la gráfica.

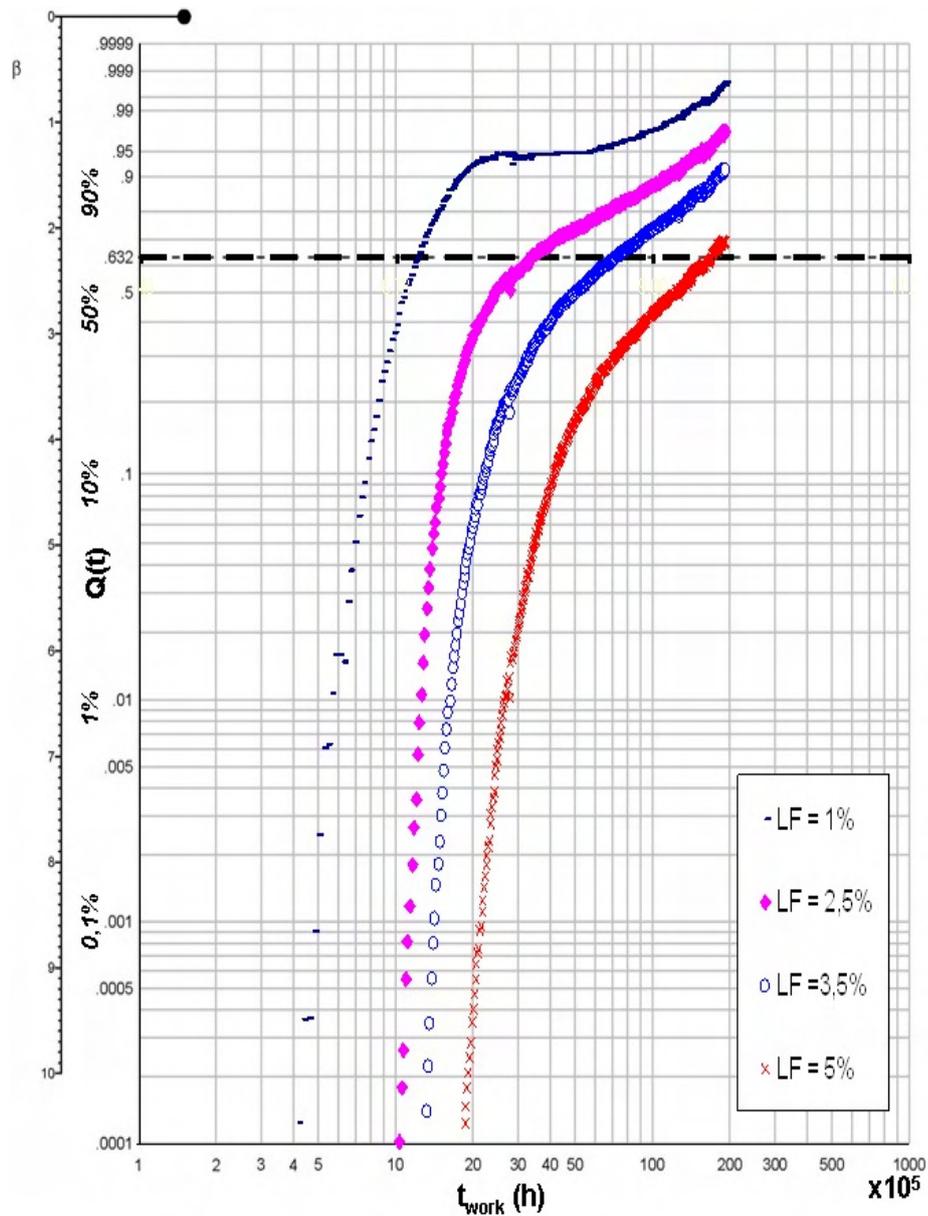


Figura 6.20: Representación de Weibull con las funciones $Q(t) = 1 - R(t)$ (Deficiencia, probabilidad de fallos) obtenidas en el ensayo a 1050X y temperatura 65°C, para las diferentes condiciones de Límite de Fallo indicadas en la gráfica.

A partir de las gráficas de Weibull también es posible evaluar el MTTF, pero debido a que son funciones mixtas no se puede aplicar el procedimiento directo del capítulo 3 (ecuación 3.16). Si se aplica un procedimiento aproximado por tramos, obtenemos resultados similares de MTTF a los obtenidos en la **Tabla 6.5**, pero con mayor incertidumbre debido a la transición entre las dos pendientes β .

6.4.4. Evaluación de la garantía

La garantía se puede enfocar desde el punto de vista del fabricante o del cliente. En esta sección realizaremos un análisis de la garantía desde el punto de vista del fabricante de células. Para ello dado un periodo de garantía seleccionado a priori se calcula el porcentaje de células que fallan durante ese periodo de garantía. A partir del porcentaje de células que fallan en el periodo de garantía se puede evaluar el coste que le supone al fabricante ofertar la garantía.

El coste de la garantía depende de varios factores, siendo los más importantes el periodo de tiempo que cubre la garantía y como consecuencia el número de elementos que fallan durante la garantía y el coste de cada reposición de un elemento fallado. Basado en estos tres factores el fabricante tendrá como objetivo que durante el periodo de garantía el porcentaje de elementos fallados no sobrepase un límite especificado para que los costes que repercute al cliente no sean excesivos. Aparte de los costes de garantía sí el porcentaje de fallos es alto la imagen del producto puede ser afectada de forma negativa. El periodo de garantía y el porcentaje de elementos que fallan durante el periodo de garantía están interrelacionados por la función fiabilidad $R(t)$ obtenida experimentalmente a partir de los ensayos acelerados y mostrados en los apartados anteriores.

Si el fabricante decide ofrecer un periodo de garantía t_1 (en el sector fotovoltaico puede ser de 25 o 30 años), el % de células de una población que fallarán y que, por lo tanto, necesitarán reposición durante el periodo de garantía t_1 está relacionado con la función fiabilidad de la siguiente forma:

$$(1 - R(t_1)) \cdot 100 = \text{porcentaje de células que fallan hasta } t_1 \quad (6.4)$$

Visto desde otro punto de vista, como la función fiabilidad ($R(t)$) de la célula solar ha sido calculada a partir de los ensayos acelerados en un rango de tiempo muy superior a la vida esperada de los SFC instalados en campo, se puede calcular el periodo de garantía que el fabricante puede ofrecer a partir de un porcentaje de fallos especificado para el periodo de garantía. Si se selecciona para el periodo de garantía un porcentaje de fallos del 1%, es decir $R(t) = 0,99$, el tiempo para el que la fiabilidad es

0,99 es el tiempo de garantía. Para el caso $LF=2,5\%$, concentración 700X y temperatura de funcionamiento de 65 °C el tiempo de garantía es de 263 años.

$$R\left(t_{W(1\%)}\right]_{LF=2.5\%,C=700X,T_{work}=65^{\circ}C} = 263 \text{ años} = 0,99 \quad (6.5)$$

En la siguiente tabla, considerando un Límite de Fallo del 2,5% se ha evaluado el *MTTF* y el periodo de garantía en diversas condiciones de concentración y temperatura.

Tabla 6.6: Valores de *MTTF* para distintas temperaturas de célula y las dos condiciones de concentración considerando un Límite de Fallo del 2,5%. En las condiciones indicadas, periodo de garantía, t_w , si asumimos económicamente un porcentaje limitado de fallos de la población, con valores entre 0,1 % y 10%.

	$T = 65^{\circ}C$		$T = 80^{\circ}C$		$T = 95^{\circ}C$	
Concentración	700X	1050X	700X	1050X	700X	1050X
<i>MTTF</i> (10⁶ horas)/(años)	26,0/2968	4,60/525	5,87/670	1,04/119	1,50/171	0,27/30
$t_{W(0,1\%)}(\text{años})$	235	127,5	53,1	28,8	13,5	7,3
$t_{W(1\%)}(\text{años})$	263	142,1	59,4	32,1	15,1	8,2
$t_{W(5\%)}(\text{años})$	310	157,5	70,0	35,6	17,9	9,1
$t_{W(10\%)}(\text{años})$	347	170,7	78,5	38,5	20,0	9,8

En la Tabla 6.6 se observa cómo influye la temperatura y el nivel de concentración al valor del *MTTF* y a la garantía. Si se asumen periodos de garantía de entre 25 y 30 años, las conclusiones que se obtienen son:

- La temperatura y la concentración, en este orden, son los parámetros que más afectan al periodo de garantía de las células.
- Para una temperatura de trabajo de 65 °C, se puede ofrecer en el rango de las concentraciones ensayadas, una garantía de 30 años con un porcentaje de población de células en campo con fallo por debajo del 0,1 %.

- Para 95 °C de temperatura de operación, no es posible ofrecer en el rango de concentraciones ensayadas una garantía de 30 años, ya que implicaría tener un porcentaje de fallos durante la garantía muy superior al 10%.
- Para el rango de temperatura de operación de la célula intermedio, $65\text{ °C} < T < 95\text{ °C}$, la oferta de una garantía de 30 años depende de la temperatura y del nivel de concentración, así como del coste de renovación de células con fallo que el fabricante quiera asumir durante esta garantía.

Por lo tanto, el principal factor que influye en la garantía y la fiabilidad es la temperatura de la célula bajo concentración (Figura 6.17, Figura 6.18, Tabla 6.6), y esto tiene consecuencias económicas entre las que podemos destacar:

- Una vez evaluada la fiabilidad y el porcentaje de fallos durante la garantía se puede evaluar el coste que supone para el fabricante reponer las células que han fallado.
- La temperatura de 65°C es la estimada en células solares de este tipo para concentraciones de 1000X [Algora07]. Si se modifica el diseño del receptor para abaratar costes, y esto implica un incremento en la temperatura de la célula, se puede calcular el impacto de este cambio de diseño en los costes de la garantía, y por tanto decidir si es rentable.
- En células solares de tamaños mucho mayores, otros tipos de células comerciales tienen áreas de 30 mm² a 100 mm², se necesita un cuidadoso análisis térmico para que la temperatura de la célula en funcionamiento sea lo más baja posible.

6.5. Resumen y conclusiones

Como se ha descrito en este capítulo se han realizado tres ensayos de vida acelerados en temperatura (130 °C, 150 °C y 170 °C) con células en condiciones de funcionamiento en concentración solar emulada (0X, 700X, 1050X), cuya duración ha sido superior a 10000 horas y cuya temporización se reflejó en la Figura 6.1. En la Tabla 6.1 se han indicado el número de células de cada una de las condiciones de ensayo. Las principales conclusiones de estos ensayos han sido:

Se realizó una planificación de flujo de medidas en cada célula, de modo que se fuese riguroso con la caracterización de la célula en los cambios de temperatura de medida y de condición de la célula (sin inyección de corriente previa, o con inyección de corriente). Además de modo previo a los ensayos se realizó un cribado de las células de los tres circuitos ensayados para identificar células con defectos infantiles que pudiesen producir fallos prematuros. De los ensayos de cribado no se evidenciaron células con este tipo de defectos.

A lo largo del capítulo se han analizado la degradación de las células, el mecanismo de fallo que produce la degradación y las principales funciones y parámetros de fiabilidad.

Relacionado con la degradación de las células en los ensayos acelerados las principales conclusiones son:

- No se han observado fallos catastróficos, sólo degradaciones graduales que son las responsables de los fallos.
- Se ha dedicado una sección a los resultados de los ensayos acelerados, reflejando la degradación relativa de cada célula, y de la media de cada ensayo acelerado en la Figura 6.4 a diferentes concentraciones, 700X y 1050X y en la Figura 6.5 sin concentración 0X. Los valores finales de degradación se han reflejado en la Tabla 6.3, y en todos los ensayos han sido muy bajos, con un máximo del 2,78% a 700X y del 5,87% a 1050X, durante los ensayos a 150 °C. La duración del ensayo extrapolada a temperatura de trabajo es mucho mayor que el tiempo de vida de los SFC por lo que la degradación en campo será aún menor que las degradaciones medias máximas obtenidas en los ensayos.
- En la curva de degradación de las células a 700X y 1050X se pueden observar tres periodos, el primero sin degradación sólo afecta a las células a 700X, en el *segundo periodo* las células presentan una velocidad de degradación mayor, y en el tercer periodo la velocidad de degradación sufre

una importante disminución, para el caso de 700X hasta una saturación de la degradación y en 1050X con una disminución sustancial.

- A partir de las curvas de degradación de potencia relativa a las tres temperaturas de ensayo acelerado y concentración 700X se ha obtenido (Figura 6.6 y Figura 6.7) mediante la ley de Arrhenius, la Energía de Activación del mecanismo que causa la degradación, $E_A = 1,02$ eV. Con este valor se han obtenido los factores de aceleración en tiempo de la degradación de los ensayos respecto a la temperatura nominal de trabajo de la célula en campo, Tabla 6.4. Por último se ha representado la degradación extrapolada a tiempo real de trabajo en campo a varias temperaturas, Figura 6.10 y Figura 6.11.
- Además de analizar la influencia de la temperatura en la degradación, también se ha analizado la influencia del nivel de concentración, concluyendo que el factor de aceleración entre los ensayos a las concentraciones 700X y 1050X, no es constante a lo largo del ensayo, sino que evoluciona con el tiempo de ensayo desde 1,7 al comienzo hasta a 3,1.
- Se ha realizado un análisis de la evolución de las curvas I-V en oscuridad de las células en concentración y a diferentes temperaturas de ensayo, observando que siguen todas ellas la misma evolución, Figura 6.13. Además se ha realizado un análisis preliminar del mecanismo de fallo [EAGN+10] a través de las curvas I-V en oscuridad inicial y final de las células durante los ensayos. De este análisis se concluye que los ensayos acelerados no causan cambios morfológicos en las células, y que la degradación se produce en la región del perímetro debido a un incremento de densidad de corriente de recombinación en el perímetro.

Respecto a la evaluación de la fiabilidad, *MTTF* y garantía de la célula las principales conclusiones son:

- Se ha definido el fallo como una degradación de la potencia generada superior al 2,5% como parte del nivel de fallo del módulo del 20%. Los dos

ensayos a mayor temperatura han superado en media este nivel de degradación considerado fallo, lo que redundaría en una baja incertidumbre de los cálculos realizados de fiabilidad y garantía, ya que no ha sido necesario para la mayoría de los parámetros obtenidos extrapolar el progreso de la degradación de las células para calcular los parámetros.

- Se ha evaluado la fiabilidad de la célula, el *MTTF* y la garantía en diversas condiciones de temperatura, concentración y definición del nivel de degradación que se considera fallo. Nuestro análisis ha pivotado sobre una definición de Límite de Fallo (*LF*) del 2,5% de pérdida de potencia generada en la célula, aunque se han considerado otros Límites de Fallo.
- Sobre los factores que aumentan el porcentaje de fallos, y por tanto disminuyen la fiabilidad de la célula, podemos considerar dos; el primero es la temperatura, y el segundo con mucha menor influencia el nivel de concentración.
- Se ha evaluado la fiabilidad, $R(t)$, mediante modelos de análisis de fiabilidad basados en la degradación del dispositivo, Figura 6.16, obteniendo las gráficas de la fiabilidad, Figura 6.17 y Figura 6.18, para varios niveles de Límite de Fallo (*LF*).
- Se han evaluado los valores del *MTTF* en diversas condiciones de trabajo, obteniendo como resultado para temperatura nominal de la célula 65 °C y concentración 700X un $MTTF = 2,6 \cdot 10^7$ horas y para 1050X $MTTF = 4,6 \cdot 10^6$ horas.
- Se ha representado la función $Q(t)$ obtenida en papel probabilístico de Weibull obteniendo como ya sabíamos un periodo inicial de fiabilidad muy elevada que no queda directamente reflejada en la gráfica de Weibull, en el que transcurre toda la vida de la célula en campo, y posteriormente una función de Weibull mixta.
- Se ha evaluado la garantía de las células (Tabla 6.6) obteniendo que en las dos concentraciones analizadas la proporción de fallos durante el periodo de garantía, supuesto una temperatura nominal en la célula bajo

concentración de 65°C, es inferior al 0,1%. En otras condiciones de funcionamiento extremas, como una temperatura de la célula de 95°C, durante el periodo de garantía el porcentaje de fallos es superior al 10%.

Como conclusión principal tenemos que las células de GaAs que han sido ensayadas con 1 mm² de área activa, concentración hasta 1050X y con la aproximación “LED-Like approach” pueden ofertar sin ningún problema la garantía de 25 a 30 años, a la temperatura estimada de trabajo en campo, 65 °C y en cualquiera de las dos condiciones de concentración ensayadas asumiendo una definición de límite de fallo por degradación del 2,5%.

Capítulo 7

GENERALIZACIÓN DE LOS ENSAYOS ACELERADOS

7.1. Introducción

En este capítulo se va a analizar la generalización de los ensayos acelerados realizados en células III-V de muy alta concentración y área pequeña, a células III-V de área grande, en el rango de 30 mm² a 100 mm².

En el intervalo de área por debajo de los 30 mm² también se comercializan células III-V de concentración, pero consideramos que desde el punto de vista térmico ofrecen menos complicaciones, y por tanto nos centraremos en estudiar el rango indicado que es habitualmente comercializado por los fabricantes provenientes del área espacial (Azur, Spectrolab, Emcore, y otros), que comercializan actualmente células de tres uniones con un rendimiento que ronda el 40%.

Cada fabricante de células utiliza una única tecnología de semiconductor pero diferentes tecnologías de ensamblado de la célula y de tamaño en función de las necesidades de los fabricantes de módulos de SFC. La flexibilidad de suministro de células desnudas o con ensamblaje sobre un circuito base, tanto en tamaños como en rango de concentraciones es necesaria porque deben poder adaptarse a la gran variedad de módulos de SFC que se comercializan.

Las implicaciones del área de la célula en su temperatura con concentración, son muy importantes, podría pensarse que para la misma potencia por unidad de área de célula, ofrece la misma complejidad disipar el calor de una célula de 1 mm² que de 100 mm², pero no es así, simplificándolo un poco desde el punto de vista térmico en el primer caso tenemos un foco de calor pequeño de potencia x vatios, y en la célula “grande” otro foco de calor pequeño pero de potencia $100 \cdot x$ vatios, esto supone considerando que la convección es natural que para un disipador equivalente la célula grande estará a mayor temperatura que la pequeña, esta es una de las razones prácticas por las que los SFC trabajan a mayor concentración con células pequeñas que con células de área grande.

Como hemos evaluado a lo largo de la tesis, un aumento de temperatura supone por un lado una disminución significativa de fiabilidad y por otro una pérdida de rendimiento. Esta disminución puede observarse en las hojas de datos de los fabricantes de este tipo de células, por ejemplo Spectrolab las caracteriza desde 24 °C

a 90 °C, y en concreto para una de sus células multiunión III-V a 400 soles el rendimiento a 24 °C es superior al 40%, y se reduce al 34% con la célula a 90 °C.

Debido a la relevancia que tiene el estrés térmico de las células de concentración en el rendimiento real de la célula, este tema se ha estudiado en varios trabajos mediante medidas directas y simulaciones térmicas [LEA+05][HCGF+06], [CS06][BSSK10][ASS09][KWM+09][PFS+11]. En estos trabajos no se ha identificado la relación entre la temperatura alcanzada por la célula y la fiabilidad, y por tanto sí a dicha temperatura la célula puede tener una vida de 30 años. En la base de esta falta de datos se encuentran los problemas para realizar ensayos acelerados en células solares III-V a alta concentración que permitan extrapolar el tiempo de ensayo acelerado al periodo de vida real, y por tanto evaluar la fiabilidad.

La temperatura de la célula que recibe alta o muy alta concentración es un dato crítico, pero con pocas referencias publicadas. En [AUEH+05] se recomienda que los materiales en contacto con la célula y ella misma, deber estar preparados para poder soportar incrementos de temperatura respecto al ambiente de 60 °C, lo que implícitamente supone que la temperatura máxima en el receptor se acerca a ese nivel. Se trata de un rango muy amplio debido a que depende de múltiples factores: diseño y materiales del receptor, disipador y valor de la potencia a disipar entre otros. Aunque la temperatura de la célula III-V, según nuestros resultados es un factor crítico en su fiabilidad cuya influencia podemos estimar, sin embargo la temperatura de la célula en campo no es el objeto de nuestra tesis ni de este capítulo.

En este capítulo nos centramos en analizar las condiciones de temperatura de la célula durante la realización de ensayos acelerados a células III-V de concentración, aunque las herramientas de modelado térmico empleadas son útiles para evaluar el incremento de la temperatura de la célula en campo.

Desde el punto de vista del ensayo acelerado, al inyectar corriente en directa sobre los terminales de las células multiunión comerciales de área grande para emular las condiciones de trabajo, tendremos una potencia en las células muy superior a la empleada en las células de área pequeña fabricadas en el IES-UPM, debido a que lo que se pretende conseguir bajo los buses de conexión es la misma densidad de corriente que en el área activa con iluminación. Mientras que para el conexionado con (wire-bonding) de las células con área pequeña se requiere muy poca área de metalización, en las células de área grande se emplean conexiones mediante cinta

(ribbon bond) Figura 1.5-b, que tiene un área mucho mayor, y por tanto para una densidad bajo el bus metálico equivalente requieren mucha mayor inyección de corriente en directa, lo que implica que el incremento de temperatura en las células III-V dentro de la cámara climática puede ser relevante.

La potencia que disipan las células de área grande, de 30 mm² a 100 mm², durante la inyección de corriente en el ensayo acelerado, afectan al ensayo acelerado en dos factores.

- A la hora de evaluar la aceleración del ensayo hay que tener en cuenta las siguientes temperaturas: temperatura de la cámara climática, temperatura de la célula durante el ensayo (que es mayor que la de la cámara climática debida a la inyección de corriente) y temperatura de la célula en campo. El incremento de temperatura de la célula durante el ensayo con respecto a la célula en campo es el causante de la aceleración del ensayo. Este incremento será el posteriormente empleado en los análisis.
- Los ciclos térmicos que se producen en la célula solar debido al cambio del estado de inyección de corriente al estado de medida podrían producir, en caso de un mal diseño térmico, fallos en la célula solar que no se producen en campo. Para evitar este problema es necesario realizar el ensayo con las células en un circuito de alta disipación térmica que limite el incremento de temperatura entre inyección de corriente y medida.

Además a nivel de fiabilidad hay que tener en cuenta que en las células solares de tamaño grande se pueden producir fuertes ciclos térmicos de temperatura en campo durante los cambios de estado de funcionamiento a no funcionamiento. Estos cambios pueden ser abruptos con la aparición de una nube o más suaves entre el día y la noche. Ensayos acelerados específicos que simulen estos ciclos de temperatura pueden ayudar a predecir los mecanismos de fallos que producen estos ciclos.

En este capítulo se va a tratar la adaptación de la metodología y la instrumentación para células de mayor tamaño, así como el análisis térmico de las opciones de diseño del circuito de ensayos a alta temperatura en este tipo células.

7.2. Metodología y planificación de ensayos

Generalizar la metodología de los ensayos acelerados desarrollada para células de GaAs de tamaño pequeño a células multiunión de área grande aunque supone pocos cambios en lo que respecta al procedimiento implica importantes retos a nivel tecnológico y de instrumentación entre los que podemos destacar:

- La evaluación del mecanismo de fallo o degradación mediante simulaciones 3D es mucho más compleja en células multiunión que en células monounión, porque la estructura semiconductor es mucho más compleja.
- Antes de los ensayos hay que analizar en que proporción la corriente inyectada en directa transcurre por la célula multiunión en vertical, y en que proporción esta corriente se dispersa debido a la compleja estructura del semiconductor, y adecuar la inyección de corriente, para que la densidad bajo el bus sea la misma que la densidad de corriente del área activa de la célula en concentración.
- La simulación de la condición eléctrica de trabajo mediante inyección de corriente en directa a través de los dos terminales conductores laterales de la célula multiunión de área grande (ribbon bond) (Figura 1.6-b). requiere corrientes significativamente mayores que afectan a la elección del procedimiento de medida e instrumentación que se debe emplear.

A partir de la experiencia obtenida en los ensayos es necesario tener en cuenta diversas consideraciones:

1. Mantener el tipo de ensayo de vida acelerada con estrés en temperatura (ALT – Accelerated Life Test) con el objetivo de estimar la fiabilidad en condiciones nominales de trabajo.
2. Realizar ensayos acelerados a tres temperaturas diferentes, que es habitualmente el número mínimo de temperaturas que permiten demostrar de forma fehaciente que los resultados de degradación o fallos de las células durante los ensayos acelerados siguen el modelo Arrhenius u otro, y posteriormente comprobarlo mediante el método de cálculo que se ha descrito en el capítulo 4.

3. En los ensayos con células pequeñas sólo se ha medido la temperatura de la cámara climática y posteriormente la temperatura de la célula que resultó tener un pequeño incremento respecto a la temperatura de la cámara climática, entre 3°C y 4 °C. En el caso de las células de mayor tamaño es conveniente que durante el ensayo se mida además de la temperatura ambiente, la temperatura de las células ya que el incremento de temperatura puede ser significativo.
4. Es necesario evaluar el tiempo de espera entre el estado en inyección de corriente y el estado de caracterización de la curva I-V de la célula, para que no afecte a la medida el calentamiento por la inyección de corriente. El diagrama de flujo de medidas puede ser similar al realizado en células pequeñas, Figura 6.3, pero cambiando los 65°C (temperatura nominal de nuestra célula) por la temperatura nominal de trabajo de la nueva célula.

Uno de los principales problemas en los ensayos con células multiunión es caracterizar la célula a partir de la curva I-V en oscuridad ya que aunque es posible evaluar la potencia de la célula y por lo tanto su degradación cuantitativa, sin embargo la identificación del mecanismo de fallo es mucho más complicado por haber varias subcélulas en serie. Para ello es necesario contar con herramientas de caracterización que permitan identificar el comportamiento y caracterización de cada subcélula [THK05] [LOS+10], por ejemplo midiendo la célula a espectros de luz adaptados a cada unión, y relacionándolos con la medida integrada de la célula.

La extensión del modelado 3D desarrollado y empleado en el IES-UPM para caracterizar la célula en el análisis de degradación de esta tesis [EAGN+10] [GARS08], a células multiunión incluyendo diodos túnel se está realizando y los autores la han presentado en [EGRS+10]. Esta mejora de las prestaciones del modelo distribuido 3D permitirá a partir de la evolución de la curva I-V en oscuridad durante los ensayos, obtener información del comportamiento final de cada unión respecto a los mecanismos de degradación.

7.3. Instrumentación

La instrumentación necesaria para realizar ensayos acelerados en células de área mayor requiere importantes modificaciones respecto a la instrumentación

desarrollada en células pequeñas, ya que los valores de inyección de corriente para la simulación de funcionamiento y los niveles de medida de la curva I-V tienen valores muy superiores. Esto obliga a cambiar prácticamente toda la instrumentación incluyendo la filosofía de medida, y por tanto la programación en LabVIEW®, el software de control de la instrumentación.

En la instrumentación de ensayos acelerados para células de 1 mm² se manejaban corrientes como máximo de 1 Amperio lo que nos permitía utilizar relés integrados en tarjetas de conmutación comerciales dentro del equipo de conmutación, e integrados con cuatro relés en la tarjeta de circuito impreso específica diseñada. Ahora las corrientes a manejar son del orden de 5 Amperios lo que obliga a rediseñar el sistema de instrumentación.

En la Figura 7.1 se presenta la propuesta del diagrama de bloques del sistema, donde los cambios en la estructura más importantes respecto al diseño para células de área 1 mm² son:

- Debido a que los niveles de corriente de las curvas I-V en oscuridad pueden superar los 5 Amperios, se ha elegido como equipo de medida de corriente una fuente de alimentación programable con niveles de corriente por encima de este límite de corriente. La tensión en bornas de la célula se medirá a través de un equipo de adquisición de datos compuesto al menos por un voltímetro de precisión y una tarjeta de conmutación.
- El diseño de las placas de circuito impreso de relés además de ser específico implica placas de circuito impreso más grandes. Se precisan relés electromecánicos de 10 amperios, para conmutar estos relés y controlar qué célula se va a medir o para pasar en secuencia todas las células a inyección de corriente, además hacen falta numerosas líneas de control, lo que nos obliga a introducir un equipo de control digital conectado al PC.
- Es necesario rediseñar las fuentes de corriente en la instrumentación para que suministren corrientes mayores. El cableado entre la instrumentación, las PCB's de relés de conmutación intermedios y las cámaras climáticas seguirá siendo muy numeroso, y dimensionado para que soporte al menos los 5 amperios con los que se trabaja en el ensayo.

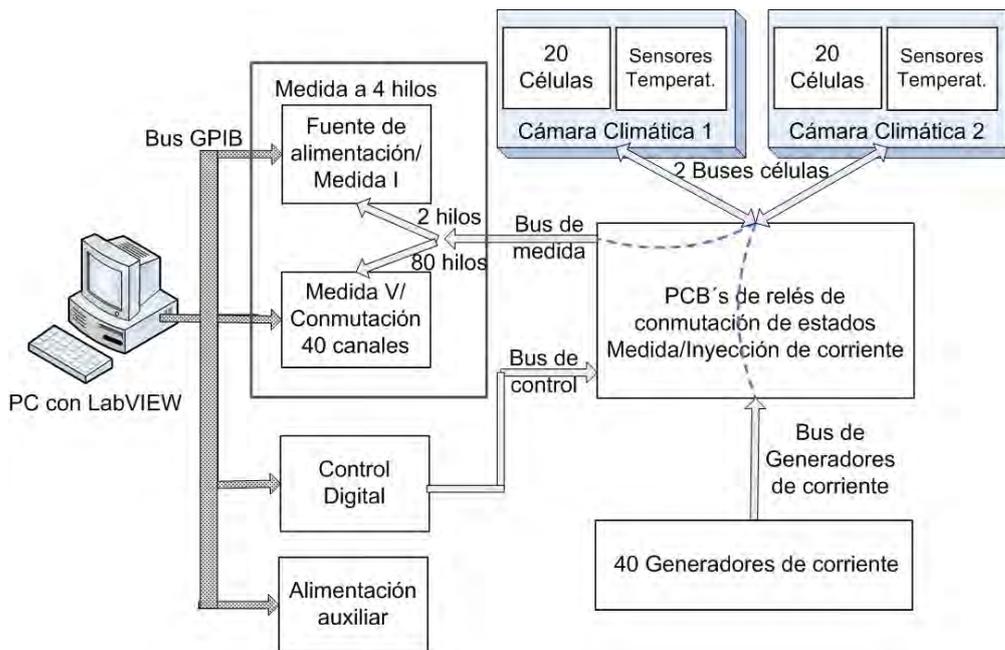


Figura 7.1 : Diagrama de bloques del sistema propuesto.

Por lo tanto, a pesar de que el procedimiento de medida y simulación durante el ensayo acelerado es continuista con el planteado para células pequeñas el cambio de niveles de corriente implica la necesidad de un sistema de medida, tarjetas de conmutación intermedias y control digital de dichas tarjetas diferentes.

7.4. Análisis térmico del circuito de ensayo

Desde el punto de vista del ensayo acelerado el circuito de ensayos tiene la misión de ser el soporte de las células solares y su conexión con el exterior. Desde el punto de vista térmico el principal objetivo es que el circuito no influya en los mecanismos de fallos del dispositivo, por tanto, un buen diseño de un circuito de ensayos supone que el incremento de temperatura de la célula respecto al ambiente en la cámara climática sea lo menor posible.

Para realizar el análisis de la temperatura en la célula en función del circuito de ensayos se ha empleado la herramienta de elementos finitos 3D LISA® Finite Element Technologies de Sonnenhof Holdings®, Canadá, utilizada en las simulaciones realizadas en el capítulo 5. En dicho capítulo se analizaba el comportamiento térmico de las células de GaAs en el circuito de ensayo, y se contrastaba con medidas reales

obteniendo una buena correlación. En este capítulo se muestran los resultados de análisis térmicos en células de área grande. Parte de este trabajo se realizó en el marco de un Proyecto Fin de Carrera de la EUITT-UPM [GM10] bajo la dirección del autor de esta tesis.

En las próximas subsecciones se plantearán todos los pasos necesarios para la realización del modelado térmico de las células solares, desde la potencia de las células en condiciones emuladas de funcionamiento, hasta los diferentes parámetros del modelado térmico y los resultados y conclusiones obtenidas.

7.4.1. Potencia de las células

Un factor que influye de forma muy importante en la temperatura de la célula durante los ensayos es la potencia que disipa en función de la célula concreta y el nivel de concentración. En los ensayos acelerados la inyección de corriente se ha calculado a partir del procedimiento definido en el capítulo 5, con los siguientes supuestos:

- **La célula en condiciones nominales de funcionamiento se encuentra a 65 °C.** El rendimiento y la tensión a P_{max} de la célula a las diferentes concentraciones a esta temperatura se obtiene a partir de la hoja de datos del fabricante. Con los dos valores anteriores obtenemos la corriente a P_{max} , y a partir de ésta la densidad de corriente en el área activa.
- Aunque como hemos dicho hay que evaluar la proporción de corriente inyectada que fluye perpendicularmente hacia la base de la célula, y este es un dato aún no evaluado, **para estas simulaciones consideraremos que la corriente inyectada en directa a través de los buses conductores exteriores fluye en un 100% perpendicular hacia la base de la célula.** La corriente a inyectar se obtiene multiplicando el área de los terminales de salida por la densidad de corriente obtenida en el punto anterior.
- **La tensión en la célula debido a la corriente inyectada en directa es la tensión con la que se obtiene P_{max} .** Debido a la forma de la curva I-V de las células solares esta aproximación es bastante buena.

Con estos supuestos y aproximaciones, se ha evaluado el valor de la potencia que se produce en cada célula y condición de concentración al inyectar la corriente en

directa y se ha reflejado en la Tabla 7.1. El término “calor interno” o Internal Heat (en W/m^3) es un parámetro de la herramienta de simulación LISA[®], que indica la potencia que disipa de modo constante una unidad de volumen de un material o elemento concreto, en nuestro caso el “calor interno” de las células, suponiendo una distribución uniforme en toda su área y un espesor de 0,9 mm.

Tabla 7.1: Potencia que disipa la célula en condiciones de simulación de trabajo, y potencia por unidad de volumen “calor interno” (Internal Heat). Para dos tamaños de células y cuatro concentraciones

Concentración	Célula 30 mm ² , P(W) / “calor interno”(W/m ³)	Célula 100 mm ² , P(W) / “calor interno” (W/m ³)
250X	0,507 / $1,84 \cdot 10^7$	0,888 / $9,66 \cdot 10^6$
500X	1,023 / $3,71 \cdot 10^7$	1,784 / $1,94 \cdot 10^7$
750X	1,545 / $5,60 \cdot 10^7$	2,710 / $2,94 \cdot 10^7$
1000X	2,055 / $7,45 \cdot 10^7$	3,592 / $3,90 \cdot 10^7$

7.4.2. Material del sustrato del circuito de ensayo

En cuanto al material con el que realizar el circuito para ensayos acelerados en temperatura, hay que considerar aquellos que soportan temperaturas muy altas (del orden de 170°C o superiores), y son empleados por fabricantes de células o módulos de concentración. Podemos destacar, los dos siguientes:

- DBC (Direct Bonded Copper) es un sustrato cerámico que lleva adherida una plancha de cobre. El sustrato es habitualmente de alúmina (Al_2O_3) y la plancha de cobre se une a la cerámica mediante oxidación de la zona de contacto de ambos materiales, puede trabajar a temperaturas muy superiores a 170°C sin problemas. Ya se comentaron algunas de las características de este material en el capítulo 5, ya que con él se realizó nuestro circuito de ensayos. Las ventajas de este material son la conductividad eléctrica de las pistas, ya que son planchas de cobre gruesas, su buen comportamiento térmico, su funcionamiento a alta temperatura, y que permite la soldadura de chips de gran área debido a que la alúmina limita la dilatación del cobre al aumentar la temperatura, reduciendo el estrés mecánico. Hay que considerar que los Coeficientes de Expansión

Térmica (CTE Coefficient of Thermal Expansion) del sustrato (8,62 ppm/°C) y de las células son similares, el GaAs (6,86 ppm/°C) y el Ge (5,8 ppm/°C). Este comportamiento es mejor que el del sustrato alternativo, IMS (Insulation Metal Substrated).

- IMS (Insulation Metal Substrated). El sustrato base es de aluminio, un conductor eléctrico sobre el que se coloca un adhesivo aislante eléctrico y conductor térmico, para pegar en la parte superior una lámina de cobre. El adhesivo limita la temperatura máxima continua de trabajo, que según el fabricante está entre 150°C y 170°C, con lo cual se podría emplear en ensayos acelerados pero con limitaciones. El aluminio también mitiga la dilatación del conductor de cobre, aún así el CTE del aluminio es muy elevado (23 ppm/°C) comparado con el de las células III-V. Probablemente esta diferencia no sea crítica en campo a temperaturas de 80 °C, pero sí podría serlo a las temperatura de ensayo de 170 °C. Sería necesario realizar ensayos previos a la temperatura máxima del ensayo para analizar si se desprende o fractura la célula III-V de área grande sobre el IMS.

Para el modelado térmico de ambos sustratos Figura 7.2, no se ha trabajado con la conductividad térmica del conjunto del circuito indicado por el fabricante, sino con los espesores y la conductividad térmica de cada uno de los materiales que componen el sustrato. En la Tabla 7.2, y Tabla 7.3 se muestran los valores considerados para los dos sustratos.

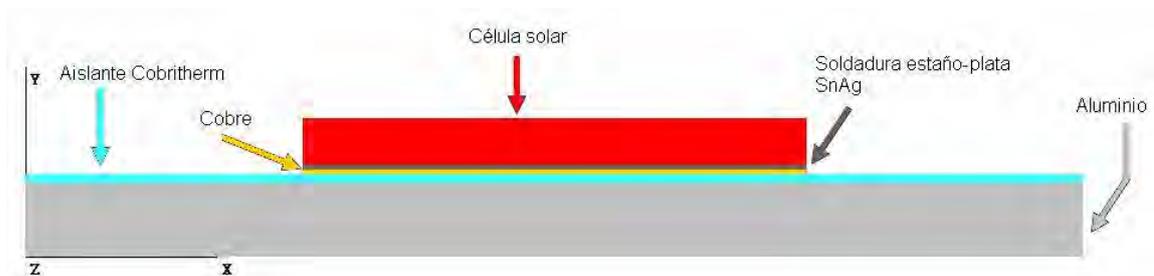


Figura 7.2: Estructura del modelo térmico en LISA® del sustrato IMS (Insulation Metal Substrated) sin disipador adicional de alúmina.

Tabla 7.2: Valores del modelo térmico del sustrato DBC (Direct Bonded Copper).

Nº de material en las simulaciones	Material	Conductividad térmica (W/m ⁰ K)	Espesor (mm)
1	Chip	46	0,92
2	Soldadura SnAg	78	0,10
3	Cobre	401	0,10
4	Alúmina	24,7	0,15
5			1,50

Tabla 7.3: Valores del modelo térmico del sustrato IMS (Insulation Metal Substrated).

Nº de material en las simulaciones	Material	Conductividad térmica (W/m ⁰ K)	Espesor (mm)
1	Chip	46	0,92
2	Soldadura SnAg	78	0,10
3	Cobre	401	0,10
4	Adhesivo aislante Cobritherm [®]	1,45	0,15
5	Aluminio	250	1,50

En las subsecciones siguientes vamos a mostrar los resultados de las simulaciones térmicas realizadas con los sustratos mencionados y células solares multiunión.

7.4.3. Transferencia térmica al ambiente

Puesto que previsiblemente trabajaremos en el rango de ensayos acelerados entre 130 °C y 170°C, y que el principal resultado de las simulaciones que es el incremento de temperatura máxima de la célula respecto al ambiente, sería muy parecido en las tres temperaturas, las simulaciones se han realizado siempre considerando el ensayo de temperatura ambiente 150°C, y por tanto adecuando todos los parámetros de simulación a dicha temperatura.

Por tanto, en las simulaciones se han introducido las características térmicas del aire a 150 °C [EII84], se ha incluido la velocidad del aire medida en la cámara, 2,3 m/s, y se ha considerado que el chip tiene un material sobre él que disipa muy mal el calor, siendo equiparable a la convección forzada de la parte superior de la célula. Además se considera que existe convección forzada en el resto de laterales del circuito y la célula que estén al aire. La célula disipará calor por conducción hacia su parte inferior al circuito de ensayos, y de éste al disipador situado bajo él, la superficie inferior del conjunto disipa por convección calor a la cámara climática.

En la Figura 7.3 se ha reflejado la estructura de elementos finitos del circuito con una célula, donde las flechas naranjas reflejan las caras del modelo con convección. Las zonas con mayor densidad de elementos finitos poligonales son los materiales más estrechos (soldadura, cobre, adhesivo) y la célula que está generando potencia.

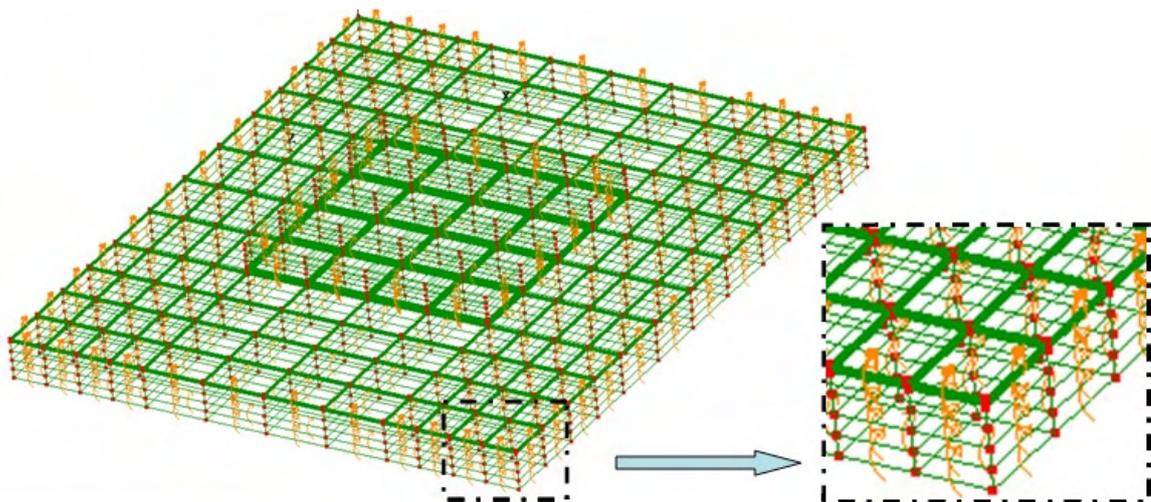


Figura 7.3: Estructura del modelo térmico en LISA® del circuito individual sin disipador sobre sustrato IMS con célula de 100 mm².

En el cálculo del Coeficiente de Transferencia de Calor al ambiente (Heat Transfer Coefficient), h en $W/m^2 \cdot ^\circ C$, se han considerado las condiciones de aire a 150°C, su velocidad, el área del material en contacto con el ambiente, y la posición del circuito respecto al flujo de aire. Se han obtenido valores que van desde $h=16,10 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ para la cara inferior del circuito múltiple con disipador, hasta $h= 36,23 W/(m^2 \cdot ^\circ C)$ para el circuito individual sin disipador, ambas configuraciones se explicarán después.

7.4.4. Alternativas de diseño del circuito de ensayos

Para definir el tamaño del circuito de ensayo base emplearemos un circuito de montaje real, el modelo que comercializa Spectrolab en sustrato DBC, denominado CCA 100 C1MJ Concentrator Cell Assembly, Figura. 1.5 y Figura 7.5. Este circuito sobre el que se monta la célula, requiere en campo un elemento de disipación térmica pegado a su parte inferior, para poder soportar las condiciones térmicas de disipación con concentración.

Para limitar el incremento de temperatura de las células durante el ensayo, nos planteamos tres alternativas.

1. **Realizar los ensayos en un circuito con varias células, Figura 7.4** . De esta forma se mantiene una estructura equivalente al circuito empleado en los ensayos en las células de 1 mm^2 de GaAs. La ventaja de esta alternativa es que el cableado se reduce a la mitad al quedar parte integrado en el circuito. Las simulaciones se han realizado suponiendo circuitos de 5 células.
2. **Realizar los ensayos en un circuito individual** para cada célula, **Figura 7.5**, con el objetivo de mejorar la disipación del calor. Esta alternativa requiere un cableado mayor.
3. Realizar los ensayos con los receptores del fabricante de la célula. En la mayoría de los casos esta sería la mejor opción al ser la más cercana a la realidad, pero tiene como inconveniente que se puede ver muy limitada la temperatura máxima de ensayo.

De estas tres alternativas sólo realizaremos la simulación térmica de las dos primeras ya que el receptor viene impuesto por el fabricante, y si lo empleamos no requiere de simulación, ya que se puede medir directamente la temperatura de la célula en una prueba de funcionamiento con inyección de corriente en directa.

El circuito con varias células es la primera opción seleccionada por la similitud con la estructura del circuito de los ensayos previos. En la Figura 7.4 se muestra el circuito con las 5 células con el ánodo común. Para ello se han unido cinco circuitos de ensamblado reales del tipo mencionado anteriormente (CCA 100 C1MJ Concentrator Cell Assembly de Spectrolab, Figura 1.5). Para realizar el ensayo a las células de este

circuito se necesitan 12 cables de medida que se conectan al circuito dentro de la cámara climática y que es necesario extraerlos hacia los equipos de instrumentación.

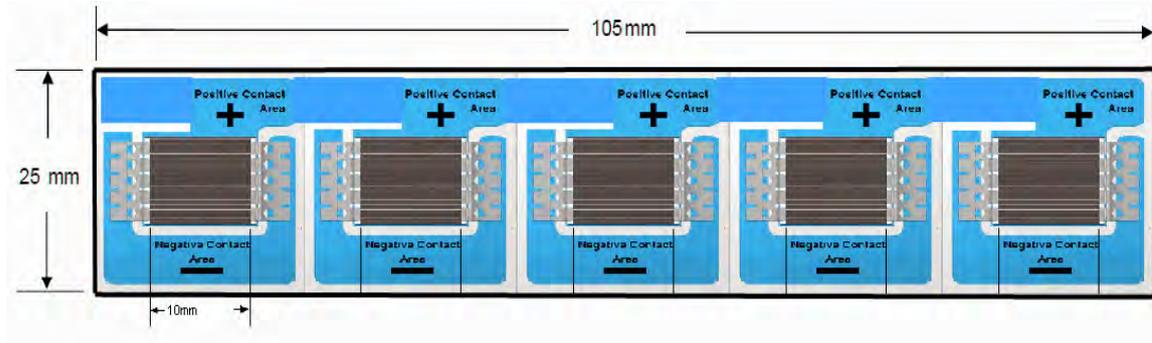


Figura 7.4 Diseño del circuito múltiple para el caso de células de 100 mm². Formado por circuitos individuales tomados de [Spectrolab].

La opción alternativa a este circuito es utilizar circuitos independientes cada uno de ellos con una sola célula, Figura 7.5.

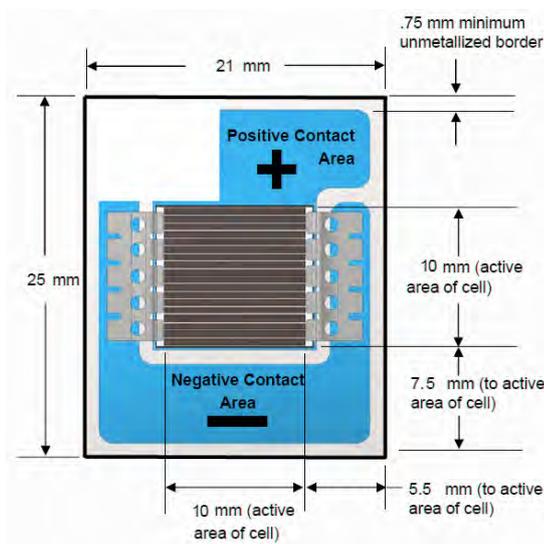


Figura 7.5 Diseño del circuito individual y posición de la célula para el caso de la célula de 100 mm². Tomado de [Spectrolab].

Si con estos dos tipos de circuitos; múltiple (Figura 7.4) e individual (Figura 7.5), el incremento de temperatura fuese excesivo, hemos contemplado una estructura más

compleja que mejoraría la disipación en ambos circuitos mediante la adhesión de un disipador.

En ambos casos se ha empleado como disipador un plancha de alúmina (Al_2O_3 , con conductividad térmica $24,7 \text{ W/m}^0\text{K}$) de 6 mm de espesor. Las principales ventajas de la alúmina es que es inalterable a muy altas temperaturas, y no es conductor eléctrico pero si térmico. Se ha evaluado a través de simulaciones que una alternativa térmica equivalente a 6 mm de alúmina sería un disipador de aluminio (conductividad térmica $250 \text{ W/m}^0\text{K}$) que requeriría un espesor de aproximadamente 1 mm.

Por tanto, considerando los circuitos sin y con disipador, **se plantea el análisis térmico de cuatro diseños diferentes:**

1.a) El diseño de **circuito múltiple sin disipador** (Figura 7.4) que denominaremos en la gráfica de resultados diseño Múltiple Sin Disipador (Multip._SIN_Disip en Figura 7.6).

1.b) El diseño de **circuito múltiple con disipador** (Figura 7.4) al que se le adhiere un disipador de alúmina de 6 mm de espesor y dimensiones 206,6 mm de longitud por 126,6 mm de ancho, que denominaremos en la gráfica de resultados diseño Múltiple Con Disipador (Multip._CON_Disip en Figura 7.6).

2.a) El diseño de **circuito individual sin disipador** (Figura 7.5) al que denominaremos diseño Individual Sin Disipador (Indiv._SIN_Disip. Figura 7.6).

2.b) El diseño de **circuito individual con disipador** (Figura 7.5) al que se le adhiere un disipador de alúmina de 6 mm de espesor y dimensiones 71 mm de longitud por 76 mm de ancho, en la gráfica de resultados se denomina diseño Individual Con Disipador (Indiv._CON_Disip en Figura 7.6).

7.4.5. Resultado de las simulaciones

Como ha quedado reflejado en las secciones anteriores, el número de combinaciones a simular, tipo de células, circuitos y concentraciones, es muy grande, y por eso se analiza primero cada una de las dos células, y para cada una de ellas los resultados de las simulaciones a diferentes niveles de concentración para cada uno de los dos materiales empleados como sustrato del circuito. En la Figura 7.6 se

representan los incrementos de temperatura para la célula de 100 mm² para los diferentes diseños de circuitos, con y sin disipador.

De los resultados de las simulaciones para circuitos con células de 100 mm² (Figura 7.6) se puede concluir:

- El incremento de temperatura de las células sobre sustrato DBC e IMS en la Figura 7.6 son muy similares, por lo que la selección del sustrato no dependerá de razones térmicas.
- Para diseños de circuitos sin disipador (múltiple e individual) los incrementos de temperatura en las células de 100 mm² son excesivamente elevadas para ambos tipos de sustrato y cualquier concentración, van desde un incremento de temperatura respecto al ambiente en la cámara (150°C) de 20 °C a 250X hasta los aproximadamente 90°C a 1000X.
- Los resultados en circuito múltiple con disipador son considerablemente mejores que sin disipador. A muy altas concentraciones sigue existiendo una temperatura excesiva en las células (a 1000X 30 °C, y a 750X 22,6 °C Figura 7.7), pero a concentraciones entre 250X y 500X el incremento de temperatura de la célula no supera los 20 °C, y por tanto serían una alternativa de ensayo adecuada para la célula de 100 mm². En la Figura 7.7 se muestra la simulación del circuito con las células a 750X.
- **Los resultados del diseño del circuito individual con disipador son satisfactorios**, ya que los incrementos de temperatura están por debajo de los 20 °C, en cualquier concentración. En la Tabla 7.4 se muestran los incrementos de temperaturas concretas, y en la Figura 7.8 la simulación de un circuito individual a 750X. A la hora de comparar la Figura 7.7 y Figura 7.8 hay que considerar que tanto la escala de dimensiones como la de colores no son la misma debido a que están adaptadas a los valores extremos de temperatura, con el objetivo de ganar en claridad en las figuras.

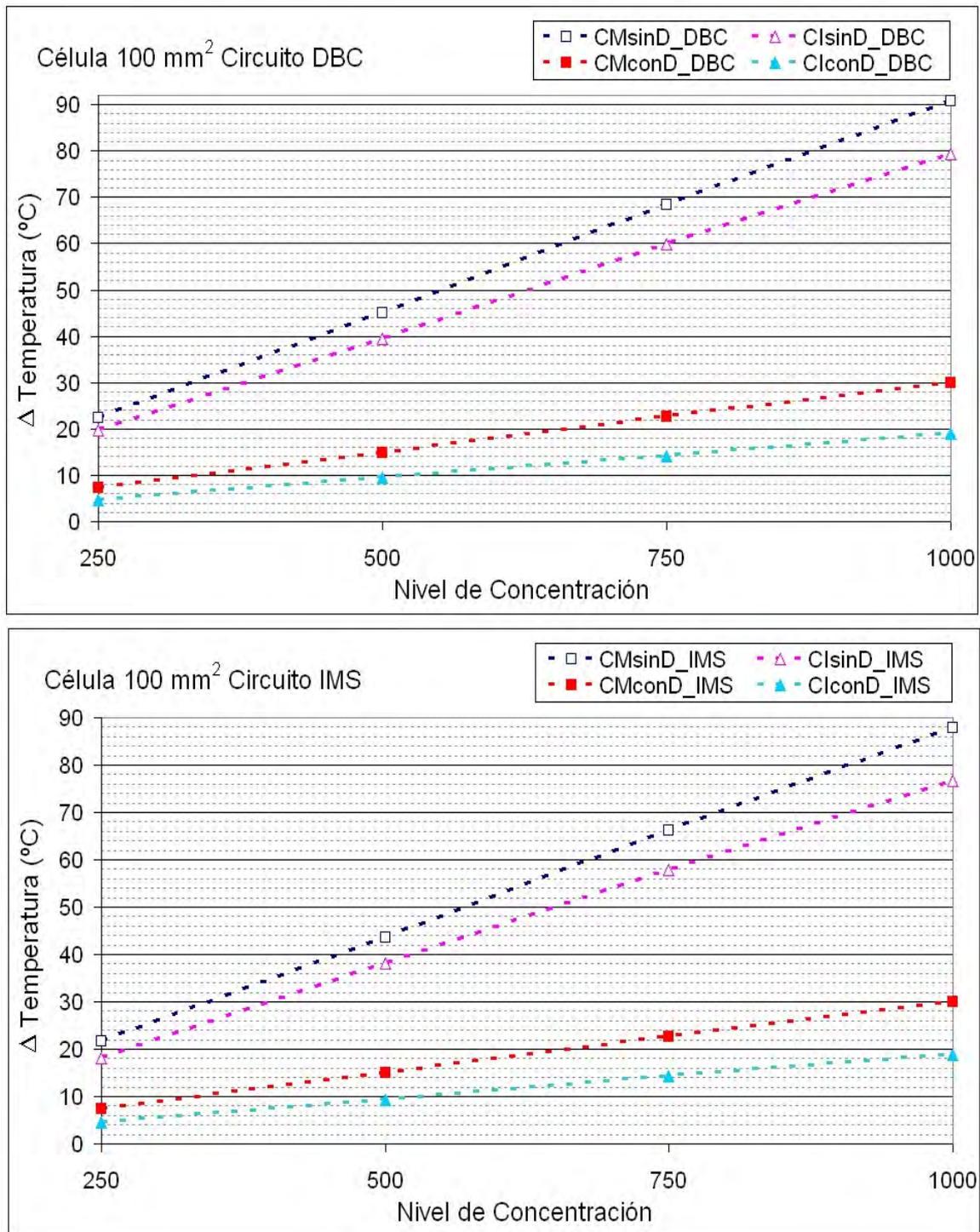


Figura 7.6: Incremento de temperatura en la células de 100 mm² , para los sustratos DBC (figura superior) e IMS (figura inferior) con diseños del circuito múltiple e individual, sin disipador y con disipador.

La conclusión general es que los circuitos individuales tienen incrementos de temperatura inferiores a los circuitos múltiples, y que el diseño de circuito individual con disipador es el más adecuado para las células de área 100 mm², Tabla 7.4.

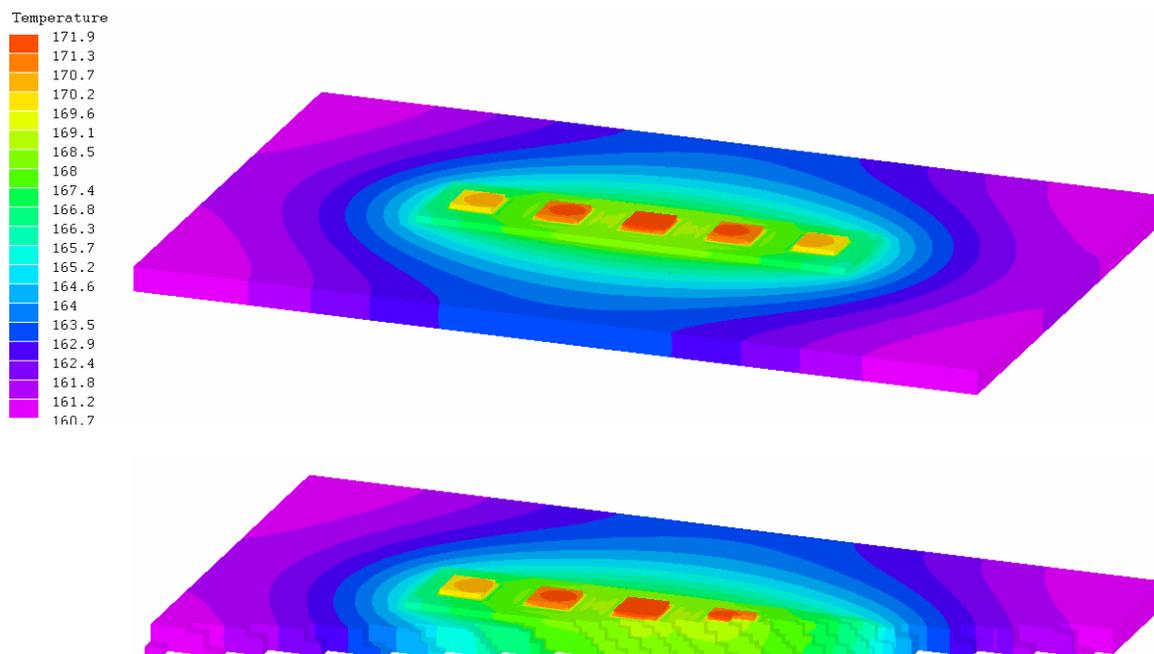


Figura 7.7: Vista general y corte transversal de la simulación de circuito IMS múltiple con disipador para células de 100 mm² y concentración 750X.

Tabla 7.4: Incrementos de temperatura en la célula de 100 mm², con el diseño del circuito individual con disipador y los dos sustratos DBC e IMS.

Concentración en célula de 100 mm ²	Incremento de temperatura en la célula sobre DBC, (°C)	Incremento de temperatura en la célula sobre IMS, (°C)
250X	4,7	4,6
500X	9,4	9,3
750X	14,2	14,2
1000X	18,9	18,8

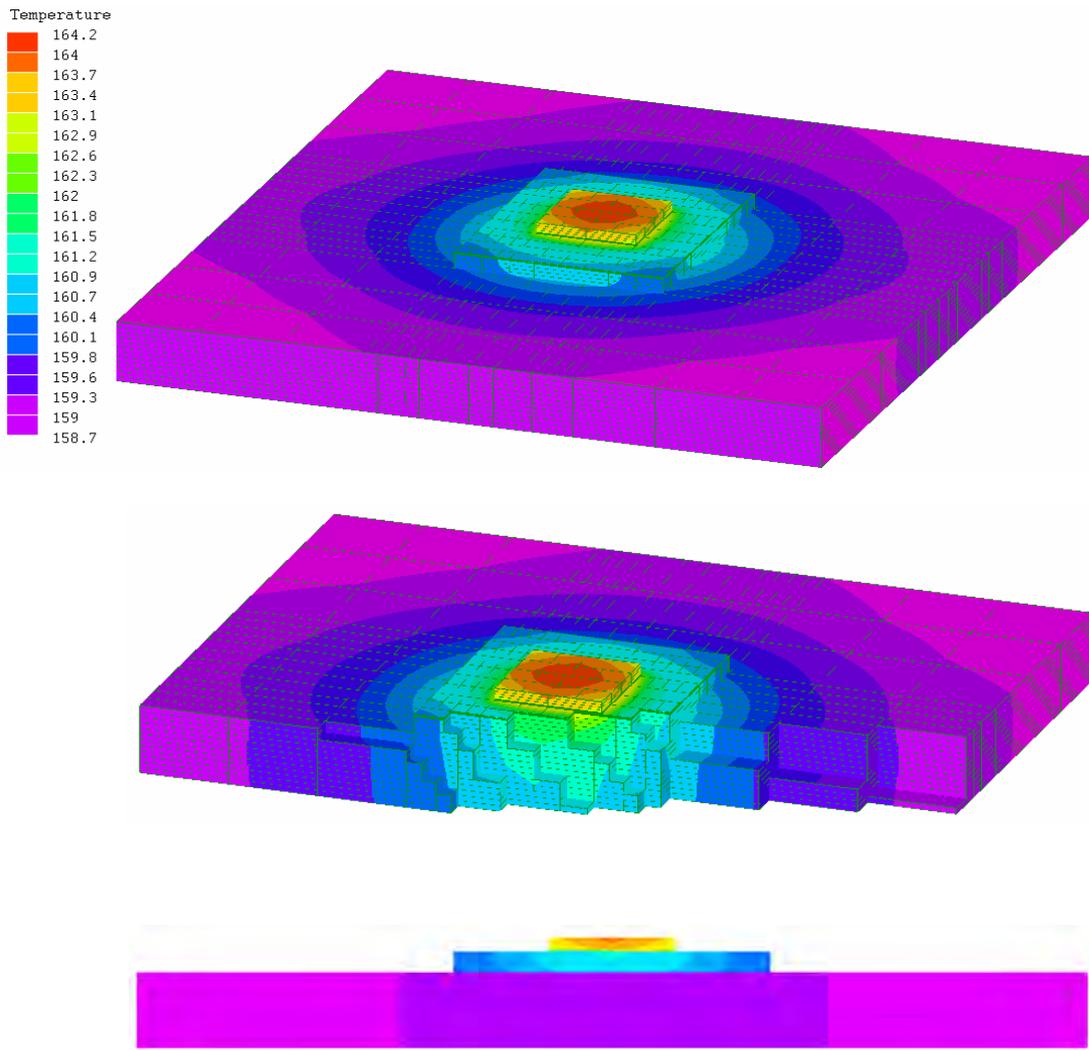


Figura 7.8: Vista general, corte transversal y corte perpendicular de la simulación de circuito DBC individual con disipador para células de 100 mm^2 y concentración 750X.

Una vez realizadas las simulaciones a las células de 100 mm^2 se realizaron las mismas simulaciones a las células de 30 mm^2 y se representaron de la misma forma en la **Figura 7.9**.

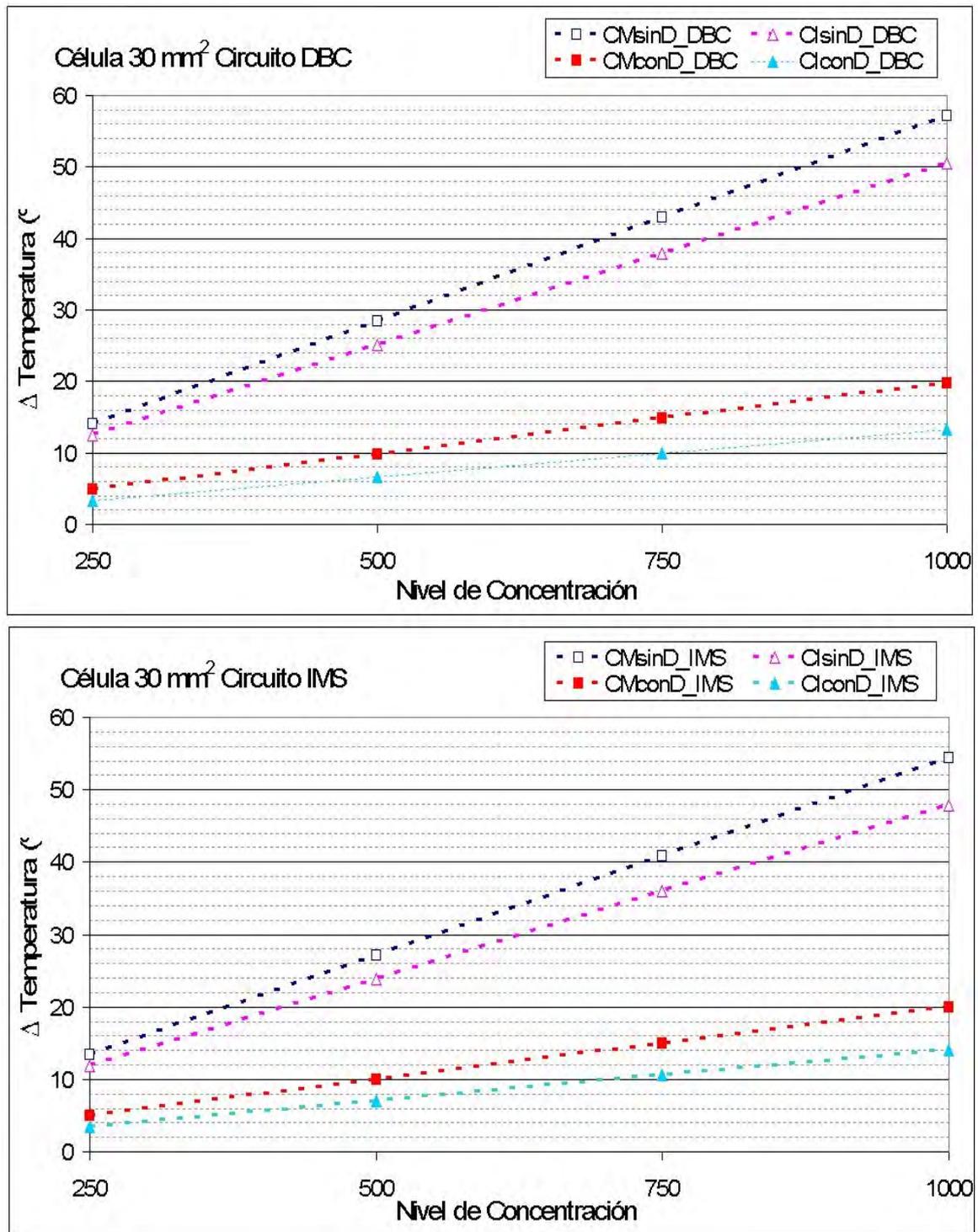


Figura 7.9: Incremento de temperatura en la células de 30 mm², para los sustratos DBC (figura superior) e IMS (figura inferior) con diseños del circuito múltiple e individual, sin disipador y con disipador.

De los resultados de las simulaciones para circuitos con células de 30 mm² (Figura 7.9) se puede concluir:

- Si relacionamos los resultados de las simulaciones en células de 100 mm² (Figura 7.8), y 30 mm² (Figura 7.9), se observa que para las mismas condiciones con la célula menor los incrementos son sensiblemente inferiores.
- Para diseños de circuitos sin disipador (múltiple e individual) las temperaturas en las células de 30 mm² son similares en ambos sustratos, y demasiado elevadas (Figura 7.10 circuito IMS múltiple a 1000X) para utilizarlos en ensayos acelerados, a excepción de las realizadas a concentración 250X.
- Figura 7.11 circuito IMS múltiple a 250X donde los incrementos están por debajo de los 15 °C, y por tanto podrían emplearse en el diseño múltiple o individual.
- Los resultados en circuito múltiple con disipador son aceptables para ensayos acelerados, con temperaturas en cualquier caso por debajo de los 20 °C. En la Figura 7.12 se puede observar la simulación en DBC para concentración de 1000X.
- Los **resultados del diseño del circuito individual con disipador son óptimos**, ya que el incremento de temperatura de la célula de 30 mm² no supera los 15 °C en ningún caso. En la Tabla 7.5 se muestran los incrementos de temperatura concretos y en Figura 7.13 la simulación de un circuito individual sobre DBC a 1000X.

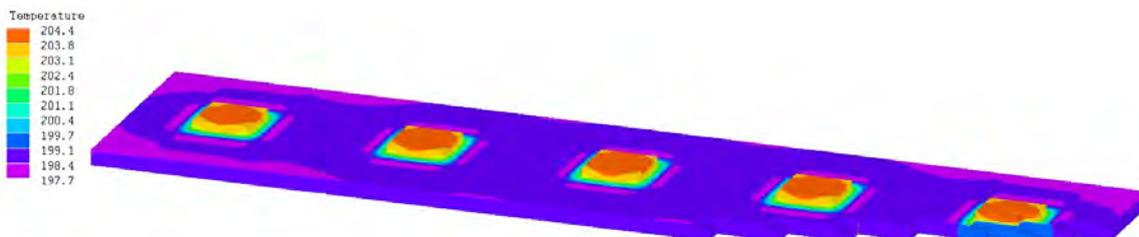


Figura 7.10: Vista de la simulación de circuito IMS múltiple sin disipador con corte transversal para células de 30 mm² y concentración 1000X.

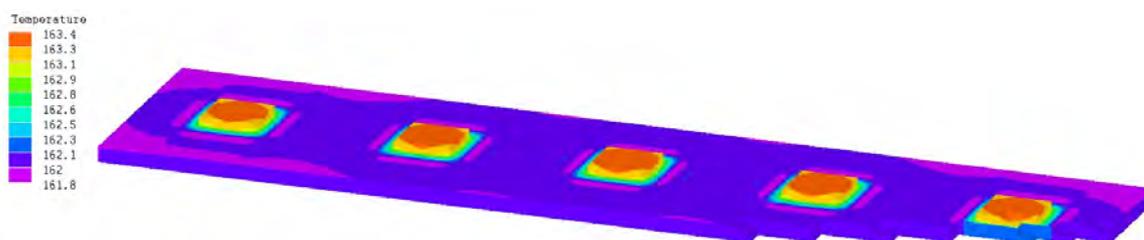


Figura 7.11: Vista general con corte transversal de la simulación de circuito IMS múltiple sin disipador para células de 30 mm² y concentración 250X.

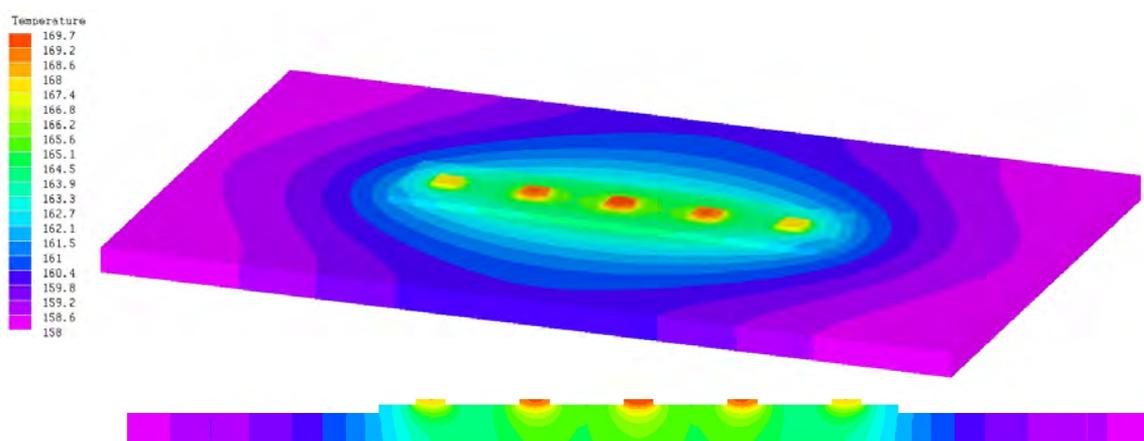


Figura 7.12: Vista general y corte perpendicular a las células de la simulación de circuito DBC múltiple con disipador para células de 30 mm² y concentración 1000X.

Tabla 7.5: Incrementos de temperatura en la célula de 30 mm², con el diseño del circuito individual con disipador y los dos sustratos DBC e IMS.

Concentración en célula de 30 mm ²	Incremento de temperatura en la célula sobre DBC, (°C)	Incremento de temperatura en la célula sobre IMS, (°C)
250X	3,3	3,5
500X	6,6	7,0
750X	10	10,6
1000X	13,3	14,0

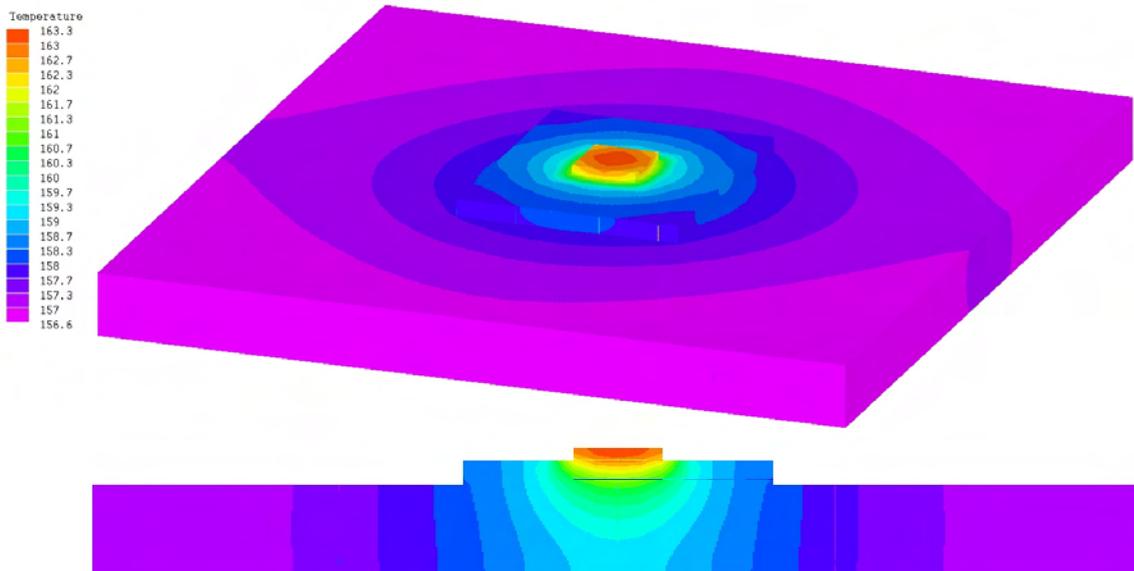


Figura 7.13: Vista general y corte perpendicular a la célula de la simulación de circuito DBC individual con disipador para células de 30 mm² y concentración 1000X.

7.4.6. Resumen de las simulaciones térmicas

En esta sección resumimos los resultados de las simulaciones sobre la adecuación de cada diseño de circuito para su uso en ensayos acelerados:

- Desde el punto de vista de la simulación térmica de los circuitos propuestos no hay diferencias significativa entre el sustrato DBC e IMS. Sin embargo, es importante considerar que en ensayos acelerados a alta temperatura siempre es preferible emplear el DBC que el IMS, debido a los coeficientes de dilatación más adecuados del DBC para montar células III-V grandes que serán sometidas a ensayos térmicos. En ambos casos y para que no aparezcan roturas en el chip por contracciones o dilataciones instantáneas, es necesario aumentar y reducir las temperaturas en las cámaras climáticas de un modo paulatino.
- De todas las simulaciones térmicas realizadas y asumiendo como aceptable un incremento de temperatura de 20 °C, se ha realizado una matriz de las

diferentes configuraciones de circuito Tabla 7.6. Como se observa en la tabla, la mejor opción es un circuito individual con disipador.

Tabla 7.6: Opciones de utilización de cada tipo de circuito en ensayos acelerados para cada nivel de concentración y tipo de célula. Las simulaciones muestran el mismo comportamiento de los sustratos DBC e IMS. En la tabla el signo - significa que es una configuración no utilizable, + significa que si es utilizable.

Concentración	Circuito Múltiple SIN disipador 100 mm ² /30 mm ²	Circuito Individual SIN disipador 100 mm ² /30 mm ²	Circuito Múltiple CON disipador 100 mm ² /30 mm ²	Circuito Individual CON disipador 100 mm ² /30 mm ²
250X	- / +	- / +	+ / +	+ / +
500X	- / -	- / -	+ / +	+ / +
750X	- / -	- / -	- / +	+ / +
1000X	- / -	- / -	- / +	+ / +

Si analizamos la linealidad de los incrementos de temperatura en las células obtenidos respecto al nivel de concentración, en la Figura 7.6 y la Figura 7.9 para cada tipo de circuito podemos obtener algunas conclusiones interesantes, como que es posible obtener el incremento de temperatura para cualquier nivel de concentración simplemente siguiendo la línea recta de las gráficas correspondientes al circuito y tipo de célula empleada. Como la potencia de la célula es proporcional al nivel de concentración, también existe una relación lineal entre el incremento de temperatura y la potencia de la célula. La inversa de esta relación lineal es la resistencia térmica de la unión de la célula al ambiente ($R_{th_{j-a}}$ en °C/W) para cada tipo de circuito y célula montada, y para las condiciones concretas de nuestras simulaciones, una velocidad del viento de 2,3 m/s y unas características del aire correspondientes a 150 °C.

Además a partir de la potencia en cada célula y el incremento de temperatura obtenido mediante la simulación podemos evaluar la resistencia térmica unión ambiente en cada caso ($R_{th_{j-a}}$) mediante la ecuación 7.1. Una vez evaluada estas resistencias térmicas para cada caso, se puede hacer el proceso contrario dada una potencia cualquiera en la célula obtener el incremento de temperatura respecto al ambiente.

$$(T_j - T_a) = Rth_{j-a} \cdot P \quad (7.1)$$

Donde T_j (“junction temperature”) es la temperatura en la unión de la célula y T_a es la temperatura ambiente en la cámara climática, P es la potencia que disipa la célula con inyección de corriente en directa, y (Rth_{j-a}) es la resistencia térmica unión ambiente.

Puesto que el objetivo principal del trabajo es evaluar los incrementos de temperatura en función de los circuitos propuestos, hemos obtenido las resistencias térmicas unión ambiente (Rth_{j-a}) exclusivamente en función del tipo del circuito Tabla 7.7. Esto nos permite ver reflejadas de forma más directa el comportamiento térmico de los diferentes tipos de circuito. Existe una pequeña diferencia entre el valor de Rth_{j-a} obtenido para cada tipo de sustrato y cada tamaño de célula, esta diferencia es sólo de un 10%, para resumir y aclarar los resultados trabajamos con el valor medio.

Tabla 7.7: Valores de Rth_{j-a} para cada tipo de circuito en ensayos acelerados. Se considera el valor de Rth_{j-a} medio de los dos tipos de sustrato y para los dos tamaños de célula.

	Circuito Múltiple SIN disipador	Circuito Individual SIN disipador	Circuito Múltiple CON disipador	Circuito Individual CON disipador
Valor de Rth_{j-a} (°C/W)	26,00	22,83	8,96	5,95

De la Tabla 7.7 se puede concluir que la estructura múltiple sin disipador es ligeramente peor que la estructura individual sin disipador, debido a que en la estructura múltiple la célula central está calentada por las colindantes aunque el área de disipación alrededor de cada célula es la misma. Sin embargo, cuando se utiliza el disipador se puede observar que la diferencia de la resistencia térmica entre el circuito individual y múltiple es en porcentaje significativamente mayor ya que la influencia del disipador en el circuito múltiple (8,96 °C/W) y por tanto su eficacia es claramente inferior de la influencia del disipador en el circuito individual (5,95 °C/W). Esta diferencia se debe a la simetría térmica de disipación para el caso de circuito individual y para el múltiple, y no al área del disipador ya que se ha trabajado para el circuito múltiple con un disipador que tiene un área cinco veces mayor que la definida en el caso del circuito individual.

Finalmente como se explicó en la primera sección, además de las opciones que hemos abordado con diseños de circuitos específicos, existe la opción de emplear el receptor real de la célula. El principal inconveniente de utilizar el receptor real es que los ensayos se ven limitados a la máxima temperatura de operación de los materiales en contacto con la célula, habitualmente de menor resistencia a la temperatura que los circuitos específicamente diseñados para ensayos acelerados en temperatura. Por otro lado, tiene la gran ventaja de emplear muestras reales y por tanto la información obtenida será más parecida a la producida en campo.

7.5. Conclusiones

En este capítulo se han mostrado los resultados del análisis de la generalización de los ensayos acelerados en células solares III-V de 1 mm^2 a células III-V área grande. Dentro de este análisis se han analizado tres aspectos; la metodología de ensayos acelerados, la instrumentación, y el análisis térmico para el circuito de ensayos acelerados:

- En referencia a la metodología, concluimos que se puede reproducir el proceso de ensayo acelerado que se ha planteado en esta memoria con las células III-V de área grande. Se observa una mayor dificultad para identificar el origen de la posible degradación de potencia generada, si se considera que en células multiunión podemos tener tres uniones semiconductoras en serie, sin acceso individual a cada una de ellas.
- En referencia a la instrumentación sería necesario plantear un nuevo sistema de instrumentación incluyendo el software, en la que aún manteniendo la metodología hay que cambiar el procedimiento y los equipos de medida de la curva I-V en oscuridad, así como introducir un equipo de control con un gran número de salidas digitales, para controlar relés de alta corriente (10 A),
- En referencia a la selección del circuito de ensayos, se ha comenzado por reproducir la estructura empleada en esta tesis con las células de 1 mm^2 , donde varias células comparten circuito pero hay que concluir que realizar circuitos múltiples no es térmicamente una buena opción si se compara con realizar circuitos individuales. En los circuitos individuales con disipador el

incremento de temperatura de la célula respecto al ambiente es mucho menor. Además se podría mantener la estructura de células con ánodo común realizando un cableado entre los circuitos de las células individuales dentro de la cámara climática.

- Por último al haberse cuantificado el incremento de temperatura en la célula para diferentes condiciones de concentración y diseño del circuito, podemos definir la temperatura adecuada programada en la cámara para que la célula con inyección de corriente se encuentre a las temperaturas de ensayo acelerado planificada.

Por lo tanto, los problemas de la generalización a células de área grande se centran en la metodología debido a la estructura interna y no accesible de las células multiunión, en la instrumentación debido al salto en corriente a emplear durante la condición de trabajo y medida de los ensayos, y por último en cuanto a la temperatura que alcanzarán las células en el circuito de ensayo. El problema del incremento de temperatura de las células, queda en gran parte resuelto si se eligen circuitos individuales de ensayo con disipadores adecuados, o directamente los receptores de las células, aunque esto último puede limitar considerablemente la temperatura máxima de ensayo y por lo tanto la aceleración del ensayo acelerado, lo que implica una duración considerablemente mayor del ensayo para el mismo nivel de medida de degradación y contabilización de fallos en las células ensayadas.

Capítulo 8

RESUMEN, APORTACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se mostrarán los principales resultados y aportaciones obtenidos a lo largo de esta tesis, y los posibles trabajos futuros que se han abierto a partir de éstos.

8.1. Resumen de resultados y aportaciones de la Tesis

A lo largo de esta memoria se han ido describiendo los resultados teóricos, la metodología e instrumentación desarrollada, y los desarrollos experimentales y analíticos para la obtención de la degradación, la fiabilidad y la garantía de las células solares III-V de GaAs y alta concentración fabricadas en el IES-UPM.

Con el objetivo de facilitar una perspectiva global del trabajo, recogemos aquí los resultados y aportaciones más significativos, siguiendo un esquema paralelo a la organización de la memoria.

8.1.1. Análisis y planificación de ensayos acelerados en células solares de concentración

La tesis comienza por un recorrido por los trabajos de investigación relacionados con la cualificación, degradación y fiabilidad mediante ensayos de los módulos de SFC y las células solares de concentración III-V, previos a la realización de esta tesis doctoral. Estos trabajos estaban circunscritos a tres tipos de ensayos acelerados: ensayos acelerados de cualificación, ensayos de vida muy acelerada (HALT – Highly Accelerated Life Test) y ensayos en tiempo real y campo en SFC pero de duración mucho menor que la vida del sistema. Entre los organismos que han realizado estos trabajos, destaca el Grupo de Investigación de Semiconductores III-V del IES-UPM al que pertenezco, con los trabajos previos a esta tesis [Gon08] [GVNA+09] [GVNA11].

De los trabajos del IES-UPM previos a esta tesis se obtuvieron tanto resultados cualitativos de la fiabilidad de células de GaAs como de las debilidades de módulos de SFC ensayados en campo con este tipo de células. Además de estos resultados cualitativos en el IES-UPM se obtuvieron las primeras aproximaciones cuantitativas de la función fiabilidad, $R(t)$, de células solares III-V de concentración evaluada mediante ensayos HALT y del módulo fotovoltaico de concentración con células III-V evaluado en campo y tiempo real.

En esta Tesis se va a dar un paso más que es realizar ensayos de vida acelerada (ALT - Accelerated Life Test) cuyo objetivo diferenciador es que a partir de ellos se evalúen las funciones y parámetros de fiabilidad, en condiciones nominales de funcionamiento durante toda la vida de la célula. Además a partir de las funciones de fiabilidad se realiza un análisis de las garantías que se pueden ofertar.

La principal aportación y resultado del capítulo 4 es el desarrollo de un plan de actividades de ensayos del tipo de vida acelerada (ALT) en temperatura (Figura 4.2), que partiendo de condiciones emuladas de trabajo de las células, permiten la evaluación cuantitativa de la fiabilidad de las células en condiciones nominales de trabajo. Para realizar la planificación de los ensayos acelerados, previamente en los primeros tres capítulos se han descrito las principales funciones y parámetros de fiabilidad, se ha analizado el estado del arte en ensayos sobre células III-V y módulos de SFC, y finalmente se han analizado los tipos de ensayos acelerados en células solares III-V de concentración, Tabla 4.1.

8.1.2. Metodología e instrumentación desarrollada

Para obtener datos cuantitativos de la fiabilidad de células solares III-V a condiciones nominales de funcionamiento, ha sido necesaria la realización de ensayos de vida acelerada (ALT) en temperatura, un tipo de ensayos muy utilizados en otros dispositivos optoelectrónicos pero que no se habían aplicado a células solares de concentración. La principal razón de que no se abordasen hasta ahora estos ensayos en este tipo de células solares es que la metodología de realización no podía plantearse de forma equivalente a la de cualquier otro dispositivo optoelectrónico. Por ello, ha sido necesario desarrollar una nueva metodología de ensayos acelerados que ha surgido de la evolución de ensayos previos realizados en el Grupo de Investigación.

La metodología desarrollada para los ensayos de vida acelerada (ALT – Accelerated Life Test) de esta tesis consta de dos partes:

- Las células solares dentro de la cámara climática emulan su funcionamiento en iluminación mediante la inyección de corriente en directa, de modo que la densidad de corriente a través del semiconductor en emulación es equivalente a la que fotogenera la célula en condiciones normales de funcionamiento.

- Las prestaciones de las células solares (potencia generada) se caracterizan dentro de la cámara climática a partir de la medida de la curva I-V en oscuridad.

La metodología ha sido aplicada en los ensayos acelerados en temperatura de esta tesis mediante una instrumentación y circuito de ensayos específicamente desarrollados para este propósito y que han sido descritos en el capítulo 5.

El desarrollo de la instrumentación empleada para los ensayos acelerados fue un proceso prolongado y planteado desde el origen para satisfacer los requisitos de la metodología para las células solares III-V de área pequeña y muy alta concentración. En el capítulo 5 de la tesis se han descrito los resultados del desarrollo a más alto nivel, el diagrama de bloques del sistema de instrumentación y la interfaz de programación. Además se han evaluado las incertidumbres de las medidas de potencia relativa de las células durante los ensayos y se han realizado una serie de consideraciones prácticas de las condiciones y parámetros de medida para reproducir la calidad de las medidas realizadas.

Se ha medido la temperatura de la unión en las células durante los ensayos dentro de la cámara climática observando incrementos de temperaturas debido a la inyección de corriente menores a 4 °C, y diferencias de temperatura entre los diferentes niveles de corriente inferiores a 1 °C. Por esta razón, se concluyó que las diferencias de degradación entre las células a diferente inyección de corriente en un mismo ensayo eran debidas a la inyección de corriente y no al incremento de temperatura. Las temperaturas medidas en las células fueron contrastadas con las temperaturas evaluadas a partir de la herramienta de simulación térmica de elementos finitos 3D LISA[®] obteniendo una correlación de valores adecuada. Esta herramienta se ha utilizado posteriormente para evaluar cuál es el mejor diseño de circuito de ensayos acelerados para células III-V de área grande (capítulo 7).

Entre las aportaciones del capítulo 5 se pueden destacar el desarrollo de procedimientos innovadores de ensayos acelerados y la instrumentación para realizar los ensayos de forma automática que ha funcionado con una precisión muy elevada y de forma fiable durante 10000 horas de ensayos acelerados.

8.1.3. Análisis de los resultados y evaluación de la fiabilidad y garantía de células de concentración III-V

En el capítulo 6 se abordan tanto los detalles relevantes del proceso de realización de ensayos como los resultados de los ensayos. Previamente a la realización de los ensayos es necesario realizar una cuidadosa planificación de los ensayos y medidas a realizar, Figura 6.3. Dentro de la planificación de los ensayos se incluyó un ensayo de cribado para identificar células solares con posibles defectos infantiles importantes. Como resultado de los ensayos se obtuvieron la evolución de la potencia relativa de cada una de las células y la evolución de la potencia relativa media de las células en cada condición de ensayo.

Las principales aportaciones del capítulo 6 se producen tras el análisis para cada ensayo de la pérdida de potencia relativa de las células en las mismas condiciones de trabajo (concentración). Estas son:

- A partir de los resultados de la potencia relativa media de los ensayos a diferentes temperaturas se ha contrastado que siguen el modelo de Arrhenius con una Energía de Activación de 1,02 eV. Con este modelo y el valor obtenido se pueden obtener los factores de aceleración entre las diferentes temperaturas de ensayo y la temperatura nominal de trabajo de la célula. Este dato es el núcleo del análisis de resultados, ya que a partir de él es posible extrapolar la curva de degradación de los ensayos acelerados a condiciones reales de funcionamiento, y a partir de ésta evaluar la fiabilidad y el resto de parámetros, incluidos periodos de garantía para un determinado nivel aceptable de fallos. Que conozcamos, es la primera vez que se consigue contrastar y cuantificar (Figura 6.6 y Figura 6.7) el modelo de Arrhenius con su Energía de Activación y el factor de aceleración respecto a la temperatura nominal de trabajo para una célula III-V de concentración.
- Se ha obtenido la degradación de la célula extrapolada a condiciones nominales de funcionamiento a diferentes valores de temperatura nominal de la célula, Figura 6.10 a concentración 700X y figura 6.11 a concentración 1050X. En estos resultados ya se han considerado de

forma independiente las condiciones temporales de trabajo y reposo de la célula III-V trabajando en campo.

- Así como se ha obtenido que los resultados de degradación a diferentes temperaturas cumplen con un modelo de aceleración tipo Arrhenius, en el análisis de la influencia de la concentración se ha observado que el factor de aceleración en tiempo entre la degradación relativa de las células a 150 °C, en las dos condiciones de ensayo (700X y 1050X, Figura 6.12), no es constante a lo largo del ensayo. Al no haber un factor de aceleración constante a lo largo del ensayo no es posible extrapolar los resultados de degradación en tiempo a niveles de concentración no ensayados. Es por ello, que el análisis de fiabilidad se realizará de forma independiente a las dos concentraciones ensayadas 700X y 1050X, teniendo en consideración los resultados a 0X para evaluar la degradación durante el periodo de reposo u oscuridad de la célula.
- El mecanismo de degradación de las células fue evaluado a partir de la evolución de las curvas I-V en oscuridad mediante una herramienta de modelado de células III-V de concentración en 3D desarrollada en el IES-UPM. El análisis ha evidenciado que no se han producido cambios morfológicos en la célula y que el único parámetro que evoluciona durante los ensayos es la corriente de recombinación en el perímetro que aumenta en un factor 4. Esto podría justificar que en los ensayos a mayor densidad de corriente (1050X) se producen más defectos en el perímetro y de forma más acelerada que los producidos en la condición a menor densidad de corriente (700X).

Una vez analizado la influencia de la temperatura y la concentración en la evolución de la potencia de las células solares se ha realizado un análisis de fiabilidad. Debido a que no se han evidenciado fallos abruptos durante los ensayos, pero sí una paulatina degradación de la potencia se ha realizado un análisis de fiabilidad basado en la degradación de las células solares evaluadas en los ensayos (Figura 6.16). Al no existir una norma que defina el nivel de fallo por degradación de potencia en este tipo de células, ha sido necesario definir un Límite de Fallo para realizar la cuantificación de la fiabilidad. Aunque el análisis de fiabilidad se ha realizado para diferentes Límites de Fallo se ha seleccionado un valor de 2,5% de pérdida de potencia generada en la célula

como referencia del Límite de Fallo. A partir de del Límite de fallo se ha realizado un procedimiento matemático de obtención de la probabilidad de funcionamiento de las células extrapolando a condiciones nominales de trabajo los resultados de los ensayos: degradación media y dispersión de la degradación de las células.

Dado que la fiabilidad depende del Límite de Fallo elegido y de la temperatura de trabajo de la célula se ha analizado su influencia en las funciones y parámetros relacionados con la fiabilidad y garantía. Las conclusiones más importantes de este análisis son las siguientes:

- Se ha evaluado la fiabilidad de las células a diferentes niveles de Límite de Fallo, Figura 6.17 a concentración 700X y figura 6.18 a concentración 1050X.
- El factor que más influye en la fiabilidad es la temperatura de la célula durante el ensayo. En segundo orden y con mucha menor importancia el nivel de concentración.
- Se han comparado los valores de *MTTF* calculados y los tiempos de garantía que se pueden ofertar en función de las condiciones de trabajo y de la proporción de fallos aceptables durante la garantía, Tabla 6.6.
- Si la célula trabaja a las condiciones nominales de temperatura, 65 °C, no hay ningún problema en ofrecer la garantía ofertada en sistemas fotovoltaicos (30 años) a las concentración ensayadas, 700X y 1050X. De hecho la garantía podría supera ampliamente este periodo, Tabla 6.6.
- Para temperaturas de trabajo de la célula solar de 95 °C o superiores no es posible ofertar garantías de 30 años en ninguna de las dos concentraciones ensayadas, 700X y 1050X, Tabla 6.6.
- Para temperaturas de trabajo intermedias es necesario realizar un análisis detallado de la fiabilidad en función de la temperatura y concentración.

De estas conclusiones cabe destacar la gran importancia de realizar un cuidadoso diseño térmico del sistema que limite el incremento de temperatura en la célula cuando ésta trabaje en concentración.

8.1.4. Generalización de los ensayos acelerados

En el capítulo 7 se han analizado las modificaciones que son necesarias para que la metodología y el sistema de instrumentación propuestos en esta tesis para células III-V de 1 mm^2 y muy alta concentración, puedan ser utilizadas en células de tamaños mayores, 30 mm^2 a 100 mm^2 .

En este trabajo se plantea la generalización de los ensayos a células III-V de tamaño mayor desde tres perspectivas de trabajo:

- Desde un punto de vista de metodología las implicaciones que tiene exportar nuestra experiencia a células multiunión de mayor tamaño son debidas a la presencia en las células multiunión de varias uniones en serie en la estructura de la célula, lo que implica una mayor complejidad para el análisis de fallos a partir de la curva I-V en oscuridad y en el cálculo de la corriente equivalente para emular las condiciones de trabajo.
- Desde el punto de vista del sistema de instrumentación que se ha desarrollado, éste se tiene que volver a diseñar y desarrollar debido fundamentalmente a que el aumento de área de los buses metálicos conectados al circuito mediante cintas metálicas (ribbon-bonding) ocupan una relación de áreas mucho mayor, lo que implica un factor de multiplicación importante en la corriente inyectada en directa para la emulación. Esto tiene implicaciones en todo el sistema de instrumentación tanto en la medida de caracterización de la célula, como en la gestión de la inyección de corriente y en la conmutación de las células a medir.
- Desde un punto de vista térmico de la célula durante el ensayo, el uso de corrientes mucho mayores afecta a la temperatura de la célula de forma muy importante. Se ha realizado el análisis térmico de varios diseños de circuito de ensayos aplicado a este tipo de células con el objetivo de identificar las configuraciones que suponen un menor incremento de temperatura de las células. Las simulaciones de los circuitos se han realizado con la herramienta de elementos finitos LISA[®]. El resultado de este análisis es que lo más conveniente desde un punto de vista térmico es emplear circuitos individuales para las células, en sustratos que

conduzcan bien el calor y soporten altas temperaturas, preferiblemente el DBC (Direct Bonded Copper) con un disipador adicional adherido al sustrato del circuito, Tabla 7.6 y Figuras 7.6 y 7.9. Además, al realizar el análisis de fiabilidad hay que considerar como temperatura de ensayo acelerado la temperatura de la célula durante el ensayo acelerado, y adaptar la programación de la cámara para obtener las temperaturas de ensayo planificadas.

En definitiva la generalización de la metodología e instrumentación no sólo es posible, sino que de hecho el Grupo de Semiconductores III-V del IES-UPM ya ha desarrollado el sistema de instrumentación para comenzar en breve los ensayos sobre células III-V de área grande.

8.2. Trabajos futuros

El área de la fiabilidad de células solares de concentración III-V y de los Sistemas Fotovoltaicos de Concentración sigue siendo un área de investigación poco explorada, por tanto aún después de haber obtenido resultados de fiabilidad de células solares de concentración III-V mediante ensayos de vida acelerada, queda mucho y un complejo camino por recorrer. Además se podría ampliar el ángulo de visión y tras analizar la fiabilidad y la garantía del tipo de células III-V ensayadas, debemos pasar a abordar la fiabilidad y aseguramiento de la calidad del SFC en su conjunto.

Respecto a las áreas de investigación que el doctorando prevé relevantes, y con posibilidades de abordar dentro del Grupo de Investigación a corto o medio plazo se encuentran:

- ***Ensayos de vida acelerada en temperatura u otros tipos de estrés de células multiunión III-V, y en concreto las de área grande.*** La problemática de fiabilidad en células solares multiunión es mayor debido a la mayor complejidad de la célula respecto a la célula ensayada de GaAs. Además, las células de tamaño grande necesitan un cuidadoso análisis térmico para limitar las temperaturas de las células. Estas actividades se encuentran actualmente en marcha y ya se ha realizado en esta tesis un

análisis preliminar de este tipo de ensayos, capítulo 7. El análisis térmico mediante elementos finitos, junto con la medida de temperatura real en la unión de la célula, y en diversos elementos del receptor en función de diferentes condiciones ambientales de funcionamiento también pueden ser una línea de investigación fructífera.

- **Desarrollo de nuevas metodologías de ensayos de vida acelerada.** Dado que tanto las condiciones de trabajo como la caracterización de las células en la metodología propuesta no son exactamente equiparables a las condiciones en campo de las células solares III-V, es necesario plantear nuevas y mejores metodologías. La imposibilidad de esperar los 30 años del periodo de garantía para comprobar que los modos de fallos que aparecen en las células durante los ensayos acelerados son los mismos que en condiciones reales, hace necesario plantearse nuevas metodologías de ensayos acelerados que permitan conseguir iluminar en condiciones nominales las células solares dentro de la cámara climática. Sin embargo, la complejidad y el alto coste de introducir iluminación con alta concentración dentro de una cámara climática puede hacer que la metodología propuesta en los ensayos de esta tesis, a pesar de sus limitaciones, sea ampliamente utilizada por los fabricantes de células solares.
- **Realizar ensayos acelerados en receptores para conseguir evaluar la fiabilidad de la estructura real del encapsulado de la célula y la célula.** El principal problema es la limitación de la temperatura de los ensayos debido a que los diferentes elementos del receptor no aguantan altas temperaturas. Esta limitación de la temperatura reduce la aceleración de los ensayos y por lo tanto alargan su duración. Según cada tipo de receptor, célula y sus condiciones de funcionamiento podría ser más eficiente realizar por una parte ensayos específicos para evaluar la fiabilidad del receptor sin considerar la célula, y por otro la fiabilidad de la célula.
- Finalmente un objetivo que supondría abordar otras áreas tecnológicas sería evaluar y asegurar no solo **la fiabilidad de** las células solares sino **la de todo el sistema fotovoltaico de concentración**. Para ello sería necesario realizar un análisis de fiabilidad prediccional del SFC en su conjunto, mediante la predicción de la fiabilidad y el análisis de cada

subbloque del sistema, y finalmente su integración y análisis en un diagrama de bloques. Para el análisis predictivo de fiabilidad es necesario disponer de bases de datos con información previa de fiabilidad de los elementos empleados en el SFC, más la aportación mediante ensayos de vida acelerada (ALT) de la información de fiabilidad de los nuevos elementos desarrollados que no tienen histórico previo, como era el caso de las células solares III-V de alta concentración para aplicaciones terrestres.

En definitiva dentro de los trabajos futuros se plantea la continuidad de la investigación en fiabilidad de células solares de alta concentración III-V y la introducción paulatina en la investigación de la fiabilidad de los Sistemas Fotovoltaicos de Concentración.

Anexo I

DESCRIPCIÓN DE LA CÉLULA SOLAR

La célula solar de alta concentración y semiconductores III-V utilizada en estos trabajos ha sido fabricada en estructuras semiconductoras crecidas con un reactor de Epitaxia en Fase Vapor mediante Precursores Metalorgánicos (Metal-Organic Vapor Phase Epitaxy (MOVPE)). Los dispositivos se han fabricado íntegramente en el Instituto de Energía Solar IES-UPM, utilizando técnicas optoelectrónicas para obtener una célula solar de GaAs de área pequeña 1 mm^2 .

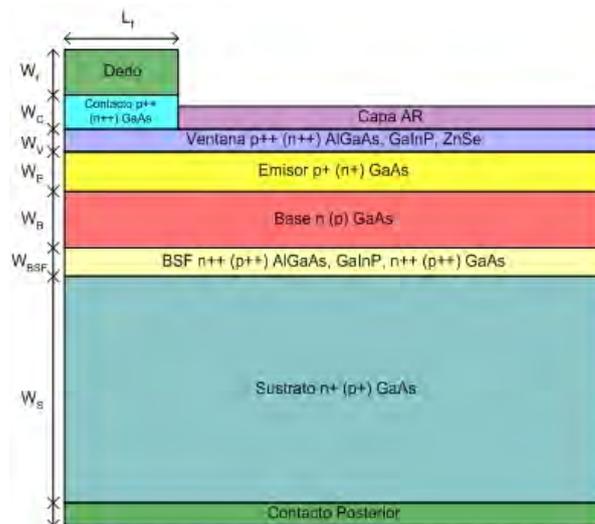


Figura A_I-1: Estructura típica de célula de GaAs. Tomado de [VNM+05)

La Figura A_I-1, muestra la estructura típica de una célula de GaAs con las dos configuraciones que admite en función de su polaridad: p sobre n y n sobre p (entre paréntesis). Básicamente, el dispositivo es una unión p-n de GaAs, pasivada con una capa de GaInP. Por arriba, un contacto metálico en forma de rejilla cubre parcialmente la superficie para permitir el paso de la radiación luminosa. Por abajo, el contacto metálico cubre la totalidad de la superficie.

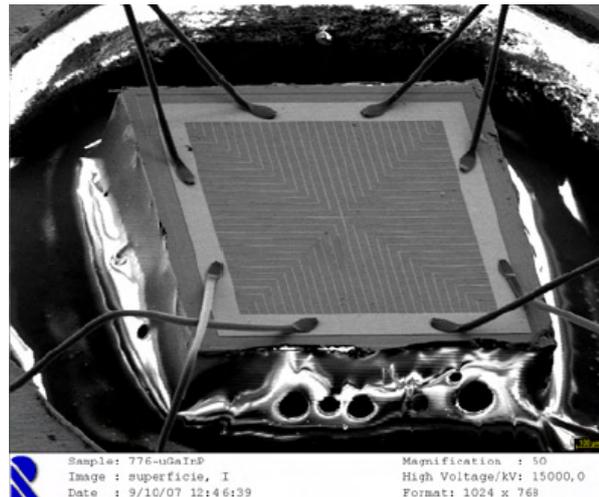


Figura A_I-2: Fotografía de una célula del IES-UPM de 1 mm².

En la Figura A_I-2 se observa la célula soldada sobre un sustrato y conectada con ocho hilos de conexionado (“wire bonding”). Una referencia más amplia sobre similar estructura puede encontrarse en el capítulo 9 de la tesis de Ignacio Rey-Stolle [RSA01], y en el trabajo [AOR-SD+01].

A continuación se describe brevemente la función de cada una de las capas:

- **Capa ventana:** el GaAs presenta una superficie con una densidad elevada de defectos y enlaces insatisfechos, lo que se traduce en una elevada velocidad de recombinación superficial, que deteriora enormemente las prestaciones del dispositivo. Para solucionar esta situación, se introduce la capa ventana, que pasiva la superficie de la unión mediante la continuación de la red cristalina con un material que acopla en red y que apenas absorbe luz. En la gran mayoría de nuestras células la capa ventana es de GaInP.
- **Capa Antirreflectante (CAR):** debido a la diferencia de índices de refracción entre el medio exterior a la célula y el material semiconductor (GaAs) se producen pérdidas por reflexión en la superficie. La capa antirreflectante minimiza las pérdidas por reflexión acoplando los índices de refracción del medio y el semiconductor. Los materiales que se usan son ZnS, MgF₂, etc.
- **Capa de contacto y sustrato:** el contacto metal-semiconductor ofrece una cierta resistencia específica dependiendo del dopaje de la capa. La misión de estas

regiones es ofrecer una intercara adecuada para la formación de contactos metal-semiconductor con la mínima resistencia específica.

- **BSF y ventana:** las capas que forman la unión tienen propiedades de transporte limitadas y en ellas se producen mecanismos de recombinación no radiativos. Estas capas actúan como espejo de portadores minoritarios mediante la formación de barreras para su propagación, a la vez que actúan como sumideros de mayoritarios.

Los espesores y dopajes de la unión cambian en función del tipo de polaridad que se elija, n sobre p o p sobre n. Esto se debe a que la longitud de difusión de electrones en GaAs tipo p es de 2 a 10 veces superior a la de huecos en GaAs tipo n, para el mismo valor del dopaje. Así mismo, la movilidad de electrones en GaAs puede ser de 10 a 20 veces mayor que la de huecos.

A la vista de las propiedades descritas anteriormente, se puede ver que la célula funciona de manera óptima si se fuerza a que la fotogeneración sea mayoritariamente en la zona p, y se impone que las zonas sensibles a pérdidas resistivas sean de material tipo n. Es decir, una configuración n sobre p, con un emisor muy delgado ofrece mayores ventajas.

El espesor de las capas activas de la célula ($W_E + W_B$) suele estar en torno a las 4-4,5 micras, ya que esta es la profundidad de GaAs necesaria para absorber el 95% de la luz incidente. Otros espesores típicos en la célula son: El espesor de la capa ventana entre 15 y 25 nm; el de la capa de contacto 0,5 micras; la BSF 200-300 nm, la capa antirreflectante 150 nm y los dedos de metalización entre 1 y 0,5 micras.

Como características principales de las células solares de GaAs que se desarrollan en nuestros laboratorios se pueden destacar:

- Densidad de corriente en circuito abierto (J_{SC}): aproximadamente de 25 mA/cm² para concentraciones de 1 sol.
- Tensión de circuito abierto (V_{OC}): en torno a 1,2 V, a 1000 soles.
- Área activa del dispositivo: 1 mm².
- Eficiencia a 1000 soles: 25-26% aproximadamente.
- Potencia máxima a 1000 soles: en torno a 250 mW.

REFERENCIAS

Referencias en orden alfabético

- [Aa05] K. Araki, H. Uozumi, T. Egami, M. Hiramatsu, Y. Miyazaki, Y. Kemmoku, A. Akisawa, N. J. Ekins-Daukes, H. S. Lee, "Development of Concentrator Modules with Dome-shaped Fresnel lenses and Triple-junction Concentrator Cells", *Progress in Photovoltaics: Research and Applications* 13(6), 513-527 (2005).
- [AD97] C. Algora y V. Díaz, "Guidance for reducing PV costs using very high concentrator GaAs solar cells", Proc. of *14th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, pp. 1724-1727 (Barcelona, Spain) 1997
- [ADM98] C. Algora, V. Díaz, J. C. Miñano y A. Luque, "Cost reduction in concentrator GaAs solar cells based PV plants: going from photovoltaics to optoelectronic processing", Proc. of *2nd World Conference on PV Solar Energy Conversion*, pp. 2225- 2228 (Vienna, Austria) 1998
- [AG00] Adlerstein Michael G, Gering Joseph M. "Current induced degradation in GaAs HBT's". *IEEE Trans Electron Dev* 2000;47:434–9W.
- [AGR97] Andreev V.M., Grilikhes V.A., Romyantev V.D., "Photovoltaic Conversion of Concentrated Sunlight" 1st ed.; Wiley, NY, USA, 1997.
- [AKUK+04] K. Araki, M. Kondo, H. Uomizi, Y. Kemmoku, T. Egami, M. Hiramatsu, Y. Miyazaki, N. J. Ekins-Daukes, M. Yamaguchi, G. Siefert, and A. W. Bett. "A 28% efficient, 440x and 200 Wp concentrator module". In *19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2004.
- [Algora02] C. Algora. Universidad Politécnica de Madrid. "High efficiency photovoltaic converter for high light intensities manufactured with optoelectronic technology". European Patent EP1278248A1 and United States Patent US2002/0170592A1.
- [Algora07] Algora C. Very high concentration challenges of III–V multijunction solar cells. in: Luque A, Andreev V, editors. Chapter 5 of the book "Concentrator Photovoltaics". Heidelberg, Germany: *Springer*, 2007, ISBN 978-3-540-68796-2.

- [Algora10] Algora C, "Reliability of III-V concentrator solar cells". *Microelectronics Reliability* 2010; 9-11; pp1193-98.
- [Amonix] En la página web: <http://www.amonix.com>.
- [Anton04] I. Antón "Métodos y Equipos para la caracterización de Sistemas Fotovoltaicos de Concentración". Universidad Politécnica de Madrid, Tesis Doctoral, 2004.
- [AOR-SD+01] C. Algora, E. Ortiz, I. Rey-Stolle, V. Díaz, R. Peña, V. M. Andreev, Vladimir, P. Khvostikov, and V. D. Rumyantsev, "A GaAs Solar Cell with an Efficiency of 26.2% at 1000 Suns and 25.0% at 2000 Suns". *IEEE Transactions on Electron Devices*, vol. 48, no. 5, may 2001
- [Araki05] K. Araki. "Development of a new 550X concentrator module with 3J cells-performance and reliability" *Proceeding 31rd IEEE Photovoltaic Specialist Conference* (2005).
- [ArimaE] En la página web: <http://www.arimaeco.com/>.
- [Arrhe1889] Arrhenius S, "On the Reaction Velocity of the Inversion of Cane Sugar by Acids" *Zeitschrift für Physikalische Chemie* 4, 226- (1889), traducido al inglés en. *Selected Readings in Chemical Kinetics*, edited by M. H. Back and K. J. Laidler, Oxford: Pergamon, NY, 1967, pp. 31–35.
- [ARSG+05] C. Algora, I. Rey-Stolle, B. Galiana, J. R. González, M. Baudrit y I. García, "III-V. Concentrator solar cells as LEDs", *Proc. of 20th European Photovoltaic Solar Energy. Conference*, (Barcelona, Spain) 2005
- [ARSGG+08] C. Algora, I. Rey-Stolle, I. García, B. Galiana, P. Espinet, M. Baudrit and E. Barrigon, "A dual junction solar cell with an efficiency of 32.6% at 1000 suns and 31.0% at 3000 suns", *5th Intern. Conf. for the Generation of Electricity*, Palm Desert, Nov. 2008.
- [ARSGG06] C. Algora, I. Rey-Stolle, B. Galiana, J. R. González, M. Baudrit and I. García. "Strategic options for a LED-like approach in III-V concentrator photovoltaics". In: *Proceedings of the 2006 IEEE 4th World Conference Photovoltaic Energy Conversion*, Hawaii (USA); 2006. p. 741–4.

-
- [ASHK+03] Antón I, Sala G, Heasman K, Kern R, Bruton TM. "Performance prediction of concentrator solar cells and modules from dark I–V characteristics". *Prog Photovolt: Res Appl* 2003; 11:165–78.
- [ASS09] E.S. Aronova, M.Z. Shvarts, A.A. Soluyanov. "The effect of temperature on the efficiency of concentrator PVModules with MJ-SC", *Proceedings 34th IEEE PVSC*, 2009.
- [AUEH+05] K. Araki, H. Uozumi, T. Egami, M. Hiramatsu, Y. Miyazaki, y otros. "Development of concentrator modules with dome-shaped fresnel lenses and triple-junction concentrator cells" *Progress In Photovoltaics* (2005) 13, 6, 513-527.
- [AVNM05] R. Alvarez, M. Vázquez, N. Núñez, F. Montalvo. "Plan de ensayos acelerados de fiabilidad para el nuevo producto: Célula solar fotovoltaica" Memoria interna IES-UPM. Febrero 2005.
- [AYKU03] Araki K, Yamaguchi M, Kondo M, and Uozumi H, "Which is the best number of junctions for solar cells under ever-changing terrestrial spectrum?" *3rd World Conference on PV Energy Conversion*, 2003, p. 307.
- [BK11] N. Bosco, S. Kurtz. "Modeling Thermal Fatigue in CPV Cell Assemblies" *PVMRW 2011*.
- [Bos10] Nick Bosco. "Reliability concerns associated with PV technologies". National Renewable Energy Laboratory. Informe. Abril 2010. http://www.nrel.gov/pv/performance_reliability/pdfs/failure_references.pdf
- [Botten08] W.R. Bottenberg. "Technical requirements for CPV performance standards. PVSC": 2008 *33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2008. 1-4.
- [BP78] EL Burgess, DA Pritchard, "Performance of a one kilowatt concentrator array utilizing active cooling". *Proc. 13th IEEE Photovoltaic Specialists Conf.* (New York) 1978, pp 1121–1124
- [BPL08] M. Bürmen , F. Pernuš and B. Likar 2008 "LED light sources: a survey of quality-affecting factors and methods for their assessment" *Meas. Sci. Technol.* 19 122002.

- [BSK09] N. Bosco, C. Sweet, S. Kurtz. "Reliability testing the die-attach of CPV cell assemblies," *34th IEEE PVSC*, (2009).
- [BSSK10] N. Bosco, C. Sweet, A Stokes, S. Kurtz. "Thermal and current cycling for CPV qualification". *PVMRW 2010*.
- [CBBJ+08] M Cao, S. Butler, J.T. Benoit, Y. Jiang et al. "Thermal stress analysis/life prediction of concentrating photovoltaic module," *Journal of Solar Energy Engineering-Transactions of the ASME* 130(2), 9 (2008).
- [CEI616163-2] Norma CEI 616163-2:1998. "Reliability stress screening - Part 2: Electronic components"
- [CFP54] Chapin, D. M., Fuller, C. S. and Pearson, G. L. "A New Silicon p-n Junction Photocell for Converting Solar Radiation into Electrical Power," *Journal of Applied Physics* Vol. 25 (May 1954) pp. 676–77.
- [CG86] Campbell P., Green M.A., "The limiting efficiency of silicon solar-cells under concentrated sunlight". *IEEE Trans. Electron Devices* 1986, 33, 234-239.
- [CGL00] P. R. N. Childs, J. R. Greenwood, C. A. Long. "Review of temperature measurement" *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 71, 2959-2978 (2000)
- [Concentrix] En la página web: www.concentrixsolar.de
- [CS06] H. Cotal, R. Sherif, "Temperature dependence of the IV parameters from triple junction GaInP/InGaAs/Ge concentrator solar cells", *Fourth IEEE WCPEC*, 2006, pp. 845-848.
- [Daido] En la página web: www.daido.co.jp
- [DAS08] C. Domínguez, I. Antón, G. Sala "Solar Simulator for concentrador photovoltaic systems. *Opt Express* 2008; 16(19).
- [DAS08] Dominguez C, Anton I, Sala G. "Solar simulator for indoor characterization of large area high-concentration PV modules". *PVSC: 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. 2008. 1575-1579.

-
- [Davi10] M. Davis. "Electrical, Mechanical, and Thermal Modeling". *Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW)*. Golden, Colorado-USA. February 18–19, 2010.
- [DM84] A.M. Diego, J.M. Merino. "Carácter general de la ley de Ahrrenius", *Enseñanza de las ciencias: revista de investigación y experiencias didácticas*, ISSN 0212-4521, Vol. 2, Nº 1, 1984, págs. 29-32
- [EAGN+10] P. Espinet, C. Algora, J.R. González, N. Núñez, M. Vázquez. "Degradation mechanism analysis in temperature stress tests on III–V ultra-high concentrator solar cells using a 3D distributed model". *Microelectron Reliab* 2010.;50;1875-79.
- [EGRS+10] Espinet P, García I, Rey-Stolle I, Algora C, Baudrit M. "Distributed Simulation of Real Tunnel Junction Effects in Multi-Junction Solar Cells" *Proceedings of the International Conference on Concentrating Photovoltaic CPV6*, Freiburg (Germany); 2010.
- [EII04] G. N. Ellison. "Thermal computations for electronic equipment". Ed. Von Nostrand Reinhold Company, NY, USA, 1984; Chapter 2.
- [EM06] L.A. Escobar, W.Q. Meeker. "A Review of Accelerated Test Models." *Statistical Science* 21, 552-577 (2006), doi:10.1214/088342306000000321
- [Emcore] En la página web: <http://www.emcore.com>
- [Emcore10] Emcore. "Failure model of CPV modules an how to test for them". 19-feb-2010. http://www1.eere.energy.gov/solar/pdfs/pvrw2010_aeby.pdf *PVRMW* 2010.
- [Emcore10a] Emcore. "CPV solar cell qualification technical specification". 10-april-2010
- [Emcore11] Emcore. "CPV Solar Cell Qualification Standar" *PVMRW* 2011.
- [Emer10] K. Emery (NREL) – Monitoring system Performance - Instrumentation and Methodologies for Outdoor Performance Testing. Reliability Modeling for Photovoltaic Modules. *PVMRW* 2010.

- [Emery03] Emery, K. "Measurement and Characterization of Solar cells and modules". In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 1st ed.; Luque, A., Hegedus, S., Eds.; Wiley: NY, USA, 2003; Chapter 16, pp 701-752.
- [EntechS] En la página web: www.entechsolar.com
- [FLBN+10] Foresi, J.S.; Lei Yang; Blumenfeld, P.; Nagyvary, J.; Flynn, G.; Aiken, D.; "EMCORE receivers for CPV system development". *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 20-25 June 2010 35th IEEE.
- [FMGM+10] B. Furman, E. Menard, A Gray, M. Meiti, y otros. "A high concentration photovoltaic module utilizing micro-transfer printing and surface mount technology". *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2010 35th IEEE
- [Fraunhof] Fraunhofer ISE (Fraunhofer-Institut für Solare Energie systeme), En la página web <http://www.ise.fraunhofer.de/> .
- [Fren11] R.H. French "Low concentration photovoltaics: reliability and durability issues". *Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW)*. Golden, Colorado-USA. February 16-17, 2011.
- [Fried07] D. Friedman "National Solar Technology Roadmap: Concentrator PV" Management Report NREL/MP-520-41735 June 2007.
- [Fried10] D. Friedman "Concentration photovoltaic", Solar Energy Technologies Program Peer Review". National Renewable Energy Laboratory. Mayo 26_2010.
- [GA06] G. Sala, I. Anton,. "Photovoltaic concentrator systems facing problems of Commercialization". *Proc. 4th WCPEC*, (2006), 609
- [GARS06] Galiana B, Algora C, Rey-Stolle I. "Comparison of 1D and 3-D analysis of the front contact influence on GaAs concentrator solar cell performance". *Solar Energy Mater Solar Cells* 2006;90(12):2589–604.
- [GARS08] Galiana B, Algora C, Rey-Stolle I. "Explanation for the dark I–V curve of the III–V concentrator solar cells". *Prog Photovolt: Res Appl* 2008;16:331–8.
- [GARSAVN+06] J. R. González, C. Algora, I. Rey-Stolle, R. Álvarez, M. Vázquez, N., F. Montalvo, J. Barbero, E. Cordero, E. Galiana y V. Díaz, "Strategy for

- Certified Reliability Analysis for III-V High Concentration Solar Cells”. En: *IEEE World Conference on Photovoltaics Energy Conversion (WCPEC-4)*, Hawai, USA, 7-12 Mayo 2006..
- [GARSG05] Galiana B, Algora C, Rey-Stolle I, García I. “A 3-D model for concentrator solar cells based on distributed circuit units”. *IEEE Trans Electron Dev* 2005;52(12):2552–8.
- [GARSV+07] J. R. González, C. Algora, I. Rey-Stolle, M. Vázquez, N. Núñez, J. Barbero and V. Díaz. “III-V High Concentration Solar Cells: Assessing the reliability of a new product”. *4th Internacional Conference on Solar Concentrators for the generation of Electricity or Hydrogen (ICSC-4)*. El Escorial (España). Mar 2007.
- [GAVN+08] J. R. González, C. Algora, M. Vázquez, N. Núñez, and I. Rey-Stolle. “Strategy for Assessing the Reliability of III-V Concentrator Solar Cells: Working Plan Review and First Results”. *International Conference on Solar Concentrators for The Generation of Electricity (ICSC-5)*. 2008.
- [GEHW11] M.A. Green, K. Emery, Y. Hishikawa, W. Warta. “Solar cell efficiency tables” (version 37). *Prog. Photovolt: res. Appl*, 2011; 19; 84-92.
- [GM10] A. García Sánchez, M Martínez Millas,. “Análisis térmico y de fiabilidad de los sistemas de concentración fotovoltaica” Proyecto Fin de Carrera. E.U. Ingeniería técnica de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid Noviembre 2010.
- [Gon08] J.R. González “Fiabilidad de células solares de concentración de semiconductores III-V”, Universidad Politécnica de Madrid”. Tesis Doctoral 2008.
- [GRSA04] González JR, Rey-Stolle I, Algora C. “Degradation mechanisms and reliability testing of high concentrator III–V solar cells. Lessons learned from optoelectronics”. In: *Proceedings of the 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*; 2004. p. 3618–21.0.
- [GRSA05] J.R. González, I. Rey-Stolle, C. Algora. “Microplasma Breakdown in High-Concentration III–V Solar Cells” *IEEE Electron Device Letters*, VOL. 26, NO. 12, December 2005

- [GTCL09] E. Green, S. Taylor, S. Cowley, X Luo. "Correlation between collimated Flash Test and In-sun Measurements of High Concentration Photovoltaic Modules". *SPIE Optics and Photonics* 2009.
- [GUASFO] En la página web. <http://www.guascorfoton.com/>
- [GVAN09] J. R. González, M. Vázquez, C. Algora and N. Núñez. "A New Model to Assess the Reliability of CPV Modules in Real Time Outdoor Tests". 34th *IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Philadelphia, PA, USA. Jun 2009.
- [GVAN11] González JR, Vázquez M, Algora C, Núñez N. "Real-time reliability test for a CPV module based on a power degradation model". *Prog Photovolt: Res Appl* 2011;19(1),pp 113-122.
- [GVNA+09] Gonzalez JR, Vázquez M, Nunez N, Algora C, Rey-Stolle I, Galiana B. "Reliability analysis of temperature step-stress tests on III-V high concentrator solar cells". *Microelectron Reliab* 2009;49:673–80.
- [GVNA+10] J. R. González, M. Vázquez, N. Núñez, C. Algora and P. Espinet. "Reliability Improvement in III-V Concentrator Solar Cells by Means of Perimeter Protection". *International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems. (CPV-6)*. Freiburg, Germany. Apr 2010.
- [HFCR10] P. Hebert, J. Frost, R. Cravens, R. Woo, Spectrolab-Boeing "What not to do" *PVMRW* 2011.
- [HP-I-004] "Reliability of Precision optical Performance AlInGaP LED Lamps in Traffic Signals and Variable Message Signs". Application Brief I-004 Hewlett Packard.
- [HR78] Hoffman AR, Ross RG. "Environmental qualification testing of terrestrial solar cell modules". *Proceedings of the 13th IEEE PV Specialists Conference*, Washington, DC, USA, 1978; 835–842.
- [HTCW+09] Huang, M.C.Y. ; Tzeng, A.Y.C. ; Chin-Wei Hsu ; Lee, R. ; Teng-Chun Wu ; Jiang, J.."CPV module Qualification and IEC 62108 experiences at Arima EcoEnergy". *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009 34th IEEE

-
- [IDEA-UJ] Grupo de investigación IDEA (Grupo de Investigación y Desarrollo en Energía Solar y Automática) de la Universidad de Jaén. En la página web <http://www.ujaen.es/investiga/solar/> .
- [IEC61215] IEC 61215: “Crystalline silicon terrestrial photovoltaic (PV) modules – Design qualification and type approval”. International Standard, International Electrotechnical Commission (IEC)
- [IEC62108] IEC 62108: “Concentrator photovoltaic (CPV) modules and assemblies - Design qualification and type approval”. International Standard, International Electrotechnical Commission (IEC)
- [IES11] Instituto de Energía Solar – Universidad Politécnica de Madrid. “Nuestros objetivos”. <http://www.ies.upm.es/menui/el-instituto-de-energia-solar/nuestros-objetivos.html> .
- [IES-UPM] Instituto de Energía Solar – Universidad Politécnica de Madrid. <http://www.ies.upm.es/>.
- [Ile01] P.A. Iles. “Evolution of space solar cells”. *Solar Energy Materials & Solar Cells*. 2001, 68, pp 1-13.W.
- [Ioffe] Ioffe Physico-Technical Institute, Rusia. En la página http://www.ioffe.rssi.ru/index_en.html .
- [ISFOC] En la página web <http://www.isfoc.es/>
- [Isofoton] En la página web: www.isofoton.com
- [JF04] F.J. Jimenez, J. De Frutos. “Non contact inspection laser system for characterization of piezoelectric samples”. *Review. of Scientific Instruments*, Vol 75, 4497-4504. (2004)
- [JM95] R. Jiang y D. N. P. Murthy. “Reliability modeling involving two Weibull distributions”. *Reliability Engineering and System Safety* 47 (1995) pp.187-198
- [KBH10] S. Kurtz, A. Bett, N. Hartsoch. “Technology Overview”. In *Solar Power International* 2010. NREL/PR-5200-49713

- [KGQ09] S. Kurtz, J. Granata, M. Quintana. "Photovoltaic-Reliability R&D Toward a Solar-Powered World". NREL. Conference Paper. NREL/CP-520-44886. August 2009.
- [KK+11] Kurtz, S.R., Kazmerski L.L, otros. "Best Research-Cell Efficiencies" 3 Nov 2011. gráfica disponible en [http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff\(rev111103\).jpg](http://en.wikipedia.org/wiki/File:PVeff(rev111103).jpg)
- [KSBG10] G.S. Kinsey, K. Stone, J. Brown, V. Garboushian. "Energy prediction of amonix CPV solar power plants". *25th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Valencia, Spain, 2010. Progress in Photovoltaics: Research and Applications, n/a. doi: 10.1002/pip.1037
- [KSVRA11] S. Kurtz, S. Surendran, P. Verlinden, F. Rubio, K. Araki. "CPV Rating Standards Development". *Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW)*. Golden,Colorado-USA. February 16-17, 2011.
- [Kuit10] J. Kuitche. "Statistical Lifetime Predictions for PV Modules". *Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW)*. Golden,Colorado-USA. February 18–19, 2010.
- [Kur08] S. Kurtz. "Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry". NREL. Technical report NREL/TP-520-43208. July 2008.
- [Kur10] S. Kurtz. "Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry". NREL. Technical report NREL/TP-520-43208. July 2010.
- [Kur11] S. Kurtz. "Opportunities and challenges for development of a mature concentrating photovoltaic power industry". NREL. Technical report NREL/TP-520-43208. June 2011.
- [KWM+09] S. Kurtz, K. Whitfield, D. Miller, J. Joyce, y otros. "Evaluation of high-temperature exposure of rack-mounted photovoltaic modules". *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009 34th IEEE

-
- [LEA+05] H.S. Lee, N.J. Ekins-Daukes, K. Araki, Y. Kemmoku, M. Yamaguchi., "Field test and analysis: the behaviour of 3-J concentrator cells under the control of cell temperature", *Thirty first IEEE PVSC*, 2005, pp. 754-757.
- [LFB79] F. A. Lindholm, J. G .Fossum, and E. L. Burgess, "Application of the superposition principle to solar cell analysis," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. ED-26, pp. 165-171, 1979; and "Basic corrections to predictions of solar cell performance required by non- linearities," *in Proc. 12th IEEE Photovoltaic Spec. Conf.*, pp. 33- 39,1976.
- [LH10] A. Luque, S. Hegedus Editores. "Handbook of Photovoltaic Science and Engineering". John Wiley & Sons Inc. 2010.
- [LISA] Software de simulación térmica mediante elementos finitos, Sonnenhof Holdings, Canada. <http://www.lisa-fet.com/>,
- [LKYA+10] D. C.Law, R.R.King, H.Yoon, M.J.Archer, A.Boca, y otros. "Future technology pathways of terrestrial III–V multijunction solar cells for concentrator photovoltaic systems". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 94 (2010) 1314–1318
- [LOS+10] S.H. Lim, K O’Brien, E. H. Steenbert, J. Li, D. Ding , Y Zhang., " Analysis of spectral photocurrent response from multi-junction solar cells under variable voltage bias", *35th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2010
- [LS07] A. Luque, A Viacheslav. Editores. "Concentrator Photovoltaics". Springer series in optical sciences. Springer. 2007.
- [Lux06] Luxeon. Luxeon Reliability Datasheet 2006.
- [Marq10] C. Marquez "CPV installations in the USA set to grow at a CAGR of 75% in the next five years" *Renewable energy world*. May 2010
- [McCl10] Patrick McCluskey (CALCE/Univ. of Maryland), "Reliability Modeling for Photovoltaic Modules". PVMRW 2010.
- [ME98] W.Q. Meeker,L.A. Escobar. "Statistical Methods for Reliability data".Ed. Wiley,New Cork 1998.

- [MEL98] W.Q. Meeker, L.A. Escobar, C.J. Lu "Accelerated Degradation Tests: Modeling and Analysis". *Technometrics*, Vol. 40, No. 2 (May, 1998), pp. 89-99.
- [MGFL+09] Martínez A.; Gonzalez, J.R.; Fernandez, J.M.; Lopez, P.; Polo, J.; Gomez, T.; "Outdoor testing of CPV modules in INTA-SPASOLAB according to IEC 62108". *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009
- [MHDBK91] MIL-HDBK-217F: "Reliability Prediction of Electronic Equipment".
- [MHDBK98] MIL-HDBK-338B: "Electronic Reliability Design Handbook".
- [MHF05] R.W. Miles, K.M. Hynes, I. Forbes. "Photovoltaic solar cells: An overview of state-of-the-art cell development and environmental issues" *Progress in Crystal Growth and Characterization of Materials*. 5 (2005) 1-42.
- [MKKK09] D. Miller; M. Kempe; C. Kennedy; S. Kurtz. "Analysis of transmitted optical spectrum enabling accelerated testing of CPV designs," *SPIE*, (2009).
- [MSRP+09] M. Martínez, D. Sánchez, F. Rubio, J.L. Pachón, P. Banda. "CPV systems Rating, Results and Lessons Learned at ISFOC". *34th IEEE Photovoltaic Specialist Conference 2009*; pp 707-12.
- [Muller09] M. Muller. "Development of an Outdoor concentrating Photovoltaic Module Testbed, Module Handling and Testing Procedures, and Initial Energy Production Results" Technical Report NREL/TP-520-46569 September 2009.
- [MVNH+10] E. Muñoz, P.G. Vidal, G. Nofuentes, L. Hontoria, P. Pérez-Higueras, J. Terrados, G. Almonacid, J. Aguilera. "CPV Standardization: An overview". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2010;14; 518-23.
- [Myer10] D. Myers. "Solar Resource Data for CPV". *Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW)*. Golden, Colorado-USA. February 18–19, 2010.
- [NAPC09] Newman, F.; Aiken, D.; Patel, P.; Chumney, D.; Aeby, I.; Hoffman, R.; Sharps, P. "Optimization of inverted metamorphic multijunction solar cells for field-deployed concentrating PV systems". *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009

-
- [Nel81] W. Nelson. "Analysis of Performance-Degradation Data from Accelerated Tests". *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. R-30, 2, June 1981
- [Nel90] W. Nelson "Accelerated Testing. Statistical Models, Test Plans and Data Analyses." Editorial John Wiley&Sons. 1990.
- [NGC08] W. Nishikawa, E Green, S Cowley "Energy Production of CPV Power Plants at ISFOC", Proc. *ICSC-5, 5th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen* (2008)..
- [NGVA+08] N. Núñez, J. R. González, M. Vázquez, C. Algora and I. Rey-Stolle. "Reliability evaluation of III-V concentration solar cells". In: *Safety, Reliability and Risk Analysis: Theory, Methods and Applications - Martorell et al. (eds), Proceedings of European Safety and Reliability Conference (ESREL '08)*, Valencia, Spain, September 22-25 2008. CRC Press, Taylor & Francis Group, London, 1949 (2008)
- [NGVEA11] N. Núñez, J.R. González, M. Vázquez, P. Espinet, C. Algora. "Statistical calculation of the main reliability functions for concentrator III-V multijunction solar cells". *37Th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle 19-24 Jun 2011.
- [NREL] NREL (National Renewable Energy Laboratory) Estados Unidos, <http://www.nrel.gov/>.
- [Núñez05] N. Núñez. "Circuito de prueba híbrido-oro para células solares de concentración" Memoria interna. Grupo de Semiconductores III-V. IES-UPM. Marzo 2005.
- [Núñez06] N. Núñez. "Diseño de circuito de prueba IES-DBC para ensayos de vida acelerados" Memoria interna. Grupo de Semiconductores III-V. IES-UPM. septiembre 2006.
- [Núñez08] N. Núñez "Confiabilidad de dispositivos y sistemas fotovoltaicos" Trabajo Fin de Master ISSASI. EUITT-UPM. Nov-2008.
- [NVGE09] N. Núñez, M. Vázquez, J.R. González, C. Algora, P. Espinet. "Estudio de parámetros de medida de célula, y de procedimiento y planificación de

ensayos acelerados” V2. Memoria interna. Grupo de Semiconductores III-V. IES-UPM. Enero 2009.

- [NVGA+09] N. Núñez, M. Vázquez, J. R. González, C. Algora and E.Perez. “Sistema de Instrumentación de Ensayos Acelerados para Evaluar la Fiabilidad de Dispositivos Semiconductores III-V a Partir de Datos de Degradación”. II *Jornadas Iberoamericanas de Asset Management y XI Congreso de Confiabilidad de la Asociación Española para la Calidad*. Valencia, España. Jun 2009.
- [NVGA+10] N. Núñez, M. Vázquez, J.R. González, C. Algora, P. Espinet. “Novel accelerated testing method for III-V concentrator solar cells”. *Microelectron Reliab* 2010.;50;1880-83.
- [NVGJ+11] N. Núñez, M. Vázquez, J. R. González, F. J. Jiménez, J. Bautista. “Instrumentation for accelerated life tests of concentrator solar cells”. *Review of Scientific Instruments*. 2011;Vol 82;2; 024703-024703-7.
- [NVN09] E. Nogueira, M. Vázquez, N. Núñez. “Evaluation of AlGaInP LEDs reliability based on accelerated tests”. *Microelectron Reliab* 2009;49:1240-43.
- [O’Con02] P. O’Connor. “Practical Reliability Engineering.” Editorial John Wiley&Sons. 4th edition. 2002.
- [OMcM09] C.R. Osterwald, T. J. McMahon. “History of accelerated and Qualification Testing of Terrestrial Photovoltaic Modules: A Literature Review”. *Prog. Photovolt: Res. Appli.* 2009; 17;11-33
- [PAGMLB+10] P. Pérez, G. Almonacid, P. Gomez, E, Muñoz, I. Luque-Heredia, P. Banda, P- Valera, M. Cabrerizo. “Propuesta de un marco regulatorio para la Concentración Fotovoltaica en España”. Enero 2010 ASIF-ISFOC- Universidad de Jaen.
- [Per09] E. Pérez Galán. “Sistema de instrumentación para caracterización de células fotovoltaicas”. Proyecto Fin de Carrera. E.U. Ingeniería Técnica de Telecomunicación. Universidad Politécnica de Madrid. Marzo 2009

- [PFS+11] G. Peharz, J.P. Ferrer Rodríguez, G Siefer and A.W. Bett,. “Investigations on the temperature dependence of CPV modules equipped with triple-junction solar cells” *Prog. Photovolt: Res. Appl.* 2011; 19:54–60.
- [PMAVB+10] P. Pérez-Higueras, E. Muñoz, G. Almonacid, P. G. Vidal, P. Banda, I. Luque-Heredia, P. Valera, and M. Cabrerizo. “Proposal of a Spanish CPV Feed-in Tariff”. 6th International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems: CPV-6. October 14, 2010 - Volume 1277, pp. 333-336
- [PMAV11] P. Pérez-Higueras, E. Muñoz, G. Almonacid, P.G. Vidal, ” High Concentrator PhotoVoltaics efficiencies: Present status and forecast” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 1810–1815.
- [PowerSpar] En la página web: <http://www.power-spar.com>
- [PVMRW10] *Photovoltaic Module Reliability Workshop 2010*. The U.S. Department of Energy (DOE) Solar Energy Technologies Program (Solar Program) sponsored the workshop.
http://www1.eere.energy.gov/solar/pv_module_reliability_workshop_2010.html
- [PVMRW11] *Photovoltaic Module Reliability Workshop 2011*. The U.S. Department of Energy (DOE) Solar Energy Technologies Program (Solar Program) sponsored the workshop.
http://www1.eere.energy.gov/solar/pv_module_reliability_workshop_2011.html
- [Pyronsolar] En la página web: <http://www.pyronsolar.com>
- [RADIP+10] V.D. Rummyantsev, Yu.V. Ashcheulov, N.Yu. Davidyuk, E.A. Ionova, P.V. Pokrovskiy, N.A. Sadchikov, V.M. Andreev. “CPV Modules Based On Lens Panels”, *Advances in Science and Technology* Vol. 74 (2010) pp 211-218.
- [RASB+02] V.D.Rummyantsev, V.M.Andreev, N.A.Sadchikov, A. W. Bett, F. Dimroth, G. Lange. “Experimental installations with high-concentration PV modules using III-V solar cells”. *Conference: PV in Europe – from PV Technology to Energy Solutions*. Rome, Italy, 7-11 October, 2002

- [Rey-S01] Rey-Stolle, “Desarrollo de Células Solares de GaAs para concentraciones luminosas muy elevadas”, Universidad Politécnica de Madrid, Tesis Doctoral, 2001.
- [RMCP+08] F. Rubio, M. Martínez, R. Coronado, J.L. Pachon, P. Banda. “Deploying CPV power plants - ISFOC experiences”. *33Th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2008. 1548-51.
- [RSA01] Rey-Stolle I, Algora C. “Reliability and degradation of high concentrator GaAs solar cells”. In: *17th European PV solar energy conference*, Munich; 2001.
- [RSA03] Rey-Stolle I, Algora C. “High-irradiance degradation tests on concentrator GaAs solar cells”. *Prog Photovolt: Res Appl* 2003;11:249–54..
- [Sa07] R. A. Sherif and al. “Pilot production of multijunction CPV solar cells”. In *4th International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity or Hydrogen*, 2007.
- [Sch96] Schinner C. Accelerated testing in: Ireson W.G, Coombs C.F., Moss R. editors. Chapter 12 of the book “Handbook of Reliability Engineering and Management“.United States of America: McGraw-Hill; 1996, ISBN0-07-012750-6.
- [Scot10] K. Scott. “Weather Durability of PV Modules; Developing a Common Language for Talking about PV Reliability”. *Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW)*. Golden,Colorado-USA. February 18–19, 2010
- [SF08] M. Spencer, M. Finot. “Field testing for reliability assessment of new CPV technologies”. *International Conference on Solar Concentrators for the Generation of Electricity ICSC - 5*. 2008
- [SG05] Slade A, Garboushian V. “27.6% efficient silicon concentrator cell for mass production”. Technical Digest, *15th International Photovoltaic Science and Engineering Conference*, Shanghai, October 2005,
- [Shis09] B. Shisler “Summary of Emerging CPV Safety Standards”. TUV Rheinland PTL, LLC 2009.

-
- [SMFA07] E. Soto-Campos, J. Marcos-Acevedo, S. Fernandez-Gomez, R. Alvarez-Santos; "Data collection and Reliability analysis of aged electronics devices". *Reliability and Maintainability Symposium*, 2007. 220-25.
- [Soitec] En la página web: <http://www.soitec.com>.
- [Sol3G] En la página web: <http://www.sol3g.com>.
- [SolarJ] En la página web, Solar Junction <http://www.sj-solar.com/>
- [SolarSsyst] En la página web www.solarsystems.com.au
- [Solfocus] En la página web: www.solfocus.com
- [SPAC+02a] G. Sala, D. Pachón, I. Antón, E. Caamaño, y otros. C-RATING Project (Contract: NNE-1999-00588). "Test, Rating and Specification of PV Concentrator Components and Systems". C-RATING book. Chapter 3: History of Concentrators. December 2002
- [SPAC+03] G. Sala, D. Pachón, I. Antón, E. Caamaño, y otros. C-RATING Project (Contract: NNE-1999-00588). "Test, Rating and Specification of PV Concentrator Components and Systems Final Report". Part2. Technical and Scientific Results. Julio 2003
- [Spectrolab] En la página web: <http://www.spectrolab.com>.
- [Spire] En la página web: <http://www.spirecorp.com/spire-solar> .
- [Staffo08] P. Stafford "A Technology Assessment of Photovoltaic Concentrator Systems (CPV) and Their Prospects" Murdoch University (Australia). <http://researchrepository.murdoch.edu.au/1647/> (2008).
- [Sunpower] En la página web: <http://us.sunpowercorp.com/>
- [Swan03] Swanson, R.M. "Photovoltaic Concentrators". In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 1st ed. Luque A., Hedegus S. eds.; Wiley, NY, USA, 2003. Chapter 11, pp 449-503.

- [Swan11] Swanson, R.M. Photovoltaic Concentrators. In Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, 2nd ed. Luque A., Hedegus S. eds.; Wiley, NY, USA, 2003. Chapter 11, pp 449-503.
- [Swans00] R.M. Swanson, "The Promise of Concentrators" *Prog. Photovolt. Res. Appl.* 8, 93-111 (2000).
- [Tam10] M.G. TamizhMani. "Recommended Protocol for Accelerated Aging Testing: a literature Review for Protocol Development" *Photovoltaic Module Reliability Workshop 2010*.
- [Tamizh10] M.G. TamizhMani. "Reliability evaluation of concentrator photovoltaic modules per IEC qualification specifications". prm2010 NREL. Program Team : PV long Term.
http://www1.eere.energy.gov/solar/review_meeting/pdfs/prm2010_arizonastate.pdf
- [Tanabe09] K. Tanabe. A Review of Ultrahigh Efficiency III-V Semiconductor Compound Solar Cells: Multijunction Tandem, Lower Dimensional, Photonic Up/Down Conversion and Plasmonic Nanometallic Structures. *Energies* 2009, 2(3), 504-530
- [Tecnológica] En la página web <http://www.tecnologica.com/>. Tecnológica Ingeniería Calidad y Ensayos S.A., perteneciente al grupo Alter.
- [THK05] Y. Tsuno, Y. Hishikawa and K. Kurokawa, "Separation of the I-V curve of each component cell of multi-junction solar cells," *Thirty-first IEEE PVSC*, 2005, pp. 1476-1479.
- [TMDP+00] A. Terao, W. P. Mulligan, S. G. Daroczi, O. C. Pujol, P. J. Verlinden, R. M. Swanson, J. C. Miñano, P. Benítez and J. L. Álvarez. "A mirror-less design for micro-concentrator modules". In *IEEE 28th Photovoltaic Specialist Conference*, pp. 1416-1419, 2000.
- [TP04] T.V. Torchynska and G. Polupan. " High efficiency solar cells for space applications". *Superficies y Vacío* 2004, 17(13), pp 21-25.

- [TP80] N.G. Tarr and F.L. Pulfrey, "The superposition principle for homojunction solar cells". *IEEE Transactions on Electron Devices*, Vol. ED-27,nº. 4, april 1980.
- [TTMQ+07] D. Ton, J. Tillerson, T. McMahon, M. Quintana, K Zweibel. "Accelerated aging tests in photovoltaics". Summary report. January 2007. Solar Energy Technologies program; U.S. Demartment of Energy.
- [Ueda99] O. Ueda. "Reliability issues in III-V compound semiconductor devices: optical devices and GaAs-based HBTs" *Microelectronics Reliability* Volume 39, Issue 12, 17 December 1999, Pages 1839-1855.
- [UNE200004-2] UNE 200004-2. "Cribado de fiabilidad mediante esfuerzos" – Parte2: Componentes electrónicos. Julio 2003
- [VARSG07] M. Vázquez, C. Algora, I. Rey-Stolle, and J.R. González."III-V concentrator solar cell reliability prediction based on quantitative LED reliability data". *Prog Photovolt: Res Appl* 2007;15(6) .
- [vKAKM+09] van Kessel, T. ; Abduljabar, A. ; Khonkar, H. ; Moumen, N. ; Sandstrom, R. ; Al-Saaedi, Y. ; Martin, Y. ; Guha, S.. "Concentrator photovoltaic reliability testing at extreme concentrations up to 2000 suns". *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009 34th IEEE
- [VNMA+05] M. Vázquez, N. Núñez, F. Montalvo, R. Álvarez, C. Algora, I. Rey-Stolle y J. R. González, J. Barbero y E. Galiana, "Demostración de la Fiabilidad de nuevos dispositivos: aplicación a las células solares de concentración". En *VII Congreso de Confiabilidad de la AEC* (Asociación Española de la Calidad), Madrid, España , 29 – 30 Noviembre 2005.
- [VNNB10] M. Vázquez, N. Núñez, E. Nogueira, A. Borreguero. "Degradation of AllnGaP red LEDs under drive current and temperature accelerated life tests". *Microelectron Reliab* 2010.;50;1559-62.
- [vOMN82] R. Van Overstraeten, R. Mertens, J. Nijs, "Progress in photovoltaic energy conversión", *Prog. Phys.*, Vol. 45, 1982.
- [VPJ+06] A. Vogt, G. Peharz, J. Jaus, A. Bösch and A. W. Bett, "Degradation Studies on FLATCON® Modules and Assemblies", *Proceedings of the 21st*

European Photovoltaic Solar Energy Conference, Dresden, Germany, 2006, pp. 2225-2228.

- [vRB05] S. van Riesen and A.W. Bett. "Degradation study of III-V solar cells for concentrator applications". *Prog. Photovolt: Res. Appli.* 2005; 13; 369-80.
- [vRBW03] S. van Riesen, A. W. Bett, and G. P. Wileke. "Accelerated ageing tests on III-V solar cells". In *3rd World conference in Photovoltaic Energy Conversion*, 2003, pp 837-840.
- [VRS08] M. Vázquez, I. Rey-Stolle. "Photovoltaic module reliability model based on field degradation studies". *Prog. Photovolt: Res. Appli.* 2008; 16; 419-33.
- [War73] J. Warleta Carrillo. "Fiabilidad bases teóricas y prácticass". Editado por Instituto Nacional de Técnica Aeroespacial.1973. ISBN:84-500-5738-8
- [WCNM05] J. H. Wohlgemuth, D. W. Cunningham, A. M. Nguyen, J. Miller, "Long term reliability of PV module." *20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, Barcelona, Spain, 2005; 1942–1946.
- [Wei51] Waloddi Weibull. "A statistical Distribution Function of Wide Applicability". *J. Appl. Mech.-Trans. ASME* **18** (3): 293–297.
- [Wohl10] J. Wohlgemuth. "Overview of Failure Mechanisms and PV Qualification Test Standards". *Photovoltaic Module Reliability Workshop (PVMRW)*. Golden,Colorado-USA. February 18–19, 2010.
- [Wohl99] J. Wohlgemuth. "Module qualification testing". Proceedings of the 1999 Photovoltaic Performance and Reliability Workshop, NREL/CP-520-27723, Vail, Colorado, USA 1999; 85-100.
- [XP03] J. Xie y M. Pecht. "Reliability Prediction Modeling of Semiconductors Light Emitting Device." *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability* VOL 3 n°4 December 2003.
- [Yan07] G. Yang. "Life Cycle Reliability Engineering" Chapter 7. .C:Wiley 2007. ISBN 9780471715290.

- [YTA+04] M. Yamaguchi, T. Takamoto, T. Agui et al., "Japanese activities of R&D on III-V concentrator solar cells and modules", *Proc. of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2004, pp. 2014-2017.
- [YTA06] M. Yamaguchi, T. Takamoto, K. Araki. "Super high-efficiency multi-junction and concentrator solar cells". *Solar Energy Materials & Solar Cells* 90 (2006) 3068–3077.
- [YYHY+01] Yan BP, Yang YF, Hsu CC, Lo HB, Yang ES. "A reliability comparison of InGaP/GaAs HBTs with and without passivation ledge". *Microelectron Reliab* 2001;41:1959–63..
- [ZTH08] L. X. Zhao, E. J. Thrush, C. J. Humphreys, "Degradation of GaN-based quantum well light-emitting diodes". *J. Appl. Phys.* 103, 024501 (2008).

PUBLICACIONES

Publicaciones

Durante el desarrollo de esta tesis doctoral se ha contribuido a las publicaciones que se citan a continuación.

Artículos en revistas científicas del JCR (“Journal Citation Report”):

J.R. Gonzalez, M Vazquez, **N Núñez**, C Algora, I Rey-Stolle, Galiana B. “Reliability analysis of temperature step-stress tests on III–V high concentrator solar cells”. *Microelectronics Reliability*. 2009;49: 673–80.

E. Nogueira, M. Vázquez, **N. Núñez**. “Evaluation of AlGaInP LEDs reliability based on accelerated tests”. *Microelectron. Reliab.* 2009;49:1240-43.

N. Núñez, M. Vázquez, J.R. González, C. Algora, P. Espinet. “Novel accelerated testing method for III-V concentrator solar cells. *Microelectron. Reliab*”. 2010.;50;1880-83.

P. Espinet, C. Algora, J.R. González, **N. Núñez**, M. Vázquez. “Degradation mechanism analysis in temperature stress tests on III–V ultra-high concentrator solar cells using a 3D distributed model”. *Microelectron. Reliab.* 2010.;50;1875-79.

M. Vázquez, **N. Núñez**, E. Nogueira, A. Borreguero. “Degradation of AlInGaP red LEDs under drive current and temperature accelerated life tests”. *Microelectron. Reliab.* 2010;50;1559-62.

JR González, M Vázquez, C Algora, **N. Núñez**. “Real-time reliability test for a CPV module based on a power degradation model”. *Prog Photovolt: Res Appl* 2011;19(1),pp 113-122.

N. Núñez, M. Vázquez, J. R. González, F. J. Jiménez, J. Bautista. “Instrumentation for accelerated life tests of concentrator solar cells”. *Review of Scientific Instruments*. 2011;Vol 82;2; 024703-024703-7.

N. Núñez , J. R. González , M. Vázquez, C. Algora and P. Espinet. “Evaluation of the reliability of high concentrator GaAs solar cells by means of temperature accelerated ageing tests”. *Prog Photovolt: Res Appl*. Article in Press 2012. DOI: 10.1002/pip.2212

Comunicaciones en congresos internacionales:

J. R. González, C. Algora, I. Rey-Stolle, R. Álvarez, M. Vázquez, **N. Núñez**, F. Montalvo, J. Barbero, E. Cordero, E. Galiana y V. Díaz Título: "Strategy for Certified Reliability Analysis for III-V High Concentration Solar Cells." Congreso: *2006 IEEE World Conference on Photovoltaics Energy Conversión*. Hawai (EEUU). Mayo 2006.

J. R. González, C. Algora, I. Rey-Stolle, M. Vázquez, **N. Núñez**, J. Barbero and V. Díaz. "III-V High Concentration Solar Cells: Assesing the reliability of a new product". 4th International Conference on *Solar Concentrators for the generation of Electricity or Hydrogen (ICSC-4)*. El Escorial, Espana,. Mar 2007.

N. Núñez, J. R. González, M. Vázquez, C. Algora and I. Rey-Stolle. "Reliability evaluation of III-V concentration solar cells". *European Safety and Reliability Conference (ESREL)/17th Annual Meeting of the Society-for-Risk-Analysis-Europe (SRA-Europe)* . Valencia, España. Sept 2008.

J. R. González, C. Algora, M. Vázquez, **N. Nuñez**, and I. Rey-Stolle. "Strategy for Assessing the Reliability of III-V Concentrator Solar Cells: Working Plan Review and First Results". *International Conference on Solar Concentrators for The Generation of Electricity (ICSC-5)*. Palm Desert, CA USA. Nov 2008

N. Núñez, M. Vázquez, J. R. González, C. Algora and E.Perez. "Sistema de Instrumentación de Ensayos Acelerados para Evaluar la Fiabilidad de Dispositivos Semiconductores III-V a Partir de Datos de Degradación". *II Jornadas Iberoamericanas de Asset Management y XI Congreso de Confiabilidad de la Asociación Española para la Calidad*. Valencia, España. Jun 2009.

J. R. González, M. Vázquez, C. Algora and **N. Núñez**. "A New Model to Assess the Reliability of CPV Modules in Real Time Outdoor Tests". *34th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*. Philadelphia, PA, USA. Jun 2009.

J. R. González, M. Vázquez, **N. Núñez**, C. Algora and P. Espinet. "Reliability Improvement in III-V Concentrator Solar Cells by Means of Perimeter Protection". *International Conference on Concentrating Photovoltaic Systems. (CPV-6)*. Freiburg, Germany. Apr 2010.

N. Núñez, J.R. González, M. Vázquez, P. Espinet, C. Algora. "Statistical calculation of the main reliability functions of GaAs concentrator solar cells". *37Th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Seattle 19-24 Jun 2011.

Publicaciones nacionales.

M. Vázquez, **N. Núñez**, F. Montalvo, R. Álvarez, C. Algora, I. Rey-Stolle y J. R. González, Juan Barbero y Enrique Galiana Título: "Demostración de la Fiabilidad de nuevos dispositivos: aplicación a las células solares de concentración.": *VII Congreso de Fiabilidad*. Valencia. 29-30 Noviembre 2005.

N. Núñez "Confiabilidad de dispositivos y sistemas fotovoltaicos" Trabajo Fin de Master ISSASI. EUITT-UPM. Nov-2008.

N. Núñez. "Ensayos de vida acelerados en nuevas tecnologías de células solares". Revista de divulgación científica, *Madri+d*. 11 Julio 2011.