

E.T.S. de Ingeniería Industrial,  
Informática y de Telecomunicación

Fabricación de laminados  
fotovoltaicos de Silicio cristalino  
basados en materiales alternativos  
para aplicaciones especiales.



Máster Universitario en  
Ingeniería Industrial

Trabajo Fin de Máster

Rodrigo García Navarro

Directora: Gurutze Pérez Artieda

Pamplona, 23 de Junio del 2017



## AGRADECIMIENTOS

Después de todos estos meses de trabajo desarrollando este Trabajo Fin de Máster, veo necesario agradecer a todas las personas que con su presencia a lo largo de este período me han ayudado tanto.

En primer lugar, me gustaría agradecer al Centro Nacional de Energías Renovables, en concreto a todos los componentes del departamento de Energía Solar Fotovoltaica, por la oportunidad que me han brindado al poder elaborar este proyecto junto a ellos y su apoyo recibido. El compañerismo y el ambiente laboral del día a día ha sido, sin lugar a dudas, una de las mejores experiencias que he podido encontrar. Gracias a mi tutora y encargada del proyecto, Ana Belén Cueli Orradre, por todo su tiempo invertido en la enseñanza, revisiones y ayuda durante este largo tiempo de proyecto.

Agradecer también a mi directora de proyecto, Gurutze Pérez Artieda y a toda la institución de la Universidad Pública de Navarra, profesorado e integrantes de la Cátedra de Energías Renovables por su entrega profesional y personal.

También agradezco a todos los compañeros de máster y amigos que durante estos años de estudio me han ayudado, con su apoyo y amistad.

Por último, tengo que agradecer a mi familia al completo por todo su cariño, comprensión, apoyo y ánimo, sobre todo en los momentos difíciles, ya que gracias a ellos, ha sido posible realizar esta etapa de mi vida que sin lugar a dudas, ha dejado huella.

A todos, muchas gracias.

“No fracasé, solo encontré 999 maneras de cómo no hacer una bombilla”

*Thomas Alva Edison*

## RESUMEN

La realización de este Trabajo Fin de Máster (TFM) ha supuesto el desarrollo y validación de un proceso de laminación de módulos fotovoltaicos (FV) basado en la utilización de materiales alternativos a los de los módulos convencionales. Los materiales alternativos son el policarbonato (PC) y un entramado estructural, los cuales sustituyen al vidrio y al marco de aluminio respectivamente. El objetivo de la utilización de estos materiales es la construcción de un módulo ligero y adaptable a diferentes superficies para facilitar su uso en integración arquitectónica.

Partiendo de estudios previos que demostraron la viabilidad de aplicar procesos de laminación propios de entornos industriales a los nuevos materiales investigados, el trabajo se ha centrado en la fabricación de laminados fotovoltaicos con objeto de evaluar su comportamiento bajo condiciones normales de operación. Para ello los dispositivos fabricados se han caracterizado empleando técnicas ópticas mecánicas, químicas y eléctricas, antes y después de someter a los laminados a distintas pruebas de degradación. Los resultados obtenidos permiten extraer conclusiones sobre las mejores alternativas de diseño de los productos en cuanto a composición y combinación de los materiales estudiados así como del proceso de laminación recomendado.

Este TFM se desarrollará en el departamento de energía solar fotovoltaica del Centro Nacional de Energías Renovables (CENER), siguiendo con los resultados obtenidos de anteriores trabajos dentro del proyecto AiSoVol.

## LISTA DE PALABRAS CLAVE

- Fotovoltaica
- Módulos fotovoltaicos
- Laminación
- Policarbonato (PC)
- Entramado estructural
- EVA (Etileno Vinil Acetato)
- PPE (Poliéster/Poliéster/EVA)
- Ensayos de caracterización
- Ensayos de degradación
- Integración arquitectónica
- Termografía Infrarroja (TIR)

## ABREVIATURAS

- CEM: Condiciones Estándar de Medida
- I-V: Intensidad-Tensión
- EL: Electroluminiscencia
- DSC: Differential Scanning Calorimetry
- BIPV: Building Integrated PV
- BAPV: Building attached PV
- CCD: Charge-coupled device
- $V_{OC}$ : tensión de circuito abierto
- $I_{SC}$ : la intensidad de cortocircuito
- FF: el factor de forma
- $P_{MAX}$ : potencia máxima
- $I_{MP}$ : intensidad en el punto de máxima potencia
- $V_{MP}$ : tensión correspondiente al punto de máxima potencia

# ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS.....	2
RESUMEN.....	3
LISTA DE PALABRAS CLAVE .....	4
ABREVIATURAS .....	4
ÍNDICE .....	5
ÍNDICE DE FIGURAS.....	9
1. INTRODUCCIÓN.....	12
1.1. Energías renovables (EERR).....	12
1.1.1. Ventajas y desventajas de las EERR.....	12
1.2. Energía Solar Fotovoltaica.....	14
1.2.1. Célula fotovoltaica .....	14
1.2.2. Efecto fotovoltaico .....	14
1.2.3. Tecnología de células.....	15
1.3. Integración arquitectónica.....	18
1.4. El módulo fotovoltaico.....	19
1.4.1. Componentes y materiales de un módulo fotovoltaico.....	19
1.4.2. Procesos actuales de fabricación de módulos fotovoltaicos.....	25
2. OBJETO .....	27
2.1. Desarrollo de un proceso de laminado compatible con los nuevos materiales	28
2.2. Validación del funcionamiento .....	29
3. LAMINACIÓN .....	30
3.1. Introducción.....	30
3.2. Descripción de la laminadora.....	31
3.2.1. Funcionamiento de la laminadora.....	32
3.3. Descripción de los materiales utilizados y sus especificaciones .....	34
3.3.1. Cubierta frontal .....	34
3.3.2. Encapsulante .....	35
3.3.3. Célula fotovoltaica.....	35
3.3.4. Entramado estructural.....	36
3.3.5. Cubierta trasera .....	37
3.4. Proceso de laminación .....	37
3.4.1. Requisitos previos .....	38
a. Limpieza.....	38
b. Estado de mantenimiento y calibración de los equipos .....	38

3.4.2.	Equipos, instrumentos y patrones.....	38
3.4.3.	Procedimiento.....	39
a.	Laminado .....	39
b.	Soldadura de la célula.....	42
4.	TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN.....	45
4.1.	Inspección visual .....	45
4.2.	Grado de curado del encapsulante .....	46
4.2.1.	Differential Scanning Calorimetry (DSC).....	47
4.2.2.	Relación entre el método primario y el DSC .....	49
4.3.	Test de pelado.....	50
4.3.1.	Principio de funcionamiento.....	50
4.3.2.	Máquina para la realización del test de pelado .....	51
4.3.3.	Funcionamiento .....	51
4.4.	Técnicas ópticas.....	53
4.4.1.	Transmitancia óptica.....	53
4.4.2.	Índice de amarilleamiento (Yellowness Index, YI).....	55
4.5.	Electroluminiscencia .....	56
4.5.1.	Principio de funcionamiento.....	56
4.5.2.	Equipo para la realización de electroluminiscencia .....	56
4.5.3.	Funcionamiento .....	57
4.6.	Termografía.....	58
4.6.1.	Principio de funcionamiento.....	58
4.6.2.	Equipo para la realización del ensayo de termografía.....	59
4.6.3.	Funcionamiento .....	60
4.7.	Determinación de la máxima potencia .....	60
4.7.1.	Principio de funcionamiento.....	60
4.7.2.	Equipo para la realización de la determinación de máxima potencia .....	61
4.7.3.	Funcionamiento .....	61
5.	ENSAYOS DE DEGRADACIÓN .....	63
5.1.	Test de pandeo o Buckling .....	63
5.1.1.	Principio de funcionamiento.....	63
5.1.2.	Máquina para la realización del test de pandeo .....	63
5.1.3.	Funcionamiento .....	64
5.2.	Ensayo de granizo .....	65
5.2.1.	Principio de funcionamiento.....	66
5.2.2.	Máquina para la realización del ensayo de granizo.....	66

5.2.3.	Funcionamiento .....	67
5.3.	Resistencia al impacto de una bola de gran diámetro.....	67
5.3.1.	Principio de funcionamiento.....	67
5.3.2.	Equipo para la realización del ensayo .....	68
5.3.3.	Funcionamiento .....	69
5.4.	Calor húmedo .....	70
5.4.1.	Principio de funcionamiento.....	70
5.4.2.	Equipo para la realización de calor húmedo .....	71
5.4.3.	Funcionamiento.....	71
6.	RESULTADOS EXPERIMENTALES .....	73
6.1.	Ensayos de calidad del encapsulante .....	74
6.1.1.	EVA convencional .....	74
6.1.2.	EVA de baja Temperatura .....	77
6.1.3.	Policarbonato.....	78
6.2.	Ensayo de calor húmedo .....	79
6.2.1.	Laminados ensayados.....	80
6.2.2.	Policarbonato.....	81
6.2.3.	Resultados del ensayo de calor húmedo .....	81
6.3.	Ensayos mecánicos.....	84
6.3.1.	Ensayo de granizo .....	84
6.3.1.1.	Policarbonato 2mm sin refuerzo .....	85
6.3.1.2.	Policarbonato 2mm con refuerzo .....	87
6.3.1.3.	Policarbonato 4mm sin refuerzo .....	88
6.3.1.4.	Policarbonato 4mm con refuerzo .....	89
6.3.1.5.	Resultados finales del ensayo de granizo.....	90
6.3.2.	Ensayo de Buckling .....	92
6.3.2.1.	Policarbonato 2mm sin refuerzo célula 3BB monocristalinas.....	93
6.3.2.2.	Policarbonato 2mm con refuerzo célula 3BB monocristalinas.....	95
6.3.2.3.	Policarbonato 2mm sin refuerzo célula 2BB policristalina .....	97
6.3.2.4.	Policarbonato 2mm con refuerzo célula 2BB policristalina.....	99
6.3.2.5.	Resultados finales del ensayo de Buckling .....	101
6.3.3.	Ensayo de impacto de bola.....	107
6.3.3.1.	EVA sin curar.....	107
6.3.3.2.	EVA curado .....	107
6.3.3.3.	Resultados del ensayo de impacto de bola.....	108
6.3.4.	Ensayo de pelado .....	109

6.3.4.1.	EVA STRE.....	110
6.3.4.2.	EVA baja temperatura .....	112
7.	CONCLUSIONES .....	115
7.1.	Optimización del proceso de laminado .....	115
7.2.	Validación del funcionamiento .....	116
7.2.1.	Ensayo de calor húmedo .....	116
7.2.2.	Ensayos mecánicos.....	116
8.	TRABAJOS A DESARROLLAR .....	118
9.	REFERENCIAS .....	120
10.	ANEXOS .....	122
	ANEXO 1: Policarbonato .....	123
	ANEXO 2: Encapsulante EVA.....	127
	ANEXO 3: Encapsulante EVA baja temperatura .....	130
	ANEXO 4: Entramado estructural .....	132
	ANEXO 5: Cubierta posterior PPE .....	136
	ANEXO 6: Artículo AISOVOL.....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Energía solar .....	13
Figura 2: Estructura de una célula .....	15
Figura 3: Célula de silicio monocristalino .....	15
Figura 4: Célula de silicio policristalino .....	16
Figura 5: Módulo híbrido .....	16
Figura 6: Módulo de a-Si.....	16
Figura 7: Célula CIS.....	17
Figura 8: Células CIGS.....	17
Figura 9: Módulo CdTe .....	17
Figura 10: Módulo de concentración FV .....	17
Figura 11: Perovskitas .....	18
Figura 12: Estructura típica de un módulo fotovoltaico.....	19
Figura 13: Número de productos de los diferentes encapsulantes en 2013 y cuota de mercado de los diferentes encapsulantes.[3].....	21
Figura 14: Encapsulante EVA .....	22
Figura 15: Cara frontal de una célula fotovoltaica con los contactos .....	23
Figura 16: Interconexión de células .....	23
Figura 17: Detalles de los ribbon y la interconexión de strings.....	24
Figura 18: Diferentes cubiertas posteriores utilizadas.[3] .....	24
Figura 19: Caja de conexiones. ....	25
Figura 20: Distintos componentes a laminar de un módulo fotovoltaico .....	26
Figura 21: Proceso de laminado .....	30
Figura 22: Esquema de una máquina laminadora.....	31
Figura 23: Partes de la laminadora .....	32
Figura 24: Descripción de los ciclos de trabajo .....	33
Figura 25: Temperatura y presión de la laminadora durante el proceso de laminación.....	34
Figura 26: Entramado C648.....	37
Figura 27: Rollo de PPE .....	37
Figura 28: Lámina de PPE.....	39
Figura 29: Lámina de EVA.....	39
Figura 30: Orden de los materiales utilizados para realizar el sándwich completo .....	40
Figura 31: Módulo de 4 células con dimensiones 400 x 400 mm. ....	41
Figura 32: Orden de los materiales necesarios para realizar el sándwich sencillo. ....	41
Figura 33: Soldadura de la parte superior de la célula .....	42
Figura 34: Extremo entre el ribbon y el extremo de la célula.....	43
Figura 35: Parte posterior de la célula .....	43
Figura 36: Unión mediante ribbon de dos célula .....	44
Figura 37: Ejemplo de una mala laminación .....	45
Figura 38: Curva típica DSC .....	48
Figura 39: Ensayo de pelado a 90 grados.....	50
Figura 40: Máquina de ensayo de pelado de CENER.....	51
Figura 41: Estructura de soporte del módulo .....	52
Figura 42: Vista superior de la posición de la muestra durante el test de pelado .....	52
Figura 43: Vista superior de la posición de la muestra durante el test de pelado .....	53
Figura 44: Mordaza tirando de la pestaña verticalmente durante el test de pelado .....	53
Figura 45: Transmitancia óptica.....	54

<i>Figura 46: Sistema experimental para la medida de la transmitancia.....</i>	<i>55</i>
<i>Figura 47: Vista del montaje para el ensayo de electroluminiscencia.....</i>	<i>57</i>
<i>Figura 48: Electroluminiscencia .....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 49. Esquema del equipo necesario para termografía.....</i>	<i>59</i>
<i>Figura 50: esquema de montaje con simulador solar flash.....</i>	<i>62</i>
<i>Figura 51: Principio del Buckling o pandeo. ....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 52: Máquina para ensayo de Buckling. ....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 53: esquema ensayo de Buckling. ....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 54: esquema ensayo de granizo. ....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 55: equipo del ensayo de impacto de bola. ....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 56: resumen del análisis de huella. ....</i>	<i>70</i>
<i>Figura 57: Curva DSC del EVA convencional caducado. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 58: Curva DSC del EVA de baja temperatura. ....</i>	<i>77</i>
<i>Figura 59. Curva DSC realizada al policarbonato. ....</i>	<i>79</i>
<i>Figura 60: Cámara de ensayo de calor húmedo con muestras. ....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 61: Módulo 46.0116.0-56 con claras delaminaciones frontales y traseras.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 62: Laminados 46.0116.0-32 y 46.0116.0-62 con delaminaciones.....</i>	<i>81</i>
<i>Figura 63: Comparación visual del laminado 46.0116.0-56.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 64: Valores de transmitancia de los diferentes laminados ensayados.....</i>	<i>83</i>
<i>Figura 65: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-28.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 66: electroluminiscencia y termografía del módulo 46.0116.0-56.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 67: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-28.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 68: electroluminiscencia y termografía del módulo 46.0116.0-56 tras el impacto de granizo.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 69: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-27.....</i>	<i>87</i>
<i>Figura 70: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-27 tras un impacto de granizo .....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 71: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-58.....</i>	<i>88</i>
<i>Figura 72: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-58 tras un impacto de granizo .....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 73: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-29.....</i>	<i>89</i>
<i>Figura 74: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-29 tras un impacto de granizo .....</i>	<i>90</i>
<i>Figura 75: Curva I-V antes y después del ensayo de granizo del módulo 46.0116.0-56.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 76: Inspección visual del módulo 46.0116.0-56.....</i>	<i>93</i>
<i>Figura 77: Electroluminiscencia y termografía del módulo 46.0116.0-56.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 78: Electroluminiscencia y termografía tras el ensayo de Buckling. ....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 79: Situación final de pandeo.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 80: Bending o pandeo frente al tiempo de la muestra 46.0116.0-56. ....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 81: Electroluminiscencia y termografía de la muestra 46.0116.0-57. ....</i>	<i>96</i>
<i>Figura 82: Electroluminiscencia y termografía tras el Buckling en la muestra 46.0116.0-57. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 83: Bending o pandeo frente al tiempo en la muestra 46.0116.0-57. ....</i>	<i>97</i>
<i>Figura 84: Electroluminiscencia y termografía de la muestra 46.0116.0-60. ....</i>	<i>98</i>
<i>Figura 85: Electroluminiscencia y termografía del laminado 46.0116.0-60 tras Buckling.....</i>	<i>99</i>
<i>Figura 86: Pandeo frente al tiempo de la muestra 46.0116.0-60.....</i>	<i>99</i>

<i>Figura 87: Electroluminiscencia y termografía del laminado 46.0116.0-59.....</i>	100
<i>Figura 88: Electroluminiscencia y termografía tras Buckling en laminado 46.0116.0-59. .....</i>	100
<i>Figura 89: Pandeo frente al tiempo de la muestra 46.0116.0-59.....</i>	101
<i>Figura 90: Comparación de curvas I-V.....</i>	107
<i>Figura 91: Huella antes y después del tratamiento de imagen. ....</i>	108
<i>Figura 92: Imagen tomada con microscopio de la huella tras el impacto de bola. ....</i>	109
<i>Figura 93: Gráfica de fuerza de adhesión y laminado ensayado.....</i>	112

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo Fin de Máster (TFM) se ha desarrollado en el campo de las Energías Renovables (EERR), más concretamente en la Energía Solar Fotovoltaica. Forma parte del Proyecto AISOVol que está realizando el Centro Nacional de Energías Renovables (CENER) en colaboración con el Instituto Tecnológico de Energías Renovables de Canarias (ITER). En él se investiga el uso de materiales alternativos en la fabricación de módulos fotovoltaicos (FV) que proporcionen unas características semejantes a las de los módulos convencionales. Estos nuevos materiales serán más ligeros y adaptables a diferentes superficies para facilitar su uso en integración arquitectónica.

### 1.1. Energías renovables (EERR)

Las energías renovables son aquellas que se obtienen a través de recursos renovables como el sol, agua, viento y materia orgánica. Son inagotables ya sea por la inmensa cantidad que contienen, o porque son capaces de regenerarse por medios naturales. Además, debido a que su impacto ambiental es prácticamente nulo se consideran energías limpias por lo que son respetuosas con el medio ambiente. Sin embargo, su gran desventaja es que su producción es intermitente, debido a su dependencia con las condiciones climatológicas.

Existen varios tipos de energía renovables, todas ellas originadas principalmente por el sol: energía solar, energía eólica, energía hidráulica, energía de la biomasa, energía geotérmica y energías marinas.

#### 1.1.1. Ventajas y desventajas de las EERR

A continuación se describirán tanto las ventajas como las desventajas de las energías renovables de forma general, ya que aunque tengan muchos puntos a favor, también tienen sus inconvenientes.

#### Ventajas:

- Son respetuosas con el medioambiente ya que no emiten gases contaminantes por lo que disminuyen el efecto invernadero. Por lo tanto, son una alternativa limpia para la producción de energía.
- No generan residuos por lo que no es necesario ningún tipo de almacenamiento para su degradación como ocurre con la nuclear.
- Evitan la dependencia de otros países produciendo una mayor autonomía.

- Generan más puestos de trabajo que las energías convencionales.
- Sus fuentes de energía son inagotables.

### Desventajas:

- Es necesaria una inversión inicial elevada.
- Disponibilidad variable. El problema de las renovables es que son dependientes del recurso, siendo este muy variable según las condiciones climáticas.
- Es necesaria una gran superficie para obtener una cantidad de energía apreciable.

En el presente TFM nos vamos a centrar en la energía solar fotovoltaica. La energía solar es aquella que directamente hace uso de la radiación del sol, utilizando diferentes tecnologías para transformarla en electricidad. Existen dos tipos de energía solar en función de cómo se realiza ese aprovechamiento: energía solar fotovoltaica y energía solar térmica.



(a) Energía Solar Fotovoltaica

(b) Energía Solar Térmica

Figura 1: Energía solar

La energía solar fotovoltaica aprovecha la radiación solar para generar electricidad gracias a las características electrónicas de sus materiales. La energía solar térmica en cambio, se basa en la concentración de la energía solar para obtener energía térmica y posteriormente producir electricidad a través de una turbina. A partir de ahora nos centraremos en la energía solar fotovoltaica ya que es de lo que trata el presente TFM.

## 1.2. Energía Solar Fotovoltaica

La energía solar fotovoltaica se basa en la transformación de la radiación solar directamente en corriente continua de forma limpia y silenciosa, cuando los fotones del sol inciden sobre los materiales semiconductores de las células fotovoltaicas. Esta transformación se produce en un elemento semiconductor denominado célula fotovoltaica.

La cantidad de radiación solar que llega a la tierra es variable a lo largo del día y del año. Además depende de la nubosidad, del ángulo de incidencia y de la reflectancia de las superficies. Se distinguen tres tipos de radiaciones; directa, difusa y reflejada y a su vez, la radiación global que es la suma de las tres. La energía fotovoltaica hace uso de todos los tipos de radiaciones para la obtención de electricidad.

### 1.2.1. Célula fotovoltaica

La célula fotovoltaica es el elemento principal de una instalación fotovoltaica ya que es el que convierte la luz solar en corriente continua. Las células más extendidas están basadas en el uso de obleas muy finas (aproximadamente 0,18 mm) de un material semiconductor que generalmente suele ser silicio. Su principio de funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico.

### 1.2.2. Efecto fotovoltaico

El efecto fotovoltaico es el fenómeno físico que permite obtener electricidad a partir de la luz del sol. La luz solar está formada por fotones, que son partículas sin masa y con una determinada cantidad de energía. Las diferentes energías de los fotones corresponden con las diferentes longitudes de onda del espectro electromagnético.

La célula se basa en una unión PN con un contacto en cada región, lo que permite la conexión con un circuito externo. Para formar la capa tipo N (exceso de electrones), el semiconductor se dopa con elementos químicos de 5 electrones de valencia (fósforo) y para formar la capa tipo P (exceso de huecos) el dopado se hace con elementos de 3 electrones de valencia (boro).

Al unir ambas capas se crea la unión PN cuyo funcionamiento es similar al de un diodo. Cuando los fotones del sol inciden sobre la célula, los electrones de la capa N tienden a dirigirse a la capa P. De esta manera, la región N queda cargada positivamente y la P negativamente, creando un campo eléctrico de la zona N hacia la zona P como se aprecia en la Figura 2.

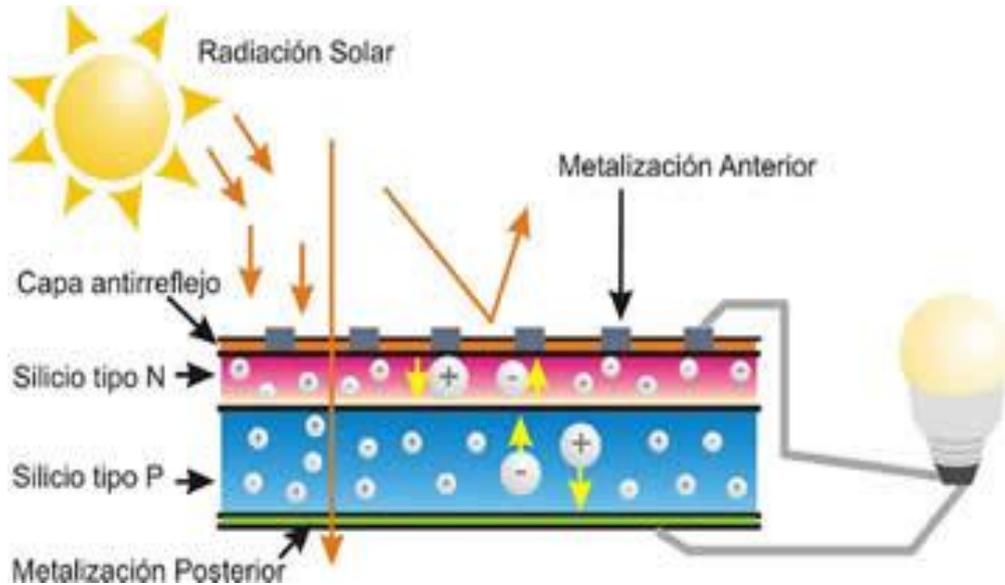


Figura 2: Estructura de una célula

Para poder extraer la corriente, se colocan contactos eléctricos en ambas caras. En la capa P al ser la cara no iluminada, se coloca una película metálica que cubre toda la superficie. En la capa N en cambio se coloca una malla metálica de láminas muy delgadas para dejar al descubierto la máxima superficie. Además, para evitar las pérdidas por reflexión, se texturiza su superficie y se coloca una capa fina de material anti reflectante.

### 1.2.3. Tecnología de células

Aunque el material más utilizado para la fabricación de células fotovoltaicas sea el silicio, en la actualidad existen diferentes tecnologías de células. A continuación se describe de manera breve cada una de ellas y su eficiencia [1].

- **Basada en silicio**

- Silicio monocristalino

A partir de un lingote de silicio se obtiene la oblea cuya estructura cristalina es uniforme. Partiendo de una oblea y tras varias etapas de fabricación, se obtiene la célula. Es una tecnología madura, por lo que su coste ha disminuido de manera



Figura 3: Célula de silicio monocristalino

significativa durante los últimos años. A continuación aparece su eficiencia record obtenida en laboratorio:

- $\eta_{\max\_laboratorio} = 26.6 \%$

- Silicio policristalino

Se obtiene una oblea a partir de un lingote de silicio, cuya estructura cristalina no es uniforme. Su coste es menor que el del silicio monocristalino pero su eficiencia también es menor. A continuación aparece su eficiencia récord obtenida en laboratorio como:



Figura 4: Célula de silicio policristalino

- $\eta_{\max\_laboratorio} = 21.3 \%$

- Células híbridas

Mezclan la tecnología de silicio cristalino en oblea con procesos de lámina delgada. A continuación aparece su eficiencia en laboratorio:



Figura 5: Módulo híbrido

- $\eta_{\max\_laboratorio} = 30.5 \%$

- **Lámina delgada**

Se utilizan capas de material semiconductor muy finas ( $\mu\text{m}$ ). Esta tecnología requiere de un sustrato como soporte, que dependiendo de cuál sea el módulo tiene diferentes características. Su coste es menor que el de los módulos de silicio ya que la célula y el módulo se fabrican simultáneamente.

Su uso está relacionado con la fabricación de módulos flexibles.

- Silicio amorfo (a-Si)

Utilizan sustratos rígidos (vidrio, metal) o flexibles (plásticos). Pueden ser de diferentes colores (marrón rojizo, azul, azul-violeta) y distintas transparencias. Su aspecto es uniforme. A continuación aparece su eficiencia en campo:



Figura 6: Módulo de a-Si

- $\eta_{\max\_laboratorio} = 10.2 \%$

- CIS (Diseleniuro de Cobre e Indio)  
Tienen un aspecto uniforme y suelen ser de color gris oscuro o negro. Su eficiencia es algo superior a las de silicio amorfo.



Figura 7: Célula CIS

- CIGS (Diseleniuro de Cobre, Indio y Galio)  
Su eficiencia en laboratorio es de:
  - $\eta_{\max\_laboratorio} = 21.0 \%$

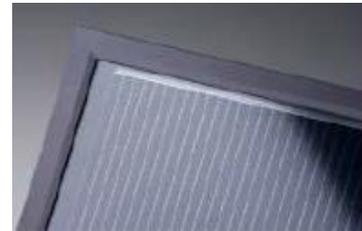


Figura 8: Células CIGS

- CdTe (Telururo de Cadmio)  
Utilizan sustratos rígidos y su aspecto es uniforme. Suelen ser de color verde oscuro o negro. Su mayor inconveniente es la toxicidad que presenta el Cadmio. Su eficiencia en laboratorio es de:
  - $\eta_{\max\_laboratorio} = 21.0 \%$



Figura 9: Módulo CdTe

### • **Concentración fotovoltaica**

Se basan en elementos ópticos que enfocan la luz solar sobre la célula fotovoltaica. Únicamente utiliza radiación solar directa, por lo que es necesario el uso de seguidores y es importante que la situación geográfica sea la correcta. Al utilizar una cantidad menor de material semiconductor, los costes son menores. Se encuentra en estado inicial de comercialización. Su eficiencia máxima en laboratorio es de:

- $\eta_{\max\_laboratorio} = 46.0\%$



Figura 10: Módulo de concentración FV

### • **Perovskitas**

Se basan en un compuesto híbrido con estructura de perovskita formado por un material orgánico-inorgánico. Su proceso de producción es bastante simple y su coste es bajo. En los últimos 5 años han tenido un aumento espectacular de la eficiencia.

Son transparentes, ligeros, flexibles y eficientes.  
Su punto negativo es que tienen problemas de durabilidad. Su eficiencia máxima en laboratorio es de:

$$\eta_{\max\_laboratorio} = 21.0\%$$

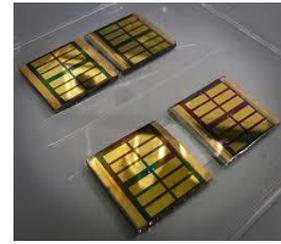


Figura 11: Perovskitas

### 1.3. Integración arquitectónica

Durante los últimos años la energía solar fotovoltaica ha protagonizado una gran evolución e implantación, pero cabe destacar que la mayoría de la potencia instalada a nivel mundial se ha llevado a cabo mediante proyectos de gran capacidad. Sin embargo, la tendencia de futuro apunta hacia el desarrollo de instalaciones de pequeña y mediana potencia (generación distribuida, etc.).

Por ello, la implementación de sistemas fotovoltaicos en proyectos de integración arquitectónica está tomando cada vez mayor consideración. Aunque ya existan varias instalaciones fotovoltaicas en integración arquitectónica, la limitación que tienen es debido a su elevado coste y su compleja implementación por lo que no terminan de penetrar en el mercado. Por lo tanto, es necesario un estudio de diferentes técnicas y materiales para conseguir una implantación más sencilla, teniendo en cuenta que los criterios estéticos son fundamentales en el desarrollo de espacios arquitectónicos.

Las características que tienen los sistemas fotovoltaicos integrados en edificios son:

- No producen ruido.
- No tienen partes móviles.
- Son modulares y fácilmente manejables como elementos de construcción.

Durante los últimos años, la industria de fabricación de módulos fotovoltaicos ha experimentado una gran evolución tecnológica y de reducción de costes. Entre los diferentes materiales que forman el módulo, el vidrio solar representa en torno a un 10% de los costes asociados y es el que menos variaciones ha sufrido a lo largo de los años. Por lo tanto, se ha creído conveniente estudiar el caso de sustituirlo por otro/s materiales que garantice/n las mismas o similares prestaciones.

Aunque el vidrio presenta propiedades ideales como su alta transmisividad y su rigidez estructural, también aporta al módulo un peso elevado y limita su aplicación a superficies planas, además de necesitar un marco y una estructura de soporte. Esta

última característica reduce de manera notoria sus aplicaciones en cuanto a la integración arquitectónica ya que no puede doblarse.

Teniendo en cuenta todo lo mencionado, el presente proyecto propone el desarrollo experimental, la fabricación y el ensayo en un entorno controlado de un módulo solar fotovoltaico modular, integrable y polivalente, capaz de facilitar su utilización como elemento arquitectónico.

## 1.4. El módulo fotovoltaico

Un módulo fotovoltaico se forma uniendo diferentes células en serie y/o paralelo para obtener los valores de tensión y corriente deseados. La tensión e intensidad que es capaz de ofrecer un módulo fotovoltaico depende del número de células que disponga y de la interconexión entre ellas.

Las células que forman un módulo están interconectadas eléctricamente, lo que requiere un aislamiento adecuado. De la misma manera, dado que están expuestos a la intemperie, es necesario que tengan una cierta protección mecánica y una protección frente a agentes atmosféricos como la nieve, lluvia, etc.

### 1.4.1. Componentes y materiales de un módulo fotovoltaico típico

Un módulo fotovoltaico está compuesto por diferentes materiales, tal y como aparece en la Figura 12.

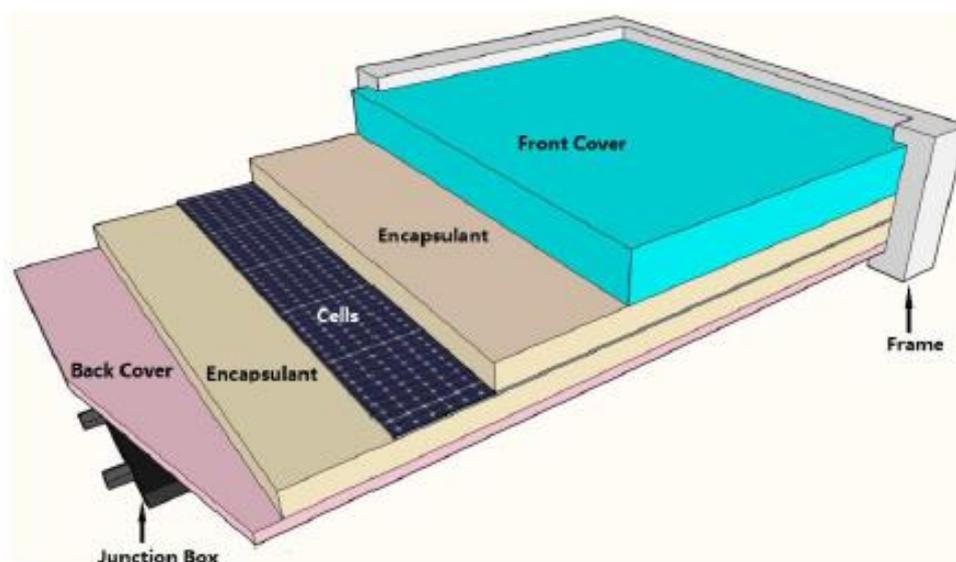


Figura 12: Estructura típica de un módulo fotovoltaico

- **Cubierta frontal**

La cubierta frontal, también denominada superestrato, es la capa superior del sándwich. Necesaria para proteger a las células fotovoltaicas. Es necesario que sea resistente frente a agentes atmosféricos (lluvia, granizo, nieve, etc.) y frente a impactos. Además, es importante que sea capaz de soportar largas exposiciones ante rayos ultravioleta y tener baja resistencia térmica.

Generalmente se utiliza el vidrio templado con bajo contenido en hierro para garantizar una mayor protección frente a impactos e inclemencias en el tiempo. Además tiene una gran resistencia frente a impactos y su transmisión a la radiación solar es excelente.

- **Encapsulante**

Su función es la unión de los diferentes componentes y la protección de las células. Además, maximizan el acoplamiento óptico y protegen a las células de la humedad ya que constituye una barrera frente al oxígeno y vapor de agua. Las propiedades requeridas son; buena transmisión a la radiación solar, estabilidad a altas temperaturas, alta resistividad, baja absorción de la humedad, alta resistencia a los rayos UV y elevada adherencia. Para ello se utilizan polímeros termoplásticos y transparentes. Hoy en día el material más utilizado es el EVA (Etileno Vinil Acetato). Su absorción óptica es baja y su índice de refracción está adaptado para minimizar la reflectancia producida en la interfaz. Asimismo relaja el estrés termomecánico generado entre las células y la cubierta frontal.

A lo largo de los años, en la industria fotovoltaica se han utilizado diferentes tipos de materiales poliméricos como etileno vinil acetato (EVA), la silicona, polivinil butiral (PVB), ionómeros y poliolefina termoplástica (TPO) [4]. El crecimiento del mercado fotovoltaico en los últimos años ha llevado a aumentar el número de proveedores de encapsulantes como el EVA. De la misma manera también ha aumentado el número de fabricantes de encapsulantes diferentes al EVA, logrando en 2013 los valores que aparecen en la siguiente figura.

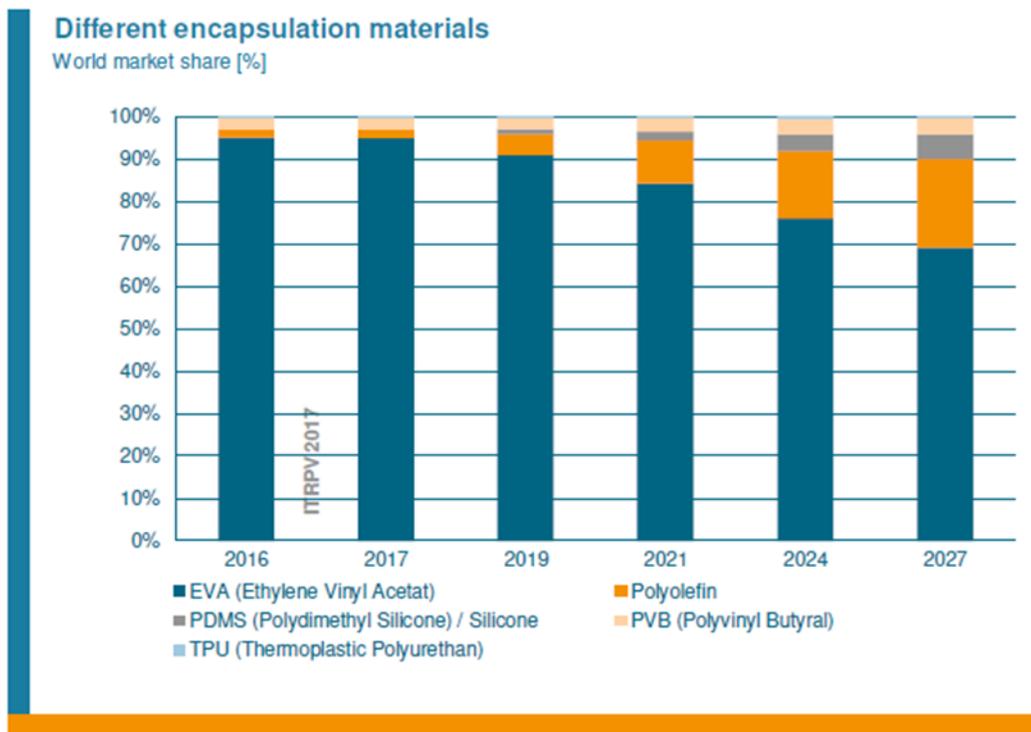
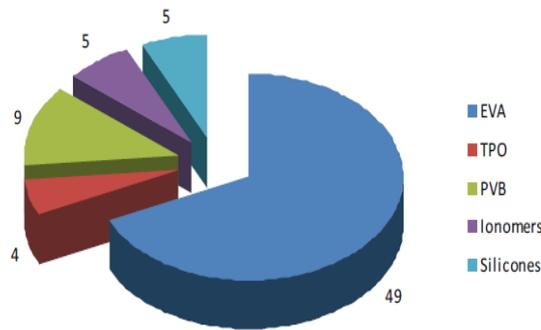


Figura 13: Número de productos de los diferentes encapsulantes en 2013 y cuota de mercado de los diferentes encapsulantes.[3]

Como se puede observar, aunque existan diferentes tipos de encapsulantes, el predominante es el EVA, superando el 90% del mercado en 2016 debido a su buena resistencia a la intemperie, su alta transparencia óptica, su sencillo procesamiento y su bajo coste [3].



Figura 14: Encapsulante EVA

Se debe almacenar en oscuridad y con la menor cantidad posible de humedad, ya que la luz y la humedad hacen que se degrade rápidamente. Se recomienda almacenarlo a una temperatura inferior a 30 °C (óptima 22 °C) y una humedad relativa inferior al 50% por un tiempo que no supere los 6 meses después de su producción, sin luz solar directa y siempre envuelto en el material de embalaje original.

En el mercado existe una amplia selección de diferentes tipos de EVA según su fabricante (EVASA, STRE, Solutia, Mitsui, DuPont, Bridgestone, etc.). Cada uno de los fabricantes ofrece diferentes formulaciones con diferentes propiedades de curado y diferentes niveles de curado recomendados. Estos niveles de curado recomendados van desde el 70% hasta el 90% [12].

Debido a que el material encapsulante y la cubierta posterior representan costes importantes en la fabricación de módulos fotovoltaicos, se está investigando en su reducción, manteniendo al mismo tiempo las propiedades que garanticen una larga vida útil del módulo.

- **Células**

La célula fotovoltaica es el elemento esencial de un módulo fotovoltaico, ya que es el componente que transforma la energía del sol en energía eléctrica. Las células más comunes en la industria son las de silicio cristalino (c-Si). Están basadas en una unión PN con un contacto en cada región, lo que hace que se pueda obtener electricidad a partir de ellas.

Para poder extraer la energía eléctrica están compuestas por *fingers* y *buses*, como se aprecia en la siguiente figura.

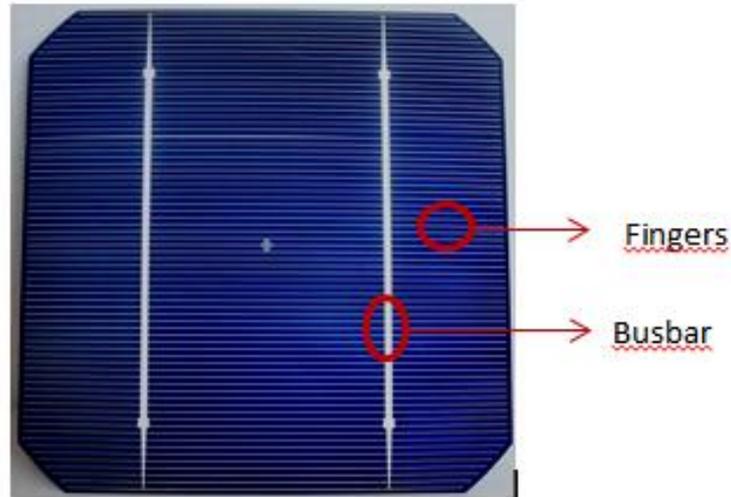


Figura 15: Cara frontal de una célula fotovoltaica con los contactos

Los *fingers* son las líneas blancas más estrechas de las células. Transportan la electricidad producida en cada punto hasta el *bus*. Por lo tanto, los *buses* son las líneas perpendiculares a los *fingers*. Ambos elementos están formados por plata. Dependiendo de la célula, el número de *buses* puede variar (normalmente 2-3). Sobre ellas se sueldan las cintas de *ribbon* que conectan todas las células, tal y como se aprecia en la siguiente figura:

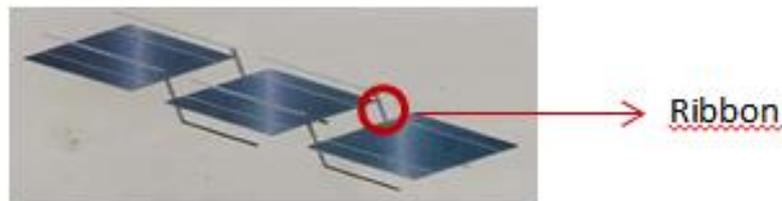


Figura 16: Interconexión de células

Al mismo tiempo, los *ribbon* van unidos por una cinta metálica llamada *interconexión de strings*. Esta parte suele estar situada en la parte superior o inferior de los módulos y es algo más gruesa que los *ribbon*.

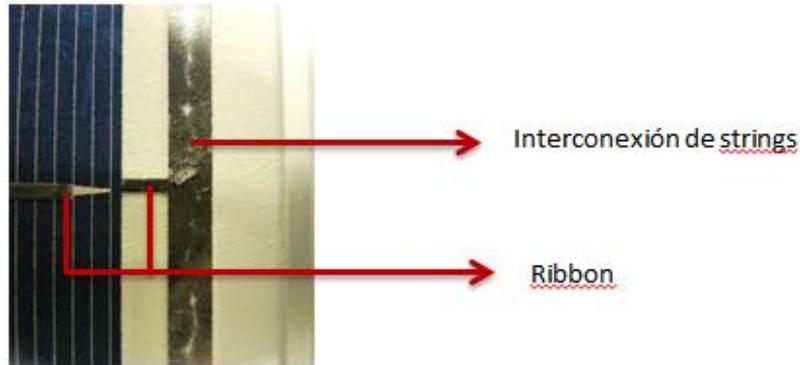


Figura 17: Detalles de los ribbon y la interconexión de strings

- **Cubierta posterior**

Su función, al igual que la cubierta frontal es la protección del módulo. Es necesario que lo proteja frente a los diferentes agentes atmosféricos y la humedad. Los materiales más utilizados son los materiales acrílicos, siliconas o fluoruro de polivinilo (PVF), denominado comercialmente como Tedlar.

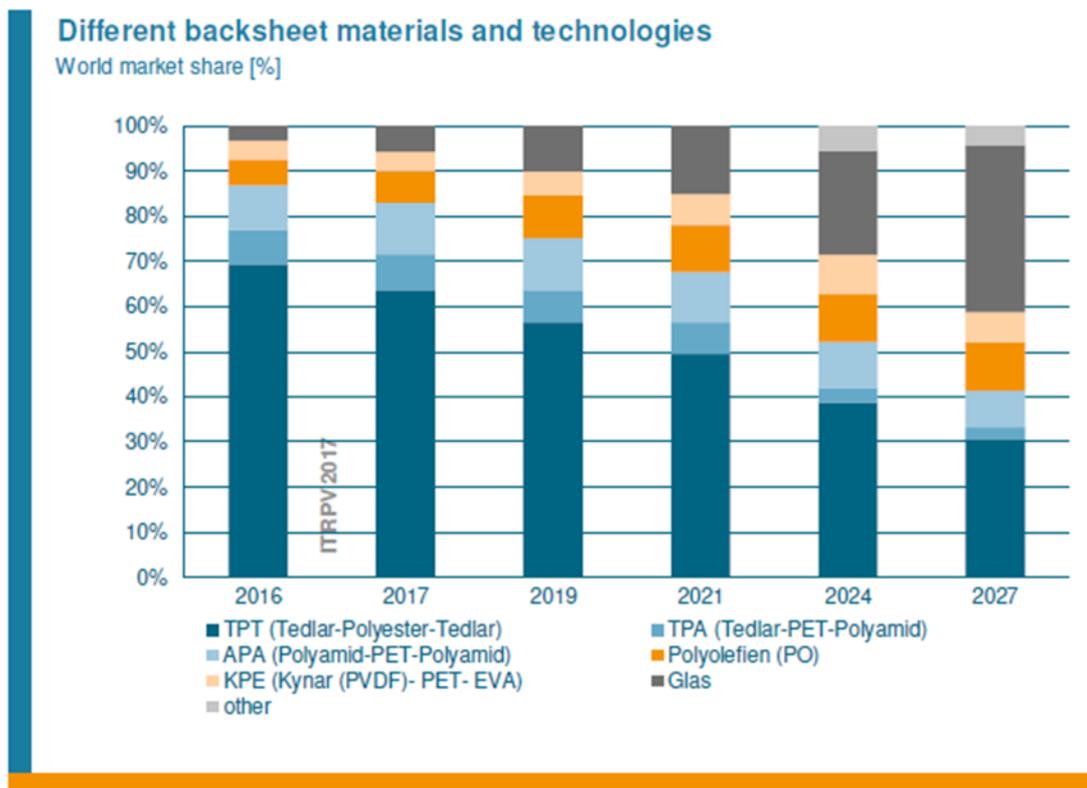


Figura 18. Diferentes cubiertas posteriores utilizadas.[3]

- **Marco**

Se utiliza para dar rigidez y resistencia mecánica al módulo. Para su fabricación se utiliza aluminio anodizado o acero inoxidable.

- **Conexión eléctrica**

Después de interconectar todas las células del módulo, se sacan por la parte posterior del módulo dos bornes de conexión (positivo y negativo). Suelen incorporarse en una caja fabricada con materiales plásticos y resistentes a altas temperaturas.

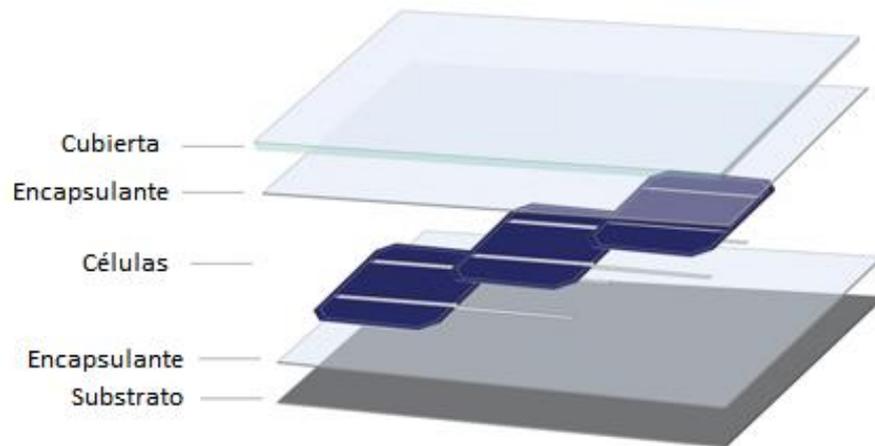


*Figura 19: Caja de conexiones.*

#### **1.4.2. Procesos actuales de fabricación de módulos fotovoltaicos**

La laminación o encapsulado es un paso crucial en el proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos. Dado que los módulos fotovoltaicos tienen que soportar una exposición prolongada en el exterior, la encapsulación de las células solares por medio de la laminación es una etapa muy importante para asegurar un funcionamiento óptimo en el exterior.

Durante el proceso de fabricación de módulos fotovoltaicos por un lado se interconectan las células solares por soldadura, tanto en serie como en paralelo y por otro lado, se encapsulan en una estructura resistente a la intemperie y que a la vez proporcione un soporte mecánico. El laminado está compuesto por substrato – encapsulante – células – encapsulante – cubierta, como se puede apreciar en la siguiente figura:



*Figura 20: Distintos componentes a laminar de un módulo fotovoltaico*

Hoy en día, la manera más común para laminar un módulo fotovoltaico de silicio cristalino en la industria es utilizando una laminadora. Esta máquina tiene diferentes parámetros de control como son la temperatura, el vacío, la duración del proceso y la presión, que se controlan independientemente para proporcionar unas condiciones óptimas de proceso.

El proceso de laminación en la industria se encuentra totalmente automatizado. Las cadenas de producción de módulos solares siguen un proceso determinado que permite producir gran cantidad de módulos por hora.

Partiendo de las células solares en bruto, pasan por una línea de soldado de tabber y stringers que dota a cada célula de los conectores necesarios para su soldado en serie.

Seguidamente se realiza un interconexionado entre las distintas células de forma que se consiga una conexión en serie con un número determinado de células que componen el módulo.

A continuación, pasan por una línea de laminación automática, la cual laminará el sándwich formado por distintas capas de vidrio, encapsulante, células y backsheet. Esta laminación se llevará a cabo con distintos tiempos y temperaturas en función de los materiales utilizados. Seguidamente se procede a una inspección antes del enmarcado del módulo.

Una vez colocado el marco exterior, se procede a la instalación de la caja de conexiones por la parte trasera del módulo, terminando con un test de funcionamiento.

## 2. OBJETO

El objeto de este Trabajo Fin de Master es desarrollar un proceso de laminado de módulos fotovoltaicos empleando materiales alternativos a los convencionales con el que fabricar módulos solares que puedan ser utilizados como elementos arquitectónicos.

Las tareas desarrolladas en este TFM forman parte del proyecto AISOVOL: *Solución de generación fotovoltaica para su uso como material constructivo alternativo en la edificación (AiSoVol)*. Está financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad y cofinanciado por la Unión Europea, tras haber sido seleccionado dentro del Programa Estatal de I+D+i orientado a los retos de la Sociedad. Se enmarca en el RETO 3: “Reto energía segura, eficiente y limpia”.

En este Trabajo Fin de Máster se ha estudiado y ensayado el proceso de laminación de módulos fotovoltaicos utilizando materiales alternativos como el policarbonato en sustitución al vidrio y un entramado estructural en sustitución al marco de aluminio a fin de:

- Fabricar un módulo solar fotovoltaico “plug&play”, integrable y polivalente, que pueda utilizarse como elemento arquitectónico de fácil integración.
- Proveer a los arquitectos de recursos arquitectónicos según los requisitos necesarios, que permitan dar solución a las necesidades de integración que demanda el sector.

Para dar al módulo las características y cualidades necesarias para que su integración arquitectónica sea más sencilla, se han modificado sus componentes para satisfacer las siguientes necesidades:

- **Flexibilidad:** Se sustituye el vidrio templado por el policarbonato compacto, un material termoplástico. Sus características son similares a las del vidrio ya que tiene una transmisibilidad adecuada en el espectro visible y una alta resistencia ultravioleta del 98%. En cuanto a la resistencia mecánica, es superior a la del vidrio, ya que su límite de elasticidad es superior a  $60 \text{ N/mm}^2$ . Sus principales características para integración arquitectónica son su flexibilidad y su ligereza, pudiendo utilizarlo en superficies curvas. Esto posibilita su integración en infinidad de aplicaciones como BAPV (adaptación de los módulos ya integradas en los edificios), BIPV (integración de los módulos como parte estructural del propio edificio), transporte y mobiliario urbano.

- **Entramado estructural:** Se elimina el marco de aluminio, que es lo que le da resistencia al módulo, por lo que es necesario un material que le aporte la suficiente resistencia estructural. Para ello se utilizará un tejido entramado basado en fibras de poliéster con recubrimiento trenzado de polietileno de alta densidad (High Modulus Polyethylene, HMPE), ya que tiene una alta resistencia mecánica y a la radiación ultravioleta.
- **Ligereza:** La sustitución del vidrio templado y del marco de aluminio por una lámina de tejido entramado, convierte el módulo en un elemento mucho más ligero. Esto permite su utilización en estructuras más ligeras y facilita su manipulación, lo que supone una reducción de costes de transporte e instalación.
- **Geometría variable:** Debido a su ligereza y su fácil manipulación que permiten el corte y mecanizado a través de elementos comunes en el mercado, se puede variar su geometría para atender a las demandas estéticas de los diseñadores.
- **Elemento constructivo:** Para que el módulo fotovoltaico sea adecuado como elemento constructivo, se incorpora una lámina posterior de poliestireno extruido. De esta manera cumple los requisitos mínimos establecidos por el Documento Básico de Ahorro y Energía del CTE.
- **Caja de conexiones:** Debido a la sustitución de los materiales anteriormente nombrados, se reduce el espesor del módulo lo que hace necesario el diseño de un nuevo tipo de caja de conexión. Éstas deben adaptarse y mantener su funcionalidad y su grado de protección.

## 2.1. Desarrollo de un proceso de laminado compatible con los nuevos materiales

Por lo tanto, para cumplir con las características necesarias para la integración arquitectónica de un módulo fotovoltaico, se han elegido los siguientes materiales. En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** se pueden apreciar las diferencias entre los materiales utilizados en un módulo fotovoltaico típico y los propuestos en el presente proyecto.

Módulo FV típico	Módulo FV materiales alternativos
Vidrio templado	Policarbonato
EVA	EVA
Células fotovoltaicas	Células fotovoltaicas
EVA	EVA
Backsheet	Entramado
Marco	EVA
	PPE

Tabla 1: Diferencias entre los materiales utilizados

En comparación con los módulos convencionales, los nuevos materiales son el Policarbonato y el entramado, que sustituyen al vidrio y al marco de aluminio.

- Policarbonato: Es un material termoplástico cuyas propiedades son muy interesantes. Sus características principales para sustituirlo por el vidrio son: su ligereza, transparencia óptica y la posibilidad de doblarlo en frío.
- Entramado estructural: Debido a la eliminación del marco de aluminio de los módulos convencionales, es necesario un material que aporte una resistencia estructural necesaria pero que al mismo tiempo permita la flexibilidad requerida. Para ello, se ha introducido una lámina de entramado estructural que aporta el refuerzo necesario a los módulos fotovoltaicos.

## 2.2. Validación del funcionamiento

Otro de los objetivos que se deberá cumplir es la validación del funcionamiento de los laminados fabricados. Para ello se realizarán los consiguientes ensayos de caracterización así como pruebas de resistencia frente a acciones mecánicas y climáticas.

Los ensayos de evaluación del funcionamiento están basados en gran medida en la normativa de cualificación de módulos fotovoltaicos que es aplicable para llevar a cabo la certificación y posterior uso del módulo fotovoltaico.

### 3. LAMINACIÓN

#### 3.1. Introducción

En el capítulo anterior se ha descrito el proceso de laminación actual en plantas de producción de paneles solares. Dentro de las instalaciones de CENER, se ha seguido un proceso de laminación de forma manual, realizando los procesos uno a uno a nivel de laboratorio.

El proceso de laminado consiste en realizar vacío para extraer los posibles gases que se puedan encontrar en el módulo fotovoltaico y aplicar presión para asegurar que todos los materiales queden unidos. Este proceso se puede apreciar de manera sencilla y visual en la siguiente figura.

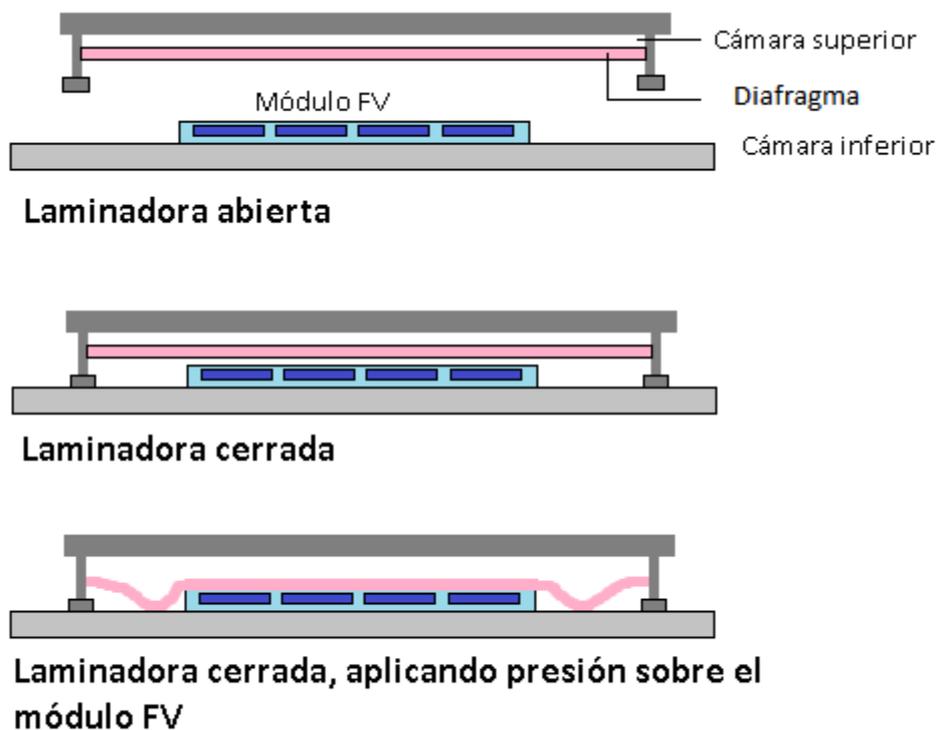


Figura 21: Proceso de laminado

La obtención de un buen encapsulado puede prevenir de manera significativa la degradación de las células solares, así como la aparición de problemas de humedad o posibles cortocircuitos. Una laminación correcta debe mantener las células solares en buen estado durante al menos 25 años.

Para controlar que el laminado sea el correcto, debe cumplir las siguientes especificaciones:

- Inspección visual correcta.
- Buena adherencia entre las diferentes capas.
- Grado de curado del EVA suficiente.

En el capítulo 4 se describirán estas técnicas en mayor profundidad.

### 3.2. Descripción de la laminadora

La laminadora es una máquina controlada por un operador en la que se lamina el material introducido en su interior, en este caso un módulo fotovoltaico. Tal y como se puede observar en la siguiente figura, está compuesta por dos cámaras, la cámara superior y la cámara inferior.



Figura 22: Esquema de una máquina laminadora

La máquina está provista de una tapa que cierra los bordes herméticamente. La tapa tiene una cámara interna y un diafragma que separa esa cámara (cámara superior) de la cámara que contiene el módulo (cámara inferior). En ambas cámaras se puede realizar vacío independientemente. La muestra se introduce en la cámara inferior, entre dos láminas de teflón. Esta configuración permite al módulo estar en vacío mientras se ejerce una presión mecánica sobre él.

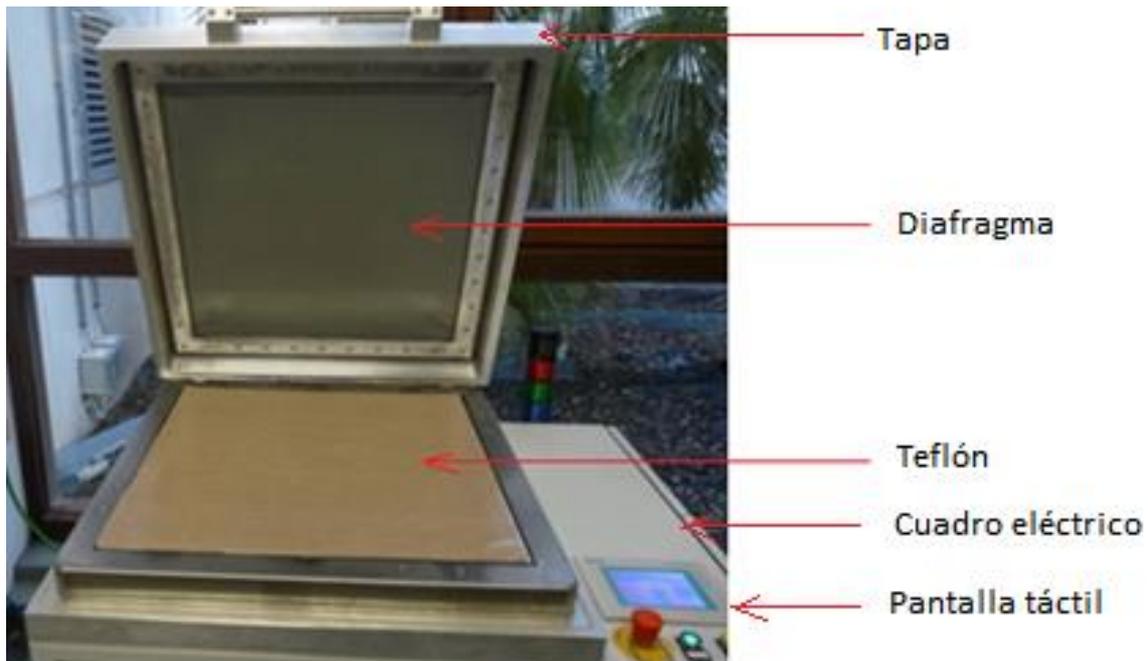
Para aplicar calor a la muestra, la máquina está dotada de una placa de aluminio que se calienta a través de tres resistencias de acuerdo a la configuración de sus parámetros. Cabe la posibilidad de añadirle un circuito hidráulico para refrigerar la muestra laminada.

El cuadro eléctrico está situado en un lado de la máquina como se aprecia en la Figura 23. Debajo de la placa metálica se encuentra el circuito neumático, protegido por la

caja de protección, que incluye la bomba de vacío y el circuito hidráulico. En la parte trasera se encuentra la alimentación eléctrica, hidráulica y neumática.

La laminadora se controla a través de una pantalla táctil LCD. Esta pantalla permite configurar, editar y controlar los valores de los parámetros del controlador, para supervisar y controlar las alarmas, gestionar recetas, etc.

En la siguiente figura se pueden apreciar las diferentes partes de la laminadora:



*Figura 23: Partes de la laminadora*

En el presente TFM se ha utilizado la laminadora L036A fabricada por la empresa P. Energy [5].

### 3.2.1. Funcionamiento de la laminadora

Para comenzar, se debe abrir la bomba y encender la laminadora. A continuación, se debe introducir la receta deseada mediante la pantalla táctil con los parámetros de temperatura, presión y tiempo. Una vez introducida la receta, se calentará la laminadora hasta que alcance la temperatura programada. Al alcanzar ésta temperatura, se introduce la muestra entre las dos láminas de teflón, se cierra la máquina y comienza el proceso de laminación como se describe en la Figura 24.

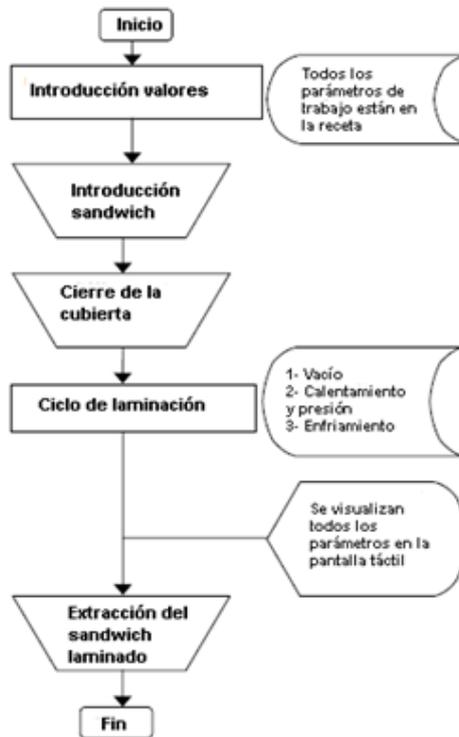


Figura 24: Descripción de los ciclos de trabajo

El proceso de laminación se puede descomponer en tres etapas (ver Figura 25):

- a. Se realiza vacío en las dos cámaras, obteniendo valores entre 0-10 mB. Esta etapa es importante para extraer el aire, la humedad u otros gases que puedan encontrarse entre las diferentes capas del módulo. La duración de este proceso depende de la receta utilizada pero suele ser de unos pocos minutos.
- b. A continuación la cámara de arriba se llena de aire comprimido de forma que el diafragma presiona el material que se quiere laminar. Mientras tanto, tiene lugar el curado del EVA, que significa que se forman enlaces químicos transversalmente entre las moléculas largas, que antes del curado, solamente estaban unidas entre sí débilmente. El plástico entonces adquiere propiedades de elastómero.
- c. Se realiza vacío en la cámara de arriba y se rompe el vacío en la cámara de abajo, de esta forma se puede abrir la cámara y finaliza el laminado.

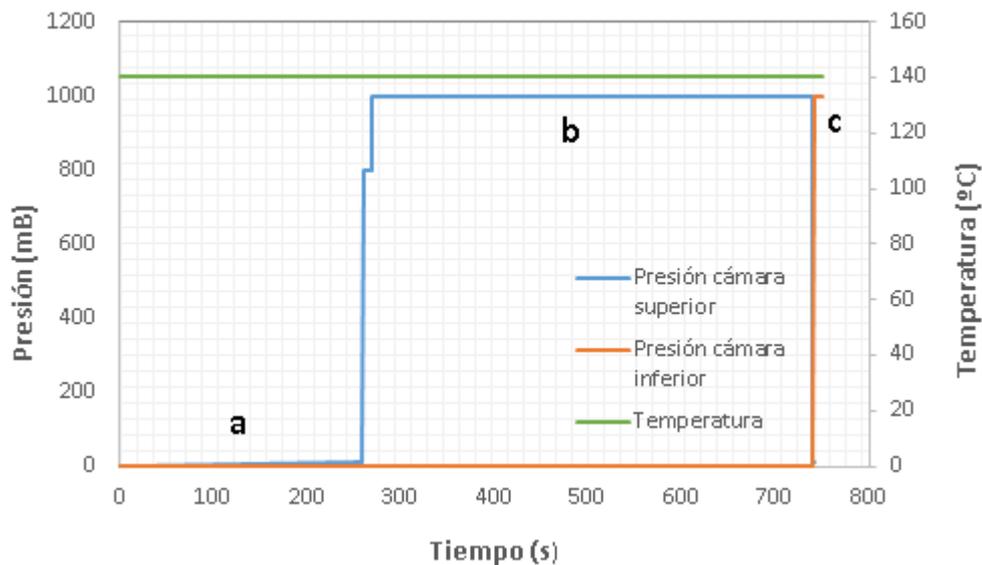


Figura 25: Temperatura y presión de la laminadora durante el proceso de laminación

La temperatura se mantiene constante a lo largo de todo el proceso, ya que la muestra se introduce cuando la laminadora ya ha alcanzado la temperatura deseada y se extrae cuando termina el proceso, que está a la misma temperatura.

### 3.3. Descripción de los materiales utilizados y sus especificaciones

#### 3.3.1. Cubierta frontal

En el presente trabajo fin de máster se ha investigado la posibilidad de emplear policarbonato en sustitución al vidrio con el objetivo final de fabricar módulos fotovoltaicos aptos para su utilización como elemento arquitectónico de fácil integración. El policarbonato que se ha utilizado es el producido por la empresa Sabcic [6] cuyas especificaciones aparecen en el Anexo 1.

Este producto es una lámina transparente de policarbonato con protección UV en ambas caras. Debido a su excelente resistencia al impacto (200-300 veces la del vidrio), es un buen candidato para una amplia variedad de aplicaciones de edificación y construcción. Además, es un material ligero (6 veces más ligero que el vidrio), estable ante radiaciones ultravioleta y se puede doblar en frío con facilidad, lo que supone que pueda adoptar formas curvas.

El estudio se realizará para láminas de policarbonato de dos espesores diferentes, uno de ellos de 2 mm de espesor y el otro de 4 mm. El estudio se ha hecho utilizando

láminas de policarbonato de dimensiones 165 mm x 165 mm y láminas de 400 mm x 400 mm.

### 3.3.2. Encapsulante

El encapsulante utilizado en este TFM es EVA suministrado por la empresa STR y cuyas especificaciones aparecen en el *Anexo 2*. En capítulos posteriores se nombrará este EVA como EVA convencional o EVA STRE. Las condiciones de laminación propuestas por el fabricante son: temperatura de 145 °C, 3 minutos de vacío y 12 minutos de curado. Estas condiciones dependen de la laminadora. En el caso de laminaciones industriales, se aumenta la temperatura hasta 150-152 °C reduciendo el tiempo con el objetivo de conseguir un mayor número de muestras en menor tiempo. Este EVA del que dispone CENER, se encuentra actualmente en un proceso de degradación, ya que se han sobrepasado las fechas de caducidad. No obstante, se ha utilizado para realizar pequeñas muestras continuando con el trabajo anterior en la búsqueda de una receta óptima para este proceso de laminación. Hay que señalar que el espesor de este EVA es de 0,38 mm, dato que se deberá tener en cuenta a la hora de realizar los laminados.

Una de las conclusiones obtenidas a raíz de las diferentes pruebas de laminación, que se detallarán en el Capítulo 5, es que se necesita un EVA de baja temperatura de curado para no dañar las propiedades del policarbonato. Junto a los resultados obtenidos del anterior trabajo de investigación realizado en el campo de laminados fotovoltaicos, y añadiendo los resultados que se expondrán en apartados posteriores, se ha decidido utilizar EVA HC-D80-120 de la empresa HUICHI GLASS. Este EVA presenta temperaturas de curado entre los 80 °C y 120 °C. Las especificaciones aparecen en el *Anexo 3*. En capítulos posteriores se nombrará este EVA como EVA de baja temperatura. A diferencia del EVA con el que ya disponía CENER, éste EVA de baja temperatura tiene 3 espesores distintos: 0.25 mm, 0.5 mm y 0.76 mm. Para igualar los experimentos se ha escogido el espesor de 0,76 mm, equivalente a utilizar 2 capas de espesor de 0.38 mm del EVA convencional.

### 3.3.3. Célula fotovoltaica

Las células utilizadas para este proyecto son las suministradas por ITER a CENER. Se trata de células de 2 buses, fabricadas en Silicio Policristalino. Tienen unas eficiencias

relativamente bajas. A continuación se muestran las características de las células medidas en laboratorio, previas al proceso de laminación. En concreto aparecen las medidas de dos células suministradas por ITER. Todas las utilizadas son de características similares a estas.

Muestra	Voc (V)	Isc (A)	Pot max (W)	Vmax (V)	I <sub>max</sub> (A)	FF (%)	Sup (cm <sup>2</sup> )	Ef (%)
Célula ITER-01	0.619	8.19	3.86	0.509	7.58	76.2%	243.78	15.84
Célula ITER-02	0.619	8.18	3.87	0.508	7.61	76.3%	243.78	15.87

*Tabla 2: Características eléctricas de las células AISOVOL – ITER.*

Por otro lado, para determinados ensayos también se han utilizado células de Silicio Monocristalino de 3 buses. En concreto se han utilizado células de referencia disponibles en los laboratorios de CENER. En la siguiente Tabla se muestran las características de estas células.

Muestra	Voc (V)	Isc (A)	Pot max (W)	Vmax (V)	I <sub>max</sub> (A)	FF (%)	Sup (cm <sup>2</sup> )	Ef (%)
B01	0.641	9.12	4.676	0.545	8.58	80.0%	242.40	19.29
B02	0.641	9.12	4.687	0.547	8.57	80.2%	242.40	19.34

*Tabla 3: Características eléctricas de las células Monocristalinas de CENER.*

Comparando ambas Tablas, se observa una clara diferencia entre los distintos tipos de células. En este caso, las células monocristalinas cuentan con más eficiencia que las policristalinas. Este hecho ya se ha comentado en el capítulo 1.2.1.2. Tecnología de células.

### 3.3.4. Entramado estructural

Debido a la eliminación del marco de aluminio, el material que se utilizará para dar una cierta resistencia al módulo será un tejido entramado basado en fibras de poliéster con recubrimiento trenzado de polietileno de alta densidad (HMPE), laminado entre dos capas de tafetán de poliéster con tratamiento anti ultravioleta. Las fibras de este tejido van entrelazadas para que las fuerzas mecánicas que soportan el módulo se distribuyan de manera uniforme a lo largo de todo el módulo.

El entramado utilizado es un material que se utiliza en la fabricación de velas para la navegación, suministrado por la empresa *Sailcloth Technology* cuyas especificaciones aparecen en el *Anexo 4*. En la siguiente figura se puede apreciar una imagen de este material.



*Figura 26: Entramado C648*

### 3.3.5. Cubierta trasera

La cubierta posterior de un módulo fotovoltaico tiene como finalidad protegerlo de la humedad y los diferentes agentes atmosféricos, además de actuar como aislante eléctrico. En la mayoría de los casos es una lámina polimérica multicapa. Los materiales comúnmente usados son:

- TPT (Tedlar/Poliéster/Tedlar).
- TPE (Tedlar/Poliéster/EVA).
- PPE (Poliéster/Poliéster/EVA) .
- PVDF (Fluoruro de polivinilideno).

En el presente TFM se ha utilizado como cubierta un PPE cuyas especificaciones aparecen en el *Anexo 5*.



*Figura 27: Rollo de PPE*

## 3.4. Proceso de laminación

A continuación, se describe el proceso de laminación seguido en el laboratorio de células, dentro de CENER. Este proceso está descrito como un método de ensayo.

### 3.4.1. Requisitos previos

#### a. Limpieza

El proceso de montaje del sándwich, se debe realizar sobre una superficie dura y completamente limpia, de mármol a ser posible. Para ello, se limpiará la superficie con un paño empapado en alcohol isopropílico (IPA).

De la misma manera, el proceso de soldado de la célula se debe realizar sobre una superficie dura (en este caso de madera, metal o metacrilato) y completamente limpia, limpiándola de la misma manera que en el caso anterior.

#### b. Estado de mantenimiento y calibración de los equipos

Los equipos utilizados deberán estar debidamente mantenidos de acuerdo con lo establecido en sus correspondientes instrucciones técnicas.

### 3.4.2. Equipos, instrumentos y patrones

Para poder llevar a cabo el proceso de laminación se necesitarán los siguientes equipos e instrumentos:

- Superficie de mármol: Necesaria para cortar las diferentes capas que forman el laminado y montar el sándwich.
- Regla rígida: Para realizar todas las medidas necesarias previas al corte de los materiales.
- Herramientas de corte: Para confeccionar a medida las diferentes partes del sándwich.
- Laminadora: Equipo controlado por un técnico cualificado que será capaz de controlar diferentes parámetros (temperatura, vacío y el tiempo de proceso).
- Equipo de soldadura: Para el soldado de las diferentes células. Necesario que alcance una temperatura entre 100-150 °C.
- Flux: Alcohol que se utiliza para limpiar los puntos a soldar y quitar el óxido para que la soldadura sea correcta y no quede fría. La temperatura a la que los componentes del flux se vuelven activos es de 100-120 °C. Se verterá una pequeña cantidad en un recipiente de vidrio para facilitar su aplicación.
- Pincel: Necesario para aplicar el flux.
- Bobina de *ribbon*: Elemento a soldar en la célula que permite la unión de varias de ellas.

### 3.4.3. Procedimiento

#### a. Laminado

Para comenzar con el proceso de laminación, se pondrá en marcha la laminadora y se eliminarán todas las alarmas que aparezcan. A continuación, se arrancará la bomba 1-2 horas antes de comenzar a laminar. Esta bomba sirve para poder realizar vacío y aplicar presión durante el proceso de laminación.

En primer lugar y antes de nada se debe elegir el tamaño del módulo que se vaya a laminar. En función de su dimensión se recortarán las diferentes capas del sándwich. El substrato PPE se recortará de su mismo tamaño. Para ello, se puede utilizar un cúter o tijeras con una regla, o una guillotina de papel. Éste último método es con el que mejor resultado se obtiene.



*Figura 28: Lámina de PPE*

A continuación, se cortarán mediante un cúter tres capas EVA de tamaño ligeramente superior al del PPE (3-4mm).



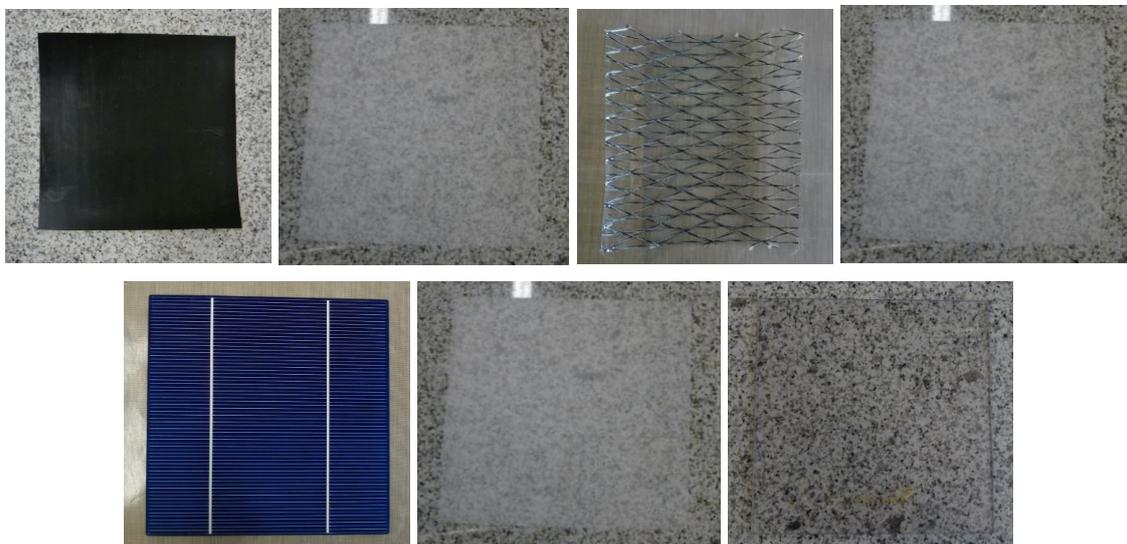
*Figura 29: Lámina de EVA*

De la misma manera, se recortará una lámina de entramado estructural del mismo tamaño que las láminas de EVA.

Una vez recortados los diferentes materiales del sándwich, se procederá a su limpieza. En el caso del policarbonato, se limpiará por ambas caras con IPA y a continuación con una pistola de nitrógeno, mientras que el substrato sólo se limpiará con IPA la parte que no contenga EVA. En el caso del encapsulante y del entramado en cambio, no se debe limpiar con IPA por lo que únicamente se limpiará con la pistola de nitrógeno.

Después de limpiar todos los materiales a utilizar, se comenzará con la preparación del sándwich. Para ello, se irán colocando las diferentes capas desde la cubierta posterior, hasta el policarbonato, tal y como aparece a continuación.

PPE → EVA → Entramado → EVA → Células → EVA → PC



*Figura 30: Orden de los materiales utilizados para realizar el sándwich completo*

Por lo tanto, la primera capa es el substrato PPE. Las dos caras de este material son diferentes, ya que una es más brillante que la otra. Para preparar el sándwich, la cara más brillante, que al tacto es la más adherente, debe quedar hacia el encapsulante EVA. Antes de colocar la segunda capa, se cortarán 4 tiras de cello que irán colocadas en cada esquina del substrato (en la cara menos brillante), cuya función es sellar el sándwich una vez colocadas todas las capas y evitar que se produzca su desplazamiento. A continuación, se coloca la primera capa de EVA. Las caras de este material también son diferentes, siendo una más brillante que la otra. En este caso, la cara menos brillante del EVA debe quedar en contacto con el PPE. La tercera capa es el entramado, que tiene las mismas propiedades por ambas caras, de forma que su posición es irrelevante. Posteriormente, se coloca otra capa de EVA, quedando su cara menos brillante en contacto con el entramado. Después se coloca la célula y a

continuación otra lámina de EVA, esta vez con la cara brillante en contacto con la célula. Para finalizar, se coloca la lámina de policarbonato, el cual no importa hacia qué lado colocarlo ya que por ambas caras es idéntico. Tras colocar esta última capa, se cierra el sándwich con los 4 cellos colocados al principio.

Para los laminados realizados en tamaños de policarbonato de 400 x 400 mm se sigue el mismo proceso que el descrito anteriormente, pero esta vez los tamaños de los recortes de los materiales han de ser más grandes. Además, es necesario tener especial cuidado con la colocación de las 4 células entre las diferentes capas del sándwich, ya que éstas son muy frágiles al ser manipuladas. Es necesario colocarlas centradas para evitar que tras el laminado, el aspecto visual sea asimétrico. En la siguiente figura se puede observar las dimensiones de estos módulos de 4 células.

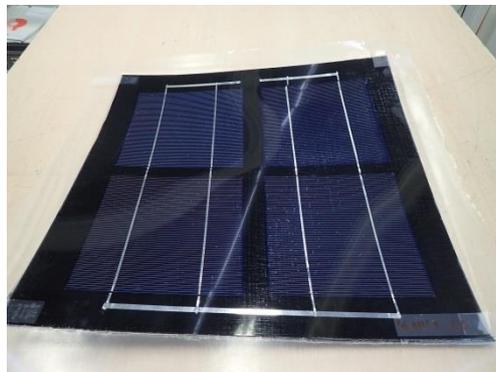


Figura 31: Módulo de 4 células con dimensiones 400 x 400 mm.

Cabe destacar, que también se han realizado laminaciones más sencillas en el presente TFM para la caracterización de diferentes técnicas. El sándwich sencillo está formado por los siguientes materiales:

PPE → EVA → EVA → PC



Figura 32: Orden de los materiales necesarios para realizar el sándwich sencillo.

Su proceso de construcción es idéntico, pero más sencillo. Lo único a tener en cuenta es que las dos caras brillantes del EVA queden en contacto.

Una vez que se ha finalizado con el montaje del sándwich, éste se introduce en la laminadora entre las dos láminas de teflón. Es importante su colocación ya que el policarbonato al ser la capa rígida, debe estar en la parte inferior de la laminadora, en contacto con la lámina de teflón inferior la cual está en contacto con la placa de aluminio para evitar la ruptura de las células. Hay que prestar atención al introducir el sándwich en la laminadora, la cual debe estar a la temperatura que se vaya a realizar la laminación, para que toda la placa esté con una temperatura homogeneizada y tenga lugar el curado del EVA. Al finalizar el laminado, se extraerá la muestra mediante guantes térmicos para evitar cualquier tipo de quemadura y se dejará enfriar sobre la superficie de mármol. Éste último proceso de enfriamiento puede ser susceptible de variabilidades, ya que tendrá especial interés en el pandeo posterior del laminado. En el caso de laminar con EVA de baja temperatura se usa únicamente una capa de espesor 0.76mm.

#### **b. Soldadura de la célula**

Antes de realizar el proceso de laminación, se debe realizar la soldadura de la célula, para posteriormente poder extraer energía de ella.

El primer paso a llevar a cabo es el soldado del *ribbon* a la célula. Éste es un proceso delicado ya que la célula es un elemento muy frágil. Principalmente se corta una tira de *ribbon* de longitud superior al bus para poder manejarla con facilidad. Para facilitar la soldadura, se va aplicando flux en el *ribbon* en pequeñas cantidades, evitando que pueda caer alguna gota sobre la célula, ya que afecta a la capa antireflectante.

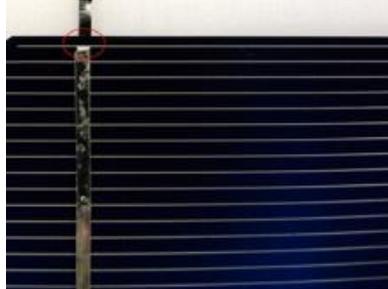


*Figura 33: Soldadura de la parte superior de la célula*

Durante la soldadura, se deberá colocar una máscara para protegerse de los posibles gases que deriven del soldado.

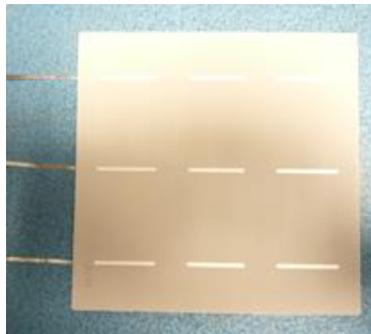
Existen varios factores a tener en cuenta durante el proceso:

- Asegurar que la tira de *ribbon* queda soldada a la célula.
- No ejercer una fuerte presión, evitando que la célula se agriete.
- Dejar un pequeño espacio entre el extremo del *ribbon* y el de la célula para evitar que se produzcan cortocircuitos con la parte posterior de la célula.



*Figura 34: Extremo entre el ribbon y el extremo de la célula*

La soldadura se debe realizar tanto por la cara superior como por la inferior de la célula. Además es importante que al realizar la soldadura del *ribbon* por la cara superior, queden excedentes de éste por un lado de la célula, mientras que al realizar la soldadura por la cara inferior, los excedentes queden por el lado contrario.



*Figura 35: Parte posterior de la célula*

Para finalizar con el proceso de soldadura, se deberán soldar los *ribbon* de cada cara, ya que cada uno es un polo de la célula. La técnica de soldado es la misma que en el caso anterior (aplicar flux y estañar). También se podrían extraer directamente los dos bordes del laminado sin la necesidad de soldar. En este caso, la resistencia serie del laminado sería inferior por tener menos soldaduras.



*Figura 36: Unión mediante ribbon de dos célula*

## 4. TÉCNICAS DE CARACTERIZACIÓN

En el presente capítulo se describen las diferentes técnicas que se han llevado a cabo para caracterizar si el proceso de laminación ha sido el adecuado o no. Las técnicas que se describen a continuación son: inspección visual, determinación del grado de curado (DSC y contenido en gel), test de pelado, caracterización óptica, electroluminiscencia, termografía y medida de la curva intensidad-tensión de los dispositivos fotovoltaicos.

### 4.1. Inspección visual

Una vez hecha la laminación de una muestra, la primera e indispensable técnica de caracterización que se debe hacer es la inspección visual. En el caso de que los parámetros de laminación como la temperatura, el tiempo o el vacío no sean adecuados, a simple vista se observará que la laminación no ha sido la correcta.

Uno de los indicadores de una mala laminación es la aparición de burbujas o de estructuras estriadas del encapsulante. Existen tres posibles tipos de burbujas que pueden aparecer durante el laminado con EVA. Un primer tipo de burbuja debido al aire residual atrapado dentro del sándwich. Un segundo tipo de burbuja debido a los gases generados por el propio EVA, y un tercer tipo debido a gases generados por inserciones [7].

Las burbujas están relacionadas con el tiempo o la temperatura de laminación y pueden aparecer tanto en la parte frontal como en la posterior del módulo. Las estructuras estriadas en cambio, aparecen cuando el tiempo o la temperatura de laminación han sido demasiado altos.



(a) Estructuras estriadas en la parte frontal (b) Burbujas en la parte posterior del módulo

Figura 37: Ejemplo de una mala laminación

Además de estos defectos, es necesario observar que el módulo haya quedado totalmente sellado después de la laminación y que no se haya producido ningún tipo de ruptura o grieta en las células ni en ninguno de los materiales.

Para registrar el ensayo visual, el método a seguir en CENER consiste en fotografiar y evaluar los laminados registrando los aspectos más destacables en sus correspondientes informes de ensayo.

## 4.2. Grado de curado del encapsulante

Para garantizar una buena laminación de un módulo fotovoltaico y por lo tanto, una larga vida útil del mismo es necesario que el grado de curado del encapsulante se encuentre entre el 65% - 90%. [18]. El proceso de curado es una reacción química que tiene lugar al incrementar la temperatura durante el proceso de laminación. Durante esta reacción, se forman enlaces químicos transversalmente entre las moléculas largas del EVA, las cuales antes de la reacción estaban unidas entre sí débilmente. Por lo tanto, los porcentajes del grado de curado significan el porcentaje de material en el que ha tenido lugar dicha reacción.

El grado de curado se puede relacionar con el contenido en gel, siendo este el porcentaje de masa insoluble de la muestra. A continuación se resumirán las especificaciones que debe cumplir el encapsulante EVA para que el grado de curado sea aceptable.

El encapsulante EVA inicialmente es un termoplástico, pero se le añade un agente de curado llamado peróxido para que pueda tener lugar el curado. Aunque no existan requerimientos del grado de curado estandarizados, los fabricantes recomiendan un nivel de curado que varía desde el 60% hasta el 90%. Es esencial superar el nivel mínimo de curado para garantizar una larga vida útil del módulo fotovoltaico. Con el fin de comprobar que el grado de curado es suficiente, es necesario realizar ensayos químicos del EVA una vez laminado (Extracción Soxhlet, DSC, etc.).

La forma tradicional de medir el grado de curado del encapsulante es utilizando el método primario (extracción Soxhlet). Las desventajas de este método son la necesidad del uso de sustancias tóxicas como el tolueno y la duración del ensayo, ya que se necesitan varios días para su realización. Para poder medir el grado de curado de una manera más rápida y sencilla, se utiliza el método secundario (DSC). Sin

embargo, hay que tener en cuenta que el método secundario debe calibrarse con el método primario.

El método primario consiste en disolver el EVA en un disolvente, de manera que el EVA que está curado no se disuelve ya que es insoluble en cualquier disolvente. Por lo tanto, para calcular el grado de curado, se divide la cantidad de residuo insoluble entre la masa inicial. El método secundario (DSC) en cambio, consiste en calentar una muestra de EVA y una referencia a la misma velocidad, midiendo la diferencia del flujo de calor entre ambas. Para calcular el grado de curado en este caso, se mide la diferencia entre las transiciones energéticas que sufren el encapsulante y la referencia. A continuación se describirá el método con más detalle.

#### 4.2.1. Differential Scanning Calorimetry (DSC)

El DSC (calorimetría diferencial de barrido) es un método secundario para analizar el grado de curado de un polímero, basado en una técnica de análisis térmico. Al ser un método secundario, para diferentes formulaciones de EVA debe de calibrarse con el método primario ya que este es más lento y universal. Mediante este ensayo se puede cuantificar las diferentes transiciones energéticas que sufre el encapsulante EVA. Para llevar a cabo el ensayo DSC, se ha utilizado como referencia la norma IEC 62788-1-6 *Measurement procedures for materials used in photovoltaic modules - Part 1-6: Encapsulants - Test methods for determining the degree of cure in Ethylene-Vinyl Acetate*.

Una vez hecha la laminación y dado que ha tenido lugar el curado del EVA, se lleva a cabo el ensayo de DSC. Para ello, se extraen muestras de 5 – 10 mg de EVA de distintas zonas de la muestra. Se utiliza el material separado en el test de pelado.

Para la realización de los ensayos se utiliza un Calorímetro Diferencial de Barrido de la marca Mettler-Toledo, concretamente el modelo DSC823e. La máquina está dotada de dos crisoles de aluminio. En uno de ellos se coloca la muestra de EVA a medir y el otro en cambio se deja vacío, ya que sirve como referencia. Durante el análisis la muestra y la referencia se calientan de manera separada a través de elementos calefactores que son controlados de manera individual. Para conseguir que la temperatura en los dos crisoles aumente a la misma velocidad, será necesario aportar más calor en el crisol que contiene la muestra, ya que contiene un material “extra”. Debido a esto, el calefactor que calienta la muestra deberá suministrar más calor. Mediante el DSC, lo que se mide es esta diferencia de calor adicional que debe

suministrarse. Por lo tanto, la diferencia de potencia requerida se representa en función de la temperatura del sistema, dando lugar a una gráfica típica de DSC.

El proceso se lleva a cabo bajo un flujo de nitrógeno para crear una atmósfera inerte y seca. El ensayo consiste en calentar desde temperatura ambiente (25 °C) hasta 250 °C a una velocidad constante de 10 °C/min.

Es importante que desde que se haya realizado la laminación hasta que se haga el ensayo DSC haya transcurrido el menor tiempo posible, a poder ser un periodo inferior a un día para que los resultados sean fiables, ya que con el paso del tiempo el peróxido que contiene el EVA se degrada. Por ello, desde la laminación hasta realizar el análisis DSC, las muestras deben de almacenarse en ambientes secos, con una humedad relativa (RH) inferior al 50%, a temperatura ambiente y en oscuridad. Además toda persona que esté en contacto o manipule las muestras tiene que llevar guantes limpios para evitar contaminarla. A continuación se aprecia una curva típica DSC.

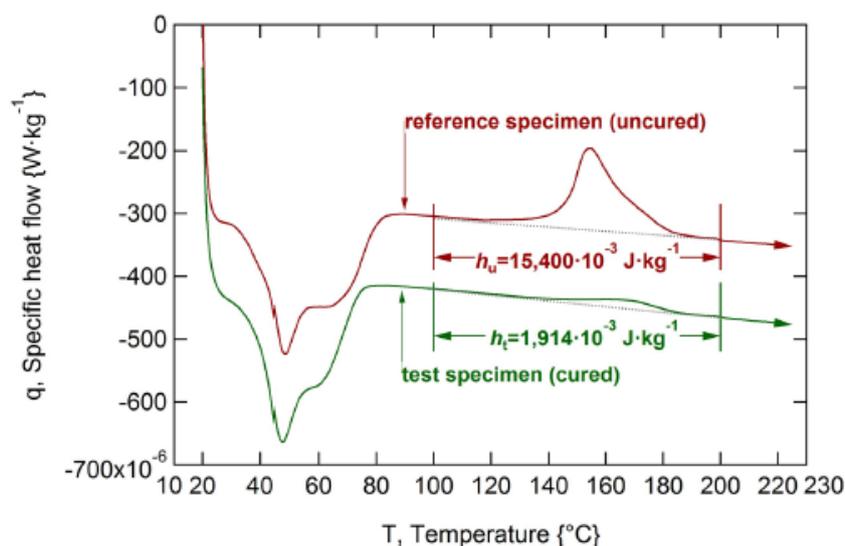


Figura 38: Curva típica DSC

Se puede observar como a lo largo del test tienen lugar varios picos de transición. Analizando la muestra de referencia, se aprecia que el curado del EVA ocurre en una cierta región (entre 100-200 °C) donde se puede apreciar un amplio pico exotérmico ya que tiene lugar una cesión de calor. Para el cálculo de la energía cedida, es necesario el cálculo del área del pico exotérmico, es decir, de la entalpía h (J/g).

La entalpía de este pico es proporcional a la cantidad de peróxido residual en el EVA que no está contribuyendo al proceso de curado durante la laminación. Este método se utiliza como comprobación rápida del estado de curado del EVA y se puede calcular mediante la siguiente fórmula:

$$G = \frac{h_u - h_t}{h_u} \cdot 100 \quad (1)$$

Donde:

- G: grado de curado para el método de entalpía [%]
- $h_u$ : entalpía específica de la referencia de EVA sin curar [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]
- $h_t$ : entalpía específica de la muestra curada [ $\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}$ ]

#### 4.2.2. Relación entre el método primario y el DSC

En varios artículos [8], [9], [10] se ha estudiado la relación entre el método primario y el secundario. Se puede observar como el estado de curado mediante el método secundario (DSC), es inferior al del método primario (extracción Soxhlet). Esta desviación no es inesperada ya que cada método tiene diferentes principios: el método Soxhlet determina la cantidad de polímero curado y por lo tanto, insoluble. Sin embargo el DSC mide la cantidad de agente de curado que queda en el polímero después de la laminación y estima la cantidad de agente de curado que se ha consumido. Hay que tener en cuenta que cualquier correlación de este tipo puede estar influenciada por las características químicas del material y por la cantidad de peróxido inicial.

De la revisión bibliográfica se podría deducir que utilizando el método primario se consiguen resultados del grado de curado un 10% superiores a los calculados mediante el DSC. Por lo tanto, niveles de curado superiores al 55-60% utilizando el DSC supondrían en realidad un grado de curado de 65-70%.

Sin embargo, los ensayos realizados han dado resultados que no corresponden con estos niveles. Ya que, como se podrá observar en el capítulo 5 de resultados experimentales, mediante DSC se ha obtenido un grado de curado inferior a los resultados mediante el método primario.

### 4.3. Test de pelado

El test de pelado es un ensayo utilizado en la industria de módulos fotovoltaicos para medir la fuerza de adherencia (N) entre las diferentes capas de los módulos. Un módulo fotovoltaico es un sistema multicapa con diferentes interfaces que deben tener una buena adherencia entre ellas para prevenir la delaminación, posibles corrientes de fuga o trayectos de contaminantes. Por lo tanto, una buena adherencia entre las diferentes interfaces es esencial para garantizar una cierta fiabilidad del módulo.

Antes de realizar el test de pelado, es necesario preparar la muestra y llevar a cabo el proceso de laminación. A continuación, para llevar a cabo el test de pelado, se utiliza una máquina específica que aplica una fuerza sobre una de las pestañas con el objetivo de separar dos capas laminadas a una velocidad constante. El valor de la fuerza obtenido se utiliza para determinar si la unión entre los dos materiales es lo suficientemente fuerte o no.

Para llevar a cabo el test de pelado, se ha utilizado la norma ISO 813 [11], que determina la fuerza de adherencia entre materiales poliméricos unidos sobre un sustrato rígido.

#### 4.3.1. Principio de funcionamiento

Su principio de funcionamiento se puede apreciar en la Figura 39. La pestaña es una tira flexible de espesor  $h$  y anchura  $b$  situada en la parte trasera del módulo fotovoltaico, la cual es arrancada del sustrato en el que se desea medir la adhesión mediante la aplicación de una fuerza  $F$  en un ángulo determinado.

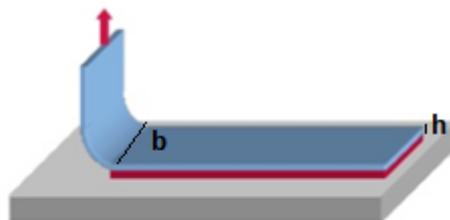


Figura 39: Ensayo de pelado a 90 grados

El ensayo de pelado que se ha realizado ha sido a  $90^\circ$ . Tal y como su nombre indica, el ángulo entre la superficie de la muestra y la dirección de la fuerza se mantiene a  $90^\circ$  a lo largo de todo el test.

### 4.3.2. Máquina para la realización del test de pelado

En el mercado existen diversas máquinas comerciales para la realización de ensayos de adherencia. En este caso CENER dispone de una máquina de ensayo de test de pelado a 90 grados de diseño propio. Está compuesta principalmente por dos partes: la torre de actuación y la mesa de ensayo como se aprecia en la Figura 40.

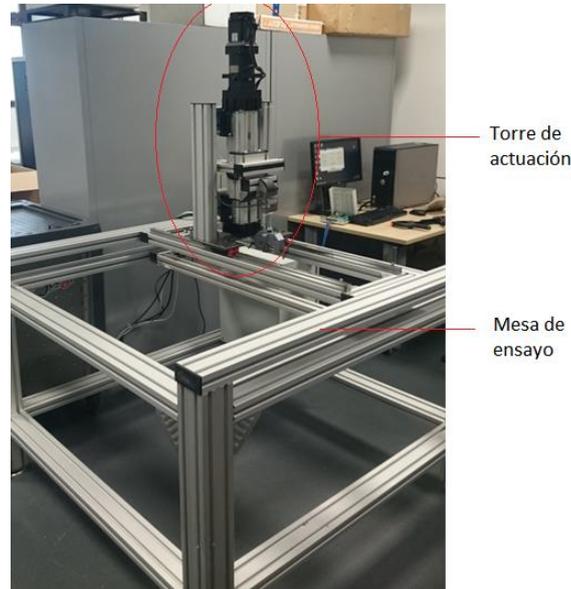


Figura 40: Máquina de ensayo de pelado de CENER

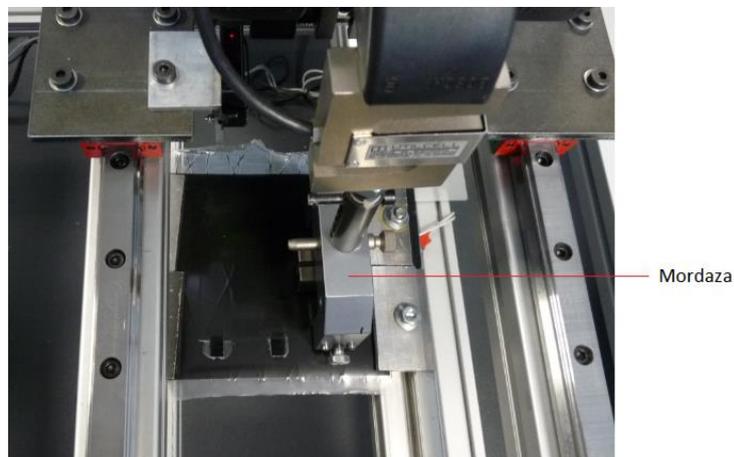
### 4.3.3. Funcionamiento

Antes de poner en marcha la máquina, se coloca el módulo sobre la estructura de soporte con la cubierta frontal mirando hacia el suelo sujeta a los perfiles horizontales que mejor convenga según sus dimensiones.

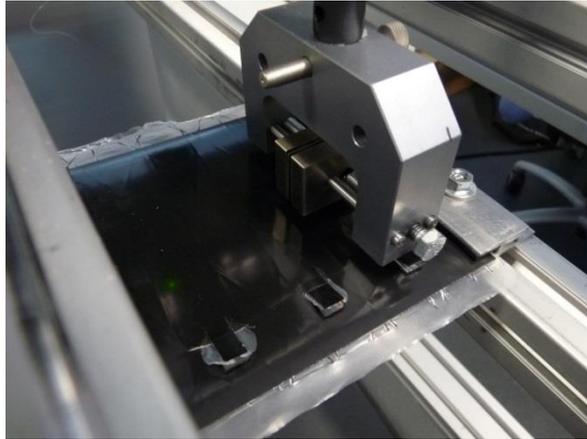


*Figura 41: Estructura de soporte del módulo*

A continuación, se coloca la torre de actuación encima de la muestra a ensayar y se agarra con la mordaza una de las pestañas preparadas en la parte posterior del módulo. Es importante que durante el ensayo la mordaza quede lo más próxima posible al módulo para formar un ángulo de 90 grados entre la pestaña y el plano del módulo.



*Figura 42: Vista superior de la posición de la muestra durante el test de pelado*



*Figura 43: Vista superior de la posición de la muestra durante el test de pelado*

Después, se procede a accionar la máquina a través del servomotor. La mordaza móvil va tirando de la pestaña verticalmente y a una velocidad constante como aparece en la Figura 44, lo que a su vez produce un movimiento horizontal de la torre a través del sistema de poleas para mantener el ángulo de 90 grados entre la pestaña y el plano del módulo que la contiene. La fuerza de adherencia se va midiendo mientras la mordaza móvil tira verticalmente de la muestra a ensayar, produciendo a su vez un movimiento horizontal de la probeta.



*Figura 44: Mordaza tirando de la pestaña verticalmente durante el test de pelado*

Hoy en día todavía no existe un valor estándar para el ensayo de pelado. Valores de adherencia de 75-100 N/cm son normales en el caso de Vidrio – EVA [12].

## 4.4. Técnicas ópticas

### 4.4.1. Transmitancia óptica

La transmitancia óptica es la fracción de luz que atraviesa un cuerpo. Cuando la luz incide sobre un cuerpo, parte de esa luz es absorbida por el mismo, otra parte es

reflejada y la fracción restante es transmitida. En la siguiente figura se puede observar que  $I_0$  es la cantidad de luz que incide sobre el cuerpo e  $I_1$  la cantidad que lo atraviesa.

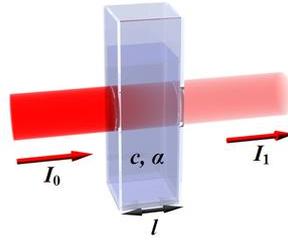


Figura 45: Transmitancia óptica

La transmitancia de un cuerpo se ha medido en este caso en el rango espectral de 300 nm – 1600 nm, en varios lugares del componente óptico y se puede determinar mediante la siguiente ecuación:

$$T = \frac{I}{I_0} \quad (2)$$

Siendo:

- $I$ : Irradiancia transmitida a través de la muestra [ $W/(m^2 \cdot Hz)$ ]
- $I_0$ : Irradiancia incidente sobre la muestra [ $W/(m^2 \cdot Hz)$ ]

En el caso de sistemas fotovoltaicos es necesaria la medida de la transmitancia de la cubierta frontal ya que es la capa sobre la cual inciden los fotones del sol, influyendo directamente en la energía que generan los módulos fotovoltaicos. Por ello, es importante que el material utilizado tenga una buena transmitancia.

Para medir la transmitancia, se ha utilizado un sistema experimental formado por los siguientes componentes y cuyo esquema se aprecia en la Figura 46.

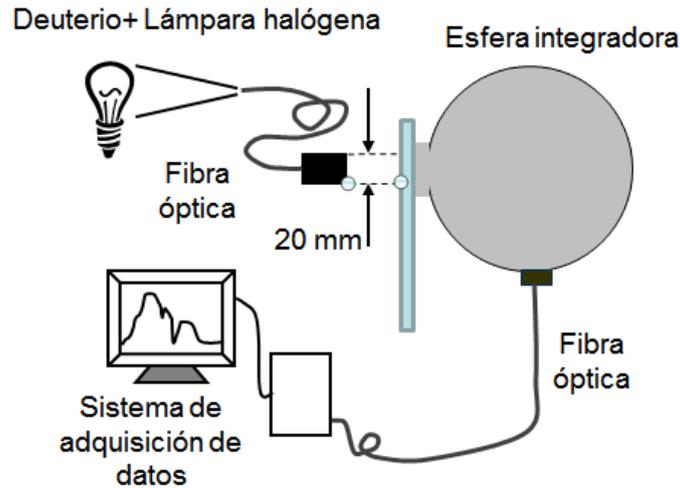


Figura 46: Sistema experimental para la medida de la transmitancia

#### 4.4.2. Índice de amarilleamiento (Yellowness Index, YI)

El índice de amarilleamiento es un dato de espectrometría adimensional que se utiliza para describir un cambio de color en una muestra. Es un parámetro relevante en la caracterización de los polímeros, ya que se relaciona con su degradación en el exterior debido a la influencia de la radiación ultravioleta del sol. Como referencia, el vidrio está caracterizado por un YI de aproximadamente 0.2, mientras que el YI del vidrio laminado con EVA varía entre 0.5 y 0.6.

Se calcula de la siguiente manera:

$$YI = \frac{C_x \cdot X - C_z \cdot Z}{Y} \cdot 100 \quad (3)$$

Siendo:

- $C_x = 1,3013$
- $C_z = 1,1498$
- X,Y,Z: Coeficientes triestímulos

Los coeficientes triestímulos se calculan de la siguiente manera:

$$X = k \int T[\lambda] S_{D65}[\lambda] \bar{x}[\lambda] d\lambda \quad (4)$$

$$Y = k \int T[\lambda] S_{D65}[\lambda] \bar{y}[\lambda] d\lambda \quad (5)$$

$$Z = k \int T[\lambda] S_{D65}[\lambda] \bar{z}[\lambda] d\lambda \quad (6)$$

Siendo:

- k: Factor de normalización
- T: Transmitancia de la muestra medida
- $\lambda$ : Longitud de onda de la luz
- $S_{D65}$ : Potencia relativa espectral del iluminante
- $\bar{x}$ ,  $\bar{y}$ ,  $\bar{z}$ : Funciones de ajuste de color. Describen numéricamente la respuesta cromática de un observador estándar. (Tabuladas por el CIE)

El factor de normalización se determina mediante:

$$k = \int S_{D65}[\lambda] \bar{y}[\lambda] d\lambda \quad (7)$$

## 4.5. Electroluminiscencia

El objeto de este ensayo es detectar, de forma no destructiva, distintos tipos de defectos (microgrietas, shunts, fallos en la metalización, etc) en módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías.

### 4.5.1. Principio de funcionamiento

Las células fotovoltaicas transforman la radiación electromagnética emitida por el sol en energía eléctrica. Si se invierte el proceso, es decir, si se hace circular una corriente a través de la célula, ésta emite radiación [13]. Este fenómeno se denomina electroluminiscencia (EL). Los fotones que emite la célula tienen lugar en una longitud de onda de aproximadamente de 1100 nm. Para poder detectar este fenómeno se usan cámaras sensibles al infrarrojo (Si- CCDs, SWIR con InGaAs, etc.). Como la electroluminiscencia es una fuente de luz débil, es necesario un ambiente oscuro durante la medición.

### 4.5.2. Equipo para la realización de electroluminiscencia

Para realizar este ensayo es necesario disponer de una cámara CCD con su correspondiente controlador, como elemento principal. Además, se deberá contar con un objetivo óptico, una fuente de alimentación para polarizar el módulo, y accesorios para montar el módulo en un soporte o estructura fija que permita colocar el módulo

con la cara frontal dirigida hacia la cámara CCD. El ensayo se realizará en una habitación con la máxima oscuridad posible. En el caso de CENER cuenta con una sala negra para evitar cualquier tipo de foco de luz, en la Figura 47 se observa el montaje para la realización del ensayo.



*Figura 47: Vista del montaje para el ensayo de electroluminiscencia.*

#### 4.5.3. Funcionamiento

La finalidad de este ensayo es detectar defectos en módulos tales como grietas en el material, shunts o discontinuidades en las conexiones. Esto se lleva a cabo aplicándole al módulo una corriente de polarización, generalmente cercana a la de su punto de máxima potencia (IMP), y detectando, mediante una cámara CCD, la radiación electromagnética en infrarrojo cercano (aproximadamente a una longitud de onda de 1100nm para silicio cristalino) proveniente del módulo. Para ello es imprescindible tomar la imagen en condiciones de oscuridad, ya que la luz visible enmascara fácilmente la emisión infrarroja del módulo. La imagen se forma sobre el chip de silicio de la cámara CCD mediante un objetivo óptico.

En la siguiente figura aparece una imagen tomada mediante electroluminiscencia de un panel fotovoltaico. Como se puede apreciar, las zonas oscuras de las células son zonas dañadas que no están funcionando en correcto estado.



*Figura 48: Electroluminiscencia*

De esta manera, la medición de electroluminiscencia permite detectar cualquier fallo (microrroturas, contactos defectuosos, cortes eléctricos, contactos rotos, fragmentos de células rotas, etc.) de las células. Es una de las mejores técnicas para comprobar el estado de los paneles fotovoltaicos y está recibiendo cada vez mayor interés.

## 4.6. Termografía

El objeto de este método de ensayo es establecer un procedimiento para detectar, de forma no destructiva, mediante termografía infrarroja por lock-in, distintos tipos de defectos (grietas, shunts, fallos en la metalización, etc.) tanto en células como en módulos fotovoltaicos de distintas tecnologías.

### 4.6.1. Principio de funcionamiento

La Termografía Infrarroja (TIR) es una técnica de Ensayo No Destructiva (END) sin contacto que obtiene la temperatura de la superficie de un cuerpo a través de la captación de la radiación infrarroja que este emite. El mapa térmico de la superficie obtenido es llamado termograma.

Cuando el flujo de calor en un material es alterado por la presencia de anomalías o defectos provoca contrastes de temperatura en su superficie. El uso de la TIR como método no destructivo de inspección está basado en la obtención y el análisis de las imágenes de esos patrones térmicos.

La TIR por lock-in es un tipo de termografía activa donde se usa una estimulación externa para provocar un flujo de calor interno en el objeto estudiado. Esta técnica

está basada en la aplicación de una serie de pulsos periódicos a la muestra en oscuridad, y en la medida de la temperatura modulada de la superficie con una cámara infrarroja de acuerdo a los principios del lock-in. Un defecto interno o superficial afectaría al flujo calórico produciendo un contraste térmico.

#### 4.6.2. Equipo para la realización del ensayo de termografía

El esquema típico de un equipo de termografía por Lock-in es el siguiente:

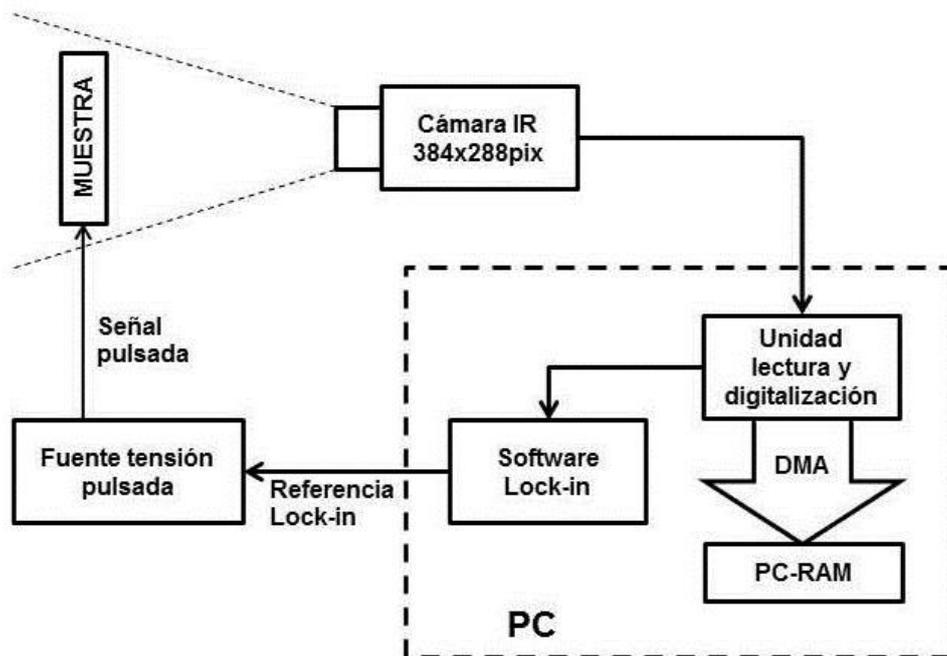


Figura 49. Esquema del equipo necesario para termografía.

El sistema instalado en CENER está compuesto por una cámara de 384x288 píxeles de resolución y una sensibilidad térmica (NETD) de 20 mK (menor diferencia en temperatura entre dos píxeles que la cámara puede medir). Dentro del módulo PC están las unidades de lectura y digitalización, como interfaz entre la cámara y el PC. Por medio de la DMA (Direct Memory Access) se graban periódicamente las imágenes en una parte de la memoria RAM del PC, de donde son cogidas para ser procesadas por el software de lock-in. Este software, que está sincronizado con la cámara, controla la señal trigger de lock-in que debe generar la fuente de tensión que polariza la muestra. El PC también controla la uniformidad de la imagen digital, así como la corrección de píxeles perdidos.

### 4.6.3. Funcionamiento

Para realizar el ensayo de termografía se debe seguir un procedimiento determinado según la normativa interna de CENER. Esta normativa sigue las siguientes pautas:

- a) Encender el PC y calibrar el software de captura de imágenes.
- b) Montar la muestra en el bastidor adecuado.
- c) Colocar el objetivo adecuado.
- d) Una vez pulsado el botón de *Acquire Offset* ya se puede quitar la tapa del objetivo. Con ayuda de la imagen que aparece en pantalla, encuadrar la muestra de forma que se vea completamente, y enfocar la imagen adecuadamente.
- e) Conectar la fuente y conexionado y configurar los parámetros de Lock-in: *Frecuencia de Lock-in* y *Número de períodos*.
- f) Capturar las imágenes.

### 4.7. Determinación de la máxima potencia

Este procedimiento se emplea para determinar la potencia máxima de módulos fotovoltaicos planos de aplicación terrestre de silicio cristalino.

En el marco de la cualificación del diseño y la aprobación de tipo de un módulo fotovoltaico, este procedimiento se emplea para determinar la potencia máxima de los módulos tras la estabilización de los mismos o para determinar la pérdida de potencia en los ensayos de degradación. En este último caso, la reproducibilidad del ensayo es un factor muy importante.

Las instrucciones proporcionadas en este método de ensayo pueden aplicarse para distintas condiciones de medida, es decir, pueden obtenerse las curvas I-V en Condiciones Estándar de Medida, conocer el funcionamiento en las condiciones de ensayo de Temperatura Nominal de Operación del Módulo (NMOT: Nominal Module Operating Temperature) y el funcionamiento a baja irradiancia.

#### 4.7.1. Principio de funcionamiento

La finalidad de este ensayo es obtener la característica intensidad-tensión del módulo fotovoltaico a los valores de irradiancia, temperatura y distribución espectral deseados, y obtener a partir de la misma los parámetros eléctricos más importantes, como son la

tensión de circuito abierto ( $V_{OC}$ ), la intensidad de cortocircuito ( $I_{SC}$ ), el factor de forma (FF), la potencia máxima ( $P_{MAX}$ ), la intensidad en el punto de máxima potencia ( $I_{MP}$ ) y la tensión correspondiente al punto de máxima potencia ( $V_{MP}$ ).

El ensayo se puede realizar de dos maneras: según el procedimiento con simulador solar tipo flash o con luz solar natural. En el caso del presente proyecto, solo se ha utilizado el ensayo dentro del simulador solar tipo flash.

#### 4.7.2. Equipo para la realización de la determinación de máxima potencia

Para la realización de este ensayo, CENER cuenta con un Simulador solar tipo flash: Equipo capaz de suministrar en forma de impulsos luminosos o “flashes”, una radiación luminosa con espectro similar al del sol y de suficiente potencia.

#### 4.7.3. Funcionamiento

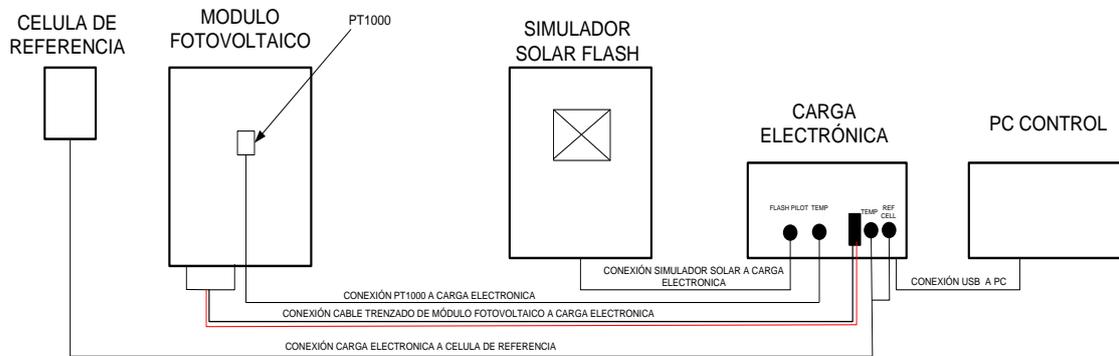
Para realizar la medida con el simulador tipo flash, tanto la muestra como el dispositivo de referencia han de estar en el mismo plano ( $\pm 2^\circ$ ) y éste ha de ser perpendicular ( $\pm 5^\circ$ ) al haz de luz emitido por el simulador. El bastidor se instalará de tal manera que el módulo y la célula de referencia colocados sobre él cumplan la mencionada condición.

Se procederá de la siguiente manera:

- a) Situar el módulo y la célula de referencia en el bastidor. Siempre que sea posible se empleará una célula de referencia de la misma tecnología que el módulo a ensayar.
- b) Conectar el módulo y la célula de referencia a la carga electrónica del simulador. Las tensiones y corrientes del módulo se medirán utilizando cables independientes (conexión a 4 hilos).
- c) La sonda de temperatura se pegará a la parte posterior del módulo y se conectará a la carga electrónica.
- d) Configurar todos los parámetros asociados a la medida; entre ellos la irradiancia y la temperatura del módulo. Esto se realizará de acuerdo a las instrucciones del equipo del simulador solar flash. Para la obtención del funcionamiento a baja irradiancia (irradiancias menores o iguales a 400 W/m<sup>2</sup>) se colocará también un filtro de reductor de irradiancia.
- e) Obtener la curva I-V, siguiendo las instrucciones del equipo del simulador solar flash. La corriente de cortocircuito deberá medirse a tensión nula. Si no fuera posible, podrá extrapolarse a partir de la curva I-V medida siempre que la caída

de tensión no supere el 3% del valor de la tensión de circuito abierto y de que exista una relación lineal entre corriente y tensión.

- f) Se empleará el software de tratamiento de datos correspondiente para realizar el tratamiento de los datos obtenidos y la estimación de las incertidumbres.



*Figura 50: esquema de montaje con simulador solar flash.*

## 5. ENSAYOS DE DEGRADACIÓN

A continuación se describen las distintas pruebas de degradación a las que han sido sometidas las muestras. En total se han realizado tres ensayos mecánicos (pandeo, granizo e impacto de bola de acero) y uno climático (calor húmedo).

### 5.1. Test de pandeo o Buckling

El objeto de este ensayo es definir el pandeo máximo del módulo antes de la rotura de sus células. Con este ensayo se determina la función que realizan los diferentes refuerzos utilizados en la laminación de mini módulos. Además, se comprueba con facilidad la flexión del material policarbonato utilizado como frontsheet.

#### 5.1.1. Principio de funcionamiento

El pandeo es un fenómeno de inestabilidad elástica que puede darse en elementos comprimidos esbeltos, y que se manifiesta por la aparición de desplazamientos importantes transversales a la dirección principal de compresión.

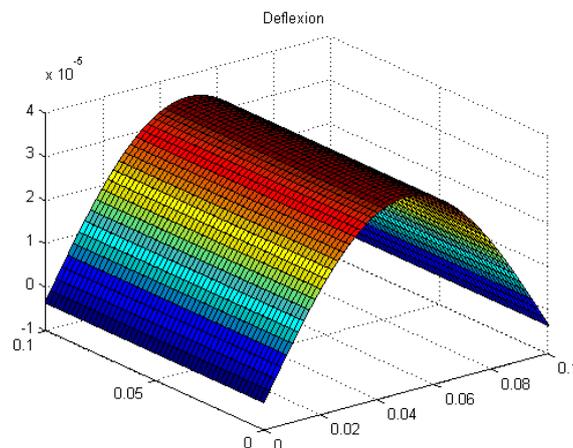


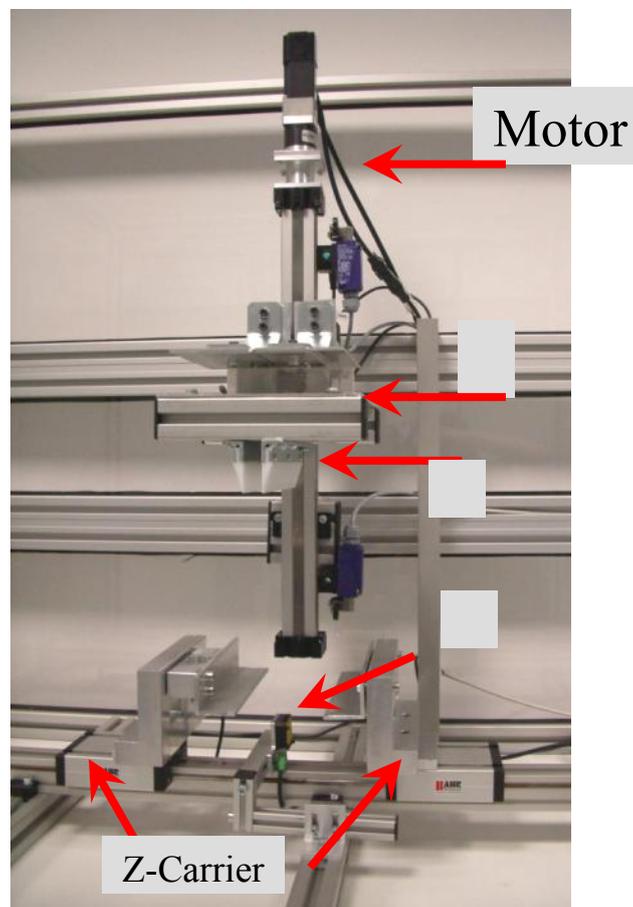
Figura 51: Principio del Buckling o pandeo.

#### 5.1.2. Máquina para la realización del test de pandeo

Para la realización del ensayo de pandeo, CENER cuenta con una máquina de diseño propio. Esta máquina se compone de un servomotor que aplica presión en el eje transversal del módulo a ensayar. Esta presión se aplica en los dos laterales de igual fuerza y dirección, de esta forma se consigue la deformación del módulo por ambos laterales, haciéndolo pandear.

Además, a esta máquina se le ha dotado de un equipo controlador para aplicar la carga seleccionada por un software, el cual muestrea los datos de distancia recorrida por el carro del servomotor. Por otro lado, dispone de un sensor de distancia ubicado bajo el módulo a ensayar, que recoge valores de distancia relacionados con los valores de pandeo del módulo.

Todos estos datos, se comparan adicionalmente con una cámara de electroluminiscencia que permite conocer en directo el estado del módulo mientras se aplica la presión. De esta forma, se anotan los valores de máximo pandeo previo a la rotura de las células que conforman el módulo. En la siguiente Figura se muestra un resumen de los componentes de la máquina de ensayo.



*Figura 52: Máquina para ensayo de Buckling.*

### 5.1.3. Funcionamiento

Para la realización del ensayo, tras colocar las muestras en posición horizontal entre los carros de la máquina, se procede al accionamiento de los motores. Este

accionamiento programado mueve los carros en posición horizontal disminuyendo la distancia entre ellos.

Este movimiento comprime la muestra a ensayar, haciéndola pandear a medida que se le aplica más presión en los laterales. El ensayo se realiza de manera sistemática, aplicando presión a la vez que se registran los datos de distancia recorrida por el carro, flexión obtenida e imágenes capturadas de electroluminiscencia.

El ensayo tendrá un punto de inflexión en el momento en que las células que componen el módulo se fracturen. Llegados a este punto, se procederá a separar los carros progresivamente, eliminando de esta forma la presión aplicada al módulo, y haciendo descender el pandeo.

De esta forma, el ensayo terminará una vez descomprimido el módulo por completo, llegando al estado inicial o reposo. En la siguiente Figura se observa un breve esquema de los accionamientos y posicionamiento del módulo de ensayo.

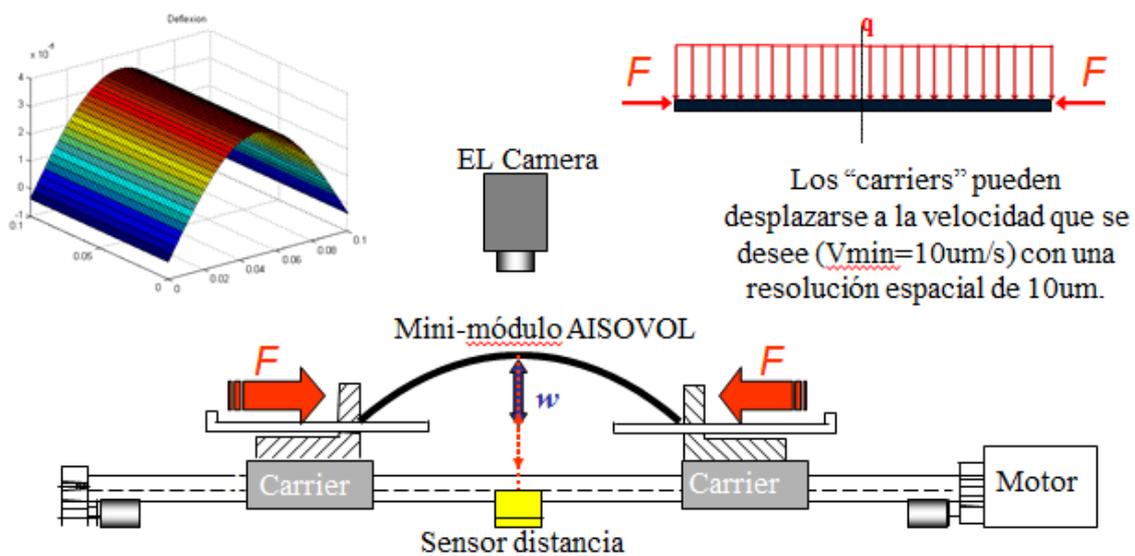


Figura 53: esquema ensayo de Buckling.

## 5.2. Ensayo de granizo

El objeto de este procedimiento es verificar que el módulo es capaz de soportar los impactos de granizo. Se comprueba de una manera técnica el efecto que puede tener sobre el módulo una tormenta de granizo, simulando esta circunstancia mediante el lanzamiento de bolas de hielo de tamaño y velocidad especificadas.

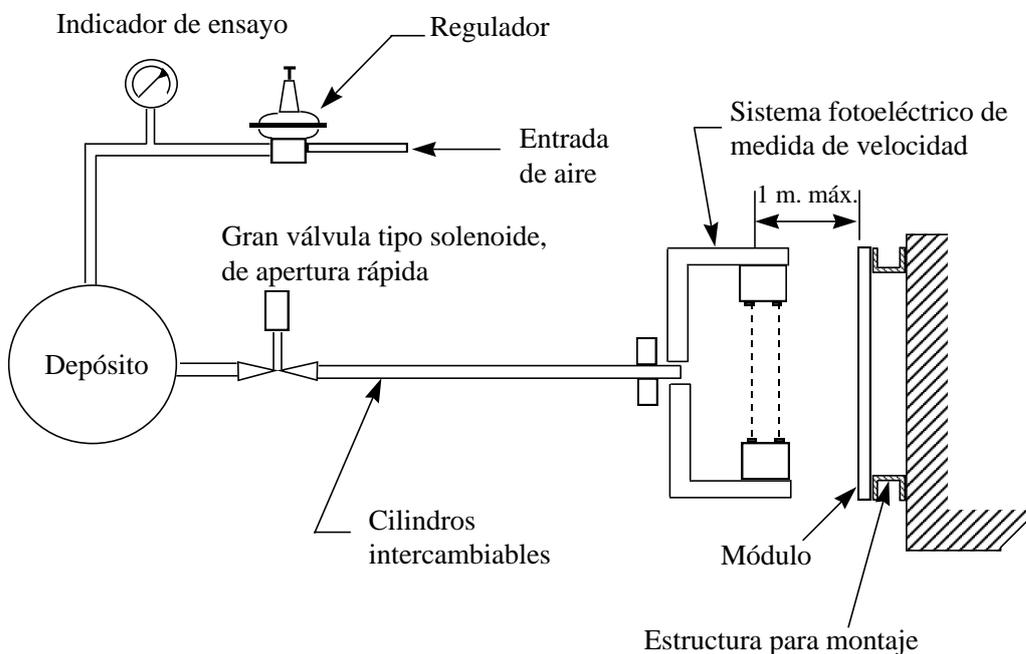
### 5.2.1. Principio de funcionamiento

El ensayo de granizo se basa en el lanzamiento de bolas de hielo de un diámetro determinado, mediante un lanzador de bolas, que bajo presión se consigue la velocidad específica del lanzamiento de la bola de hielo. En función de la estructura del laminado, se conseguirán resultados diferentes debido a la absorción de energía en el impacto de la bola.

Un laminado con más capas internas deberá resistir más energía de impacto que un laminado de menor espesor o con menos capas. Del mismo modo, la resistencia de la célula de silicio tendrá mayor o menor rotura en función de la energía absorbida por el resto de los componentes que forman el laminado.

### 5.2.2. Máquina para la realización del ensayo de granizo

Para la realización del ensayo de granizo, CENER cuenta con un lanzador de bolas de hielo, una cámara congeladora, sensor de velocidad láser, bastidor de ensayos y sonda de temperatura. En la siguiente Figura se muestra un esquema de la maquinaria utilizada para la realización del ensayo.



**Figura 54: esquema ensayo de granizo.**

### 5.2.3. Funcionamiento

El proceso de funcionamiento para este ensayo comienza con la realización de bolas de hielo usando moldes y el congelador. Estas bolas tienen un diámetro de 25 mm, con una masa entorno a los 7,5 gramos. Estas bolas han de examinarse posteriormente antes de su utilización para el ensayo. No deben presentar grietas visibles y el diámetro y masa requerida deben estar en torno a un valor de  $\pm 5\%$  del valor nominal.

Antes del disparo contra el módulo a ensayar, deben realizarse unos disparos sobre una superficie simulada, para ajustar la lanzadera hasta que la velocidad del hielo sea apropiada. Esto se consigue variando la presión de la lanzadera para conseguir velocidades en torno a  $23 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

Una vez el lanzador está ajustado y listo para disparar, se coloca el módulo de ensayo en el bastidor, marcando los lugares donde se desea realizar los impactos. Seguidamente, se cierra el perímetro de ensayo para mantener el área de disparo inaccesible y se realiza el disparo requerido.

Por último, una vez disparadas las bolas se realiza una inspección visual para dar constancia de los posibles daños realizados en este impacto. Además, siempre se comprueba el estado de las células del módulo con una inspección mediante electroluminiscencia.

## 5.3. Resistencia al impacto de una bola de gran diámetro

Dentro del trabajo realizado en CENER durante el desarrollo del presente TFM, se ha dado la posibilidad de desarrollar nuevos métodos de caracterización de los laminados. En concreto, junto a un proyecto paralelo al presente, con objeto de encontrar una mejora en el encapsulante en cuanto a pruebas de impacto, se ha llevado a cabo una técnica de caracterización de la resistencia y propiedades mecánicas del encapsulante EVA.

### 5.3.1. Principio de funcionamiento

El funcionamiento de este ensayo se basa en la norma EN 438-2:2005 [14] en la que describe el ensayo de la resistencia al impacto de una bola de gran diámetro para láminas basadas en resinas termoestables. Se ha realizado una adaptación del ensayo para realizarlo sobre probetas de EVA laminado.

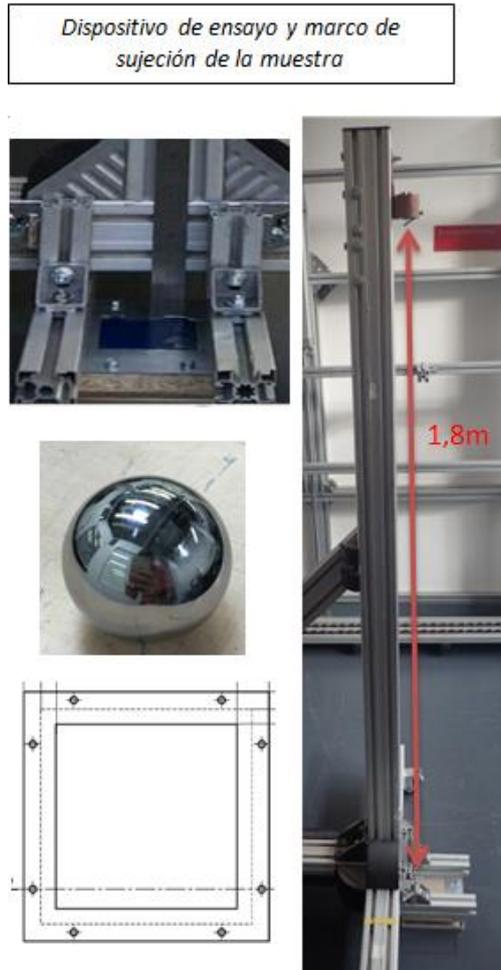
Una probeta procedente de laminado sometido a ensayo se cubre con una hoja de papel de carbón y se somete al impacto de una bola de acero que se deja caer desde una altura conocida. La resistencia al impacto se expresa como la máxima altura de caída que se puede alcanzar sin incurrir en un agrietamiento visible de la superficie o sin producir una huella mayor que un diámetro máximo especificado.

### 5.3.2. Equipo para la realización del ensayo

El equipo para la realización de este ensayo se ha diseñado y fabricado durante el desarrollo del presente TFM. Se ha optado por fabricar el aparato de caída libre que se presenta en la norma EN 438-2:2005 adaptándolo a las especificaciones de las muestras laminadas en este proyecto y a los materiales disponibles dentro del laboratorio de ensayos de CENER.

Además del aparato de caída libre de fabricación propia, se ha utilizado una bola de acero de superficie pulida, de masa 500 gramos, un marco para sujetar la probeta a ensayar, una cámara de video para registrar la altura de rebote de la bola y un software de análisis de imágenes para calcular el área de huella de la bola en las probetas.

En la siguiente figura se muestra el equipo del ensayo que se ha utilizado, así como un pequeño plano del marco de sujeción de las probetas.



*Figura 55: equipo del ensayo de impacto de bola.*

### 5.3.3. Funcionamiento

Una vez laminada la probeta de EVA a ensayar, se fija en el marco, junto a un folio en blanco y un papel de carbón con su cara tintada en contacto con el folio, cortados a medida. El conjunto se coloca sobre la base sólida del aparato de caída libre.

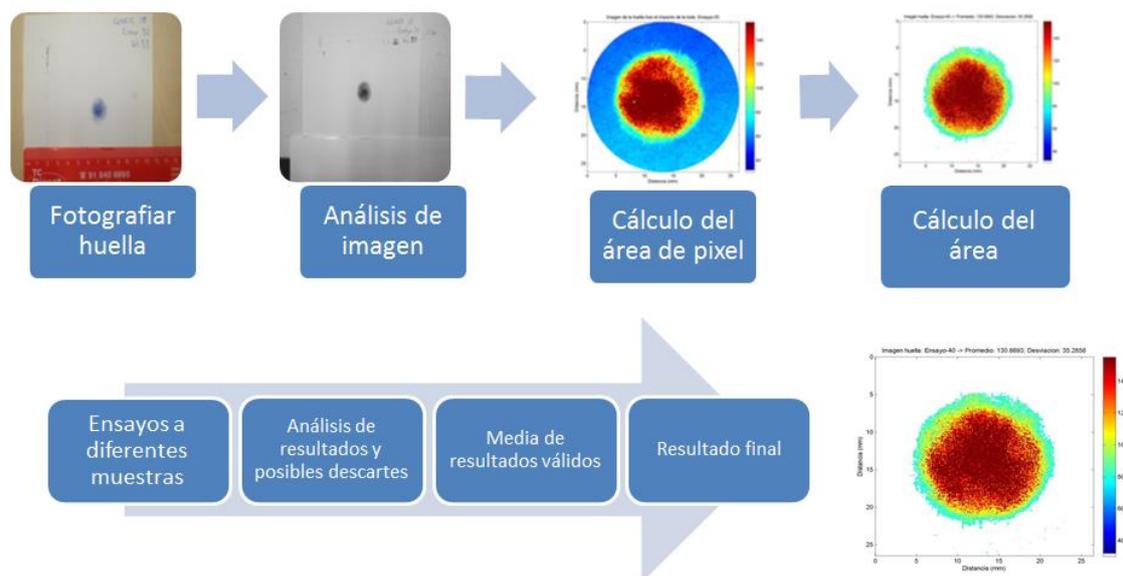
Se coloca la bola a la altura deseada para realizar el impacto. Se procede a soltar la bola de forma que caiga sobre la probeta, recogiénola en el primer rebote para que no se produzcan impactos múltiples.

Tras el impacto, se examina la superficie sometida a ensayo en busca de deterioro en el punto del impacto. Si se observa una grieta, se vuelve a probar el lanzamiento con una altura menor para determinar la capacidad de resistencia al impacto.

Por último, se procede a fotografiar en unas condiciones determinadas de ángulo e iluminación, la muestra de papel blanco impregnada por el papel carbón tras el lanzamiento. Con el software de análisis de imagen determinado, y con la grabación del lanzamiento de la bola, es posible determinar la altura de rebote de la bola y el área de huella que ha dejado el impacto de la bola sobre la superficie.

En la siguiente figura se muestra un breve resumen de análisis de la huella mediante el software implementado.

### Análisis de la huella



*Figura 56: resumen del análisis de huella.*

## 5.4. Calor húmedo

El objeto de este ensayo es determinar la capacidad de un módulo para soportar los efectos de penetración de la humedad durante largos periodos de tiempo.

### 5.4.1. Principio de funcionamiento

La finalidad de esta prueba es estudiar los efectos de la humedad y temperatura combinadas sobre los componentes del módulo fotovoltaico; de este modo, se determina la aptitud de los materiales ensayados para el transporte, el almacenaje y el uso bajo condiciones de alta humedad. Para ello se somete los módulos a unas condiciones de humedad relativa y temperatura determinadas según UNE-EN 60068-2-78 [15].

#### 5.4.2. Equipo para la realización de calor húmedo

Para la realización de este ensayo, será necesario el uso de una cámara climática que cumpla con los siguientes requerimientos:

Mantener la temperatura y humedad relativa en el espacio de trabajo en los valores prescritos y con las tolerancias prescritas, teniendo en cuenta el efecto del espécimen ensayado sobre las condiciones de la cámara. Las severidades de ensayo serán:

- Temperatura de ensayo:  $(85 \pm 2)$  °C.
- Humedad relativa:  $(85 \pm 5)$  %.

Además, este equipo debe mantener el agua condensada continuamente evacuada de la cámara y no es reutilizada ya que se evacua por un desagüe. El agua condensada sobre las paredes y el techo de la cámara no puede caer sobre los especímenes. El agua utilizada para mantener la humedad en la cámara debe tener la resistividad no inferior a  $0,05 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ .

El espécimen ensayado no debe ser sometido a calor proveniente de los dispositivos de acondicionamiento de la cámara.

El volumen de la cámara de ensayo es al menos cinco veces el volumen total del espécimen ensayado.

El sistema de montaje tendrá mínima influencia sobre los intercambios de calor y humedad entre el espécimen y el ambiente que le rodea.

#### 5.4.3. Funcionamiento

Para el procedimiento de este ensayo, se debe montar el módulo fotovoltaico en el interior de la cámara climática. Tanto el módulo a ensayar como la cámara climática se encontrarán a la temperatura ambiente del laboratorio.

Se obtendrá una muestra del agua desmineralizada y se medirá su resistividad. En el caso que se cumpla con lo establecido se procederá con el ensayo, de lo contrario se tomarán las medidas adecuadas para obtener un agua que tenga las propiedades requeridas.

A continuación se cerrarán las puertas y se programará la cámara según sus instrucciones de equipo para cumplir con las severidades requeridas:

- Temperatura de ensayo:  $(85 \pm 2)$  °C.
- Humedad relativa:  $(85 \pm 5)$  %.
- Duración del ensayo:  $(1000 -0 / +48)$  h.

Durante todo el ensayo se monitorizará y registrará la humedad relativa y la temperatura de ensayo.

## 6. RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este apartado se exponen los resultados alcanzados en la realización de las pruebas desarrolladas durante el proceso de optimización de una receta adecuada para la laminación de pequeñas muestras que validen el objetivo del proyecto.

Este TFM ha continuado con el trabajo realizado en el anterior Trabajo Fin de Grado: *Estudio del proceso de laminación de módulos fotovoltaicos con materiales alternativos* [16]. Este TFG concluyó en la posibilidad de encontrar un proceso viable para el laminado de módulos fotovoltaicos con materiales alternativos, llegando a unas recetas optimizadas con los materiales de estudio. Las recetas óptimas que se concluyeron en dicho TFG, fueron las siguientes:

- Policarbonato de 2 mm

	Receta de laminación óptima	Inspección visual	Fuerza de adherencia (N)			G (%)
			PC – EVA	PPE - EVA	Entramado - EVA	
Laminación sencilla	131 °C 17,5 min	OK	114	98	-	58 %
Laminación completa		OK	-	-	-	61 %

Tabla 4: Resultados del sándwich sencillo y completo con policarbonato 2 mm utilizando la receta óptima definitiva.

- Policarbonato de 4 mm

	Receta de laminación óptima	Inspección visual	Fuerza de adherencia (N)			G (%)
			PC – EVA	PPE - EVA	Entramado - EVA	
Laminación sencilla	140 °C 12,5 min	OK	127	120	-	69 %
Laminación completa		OK	-	-	44,8	60 %

Tabla 5: Resultados del sándwich sencillo y completo con policarbonato de 4 mm utilizando la receta óptima definitiva.

No obstante, estos laminados finales tuvieron algún problema que se debe subsanar. Entre otros, se encuentra el pandeo aparecido tras la laminación y algunas pequeñas burbujas en el policarbonato. Además, el grado de curado obtenido mediante la técnica DSC se encuentra en el límite inferior del rango considerado como aceptable en la industria.

Por otro lado, se debe continuar con otros ensayos de caracterización para corroborar que es posible el uso de estos laminados para la implementación del proyecto AiSoVol.

## 6.1. Ensayos de calidad del encapsulante

Para certificar la calidad del encapsulante EVA utilizado en los laminados, se ha procedido a realizar diferentes ensayos explicados en el capítulo 4. Entre ellos, se ha caracterizado el grado de curado del EVA mediante el método primario de contenido en gel y secundario (DSC).

Además del EVA con el que se estaban realizando los laminados en el anterior TFG, se ha valorado la posibilidad de utilizar EVA de baja temperatura de curado. En este apartado, también se han estudiado sus cualidades.

### 6.1.1. EVA convencional

Para el EVA utilizado en los laminados anteriores, o también denominado EVA convencional, del fabricante STRE, se han realizado los siguientes ensayos para determinar su grado de polimerización o grado de curado.

#### A) Método primario

El método primario o también denominado como contenido en gel, se ha llevado a cabo para las muestras 46.0116.0-23, 46.0116.0-24, 46.0116.0-25 y 46.0116.0-26. Los resultados se muestran en la siguiente Tabla.

PC 2 mm				
Muestra	Receta		Sándwich	Gel Content(%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)		
46.0116.0_23	135	12.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	58.50
46.0116.0_24	135	17.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	67.46

46.0116.0_25	135	22.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	73.14
--------------	-----	------	------------------	-------

PC 4 mm				
Muestra	Receta		Sándwich	Gel Content(%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)		
46.0116.0_26	140	12.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	51.45

Tabla 6: Resultados del ensayo de contenido en gel.

## B) Método secundario

Este ensayo ya fue realizado en el anterior trabajo desarrollado en el TFG. Los resultados obtenidos se muestran en la siguiente Tabla.

PC 2 mm				
Muestra	Receta		Sándwich	DSC (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)		
46.0116.0_23	135	12.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	60.22
46.0116.0_24	135	17.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	71.92
46.0116.0_25	135	22.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	79.72

PC 4 mm				
Muestra	Receta		Sándwich	DSC (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)		
46.0116.0_26	140	12.5	PC+EVA1+EVA3+PPE	69

Tabla 7: Resultados del ensayo de DSC.

También se ha realizado durante este TFM el ensayo de DSC para verificar la caducidad del EVA con el que se han realizado los laminados. A continuación se muestra la gráfica obtenida mediante DSC realizado al EVA convencional.

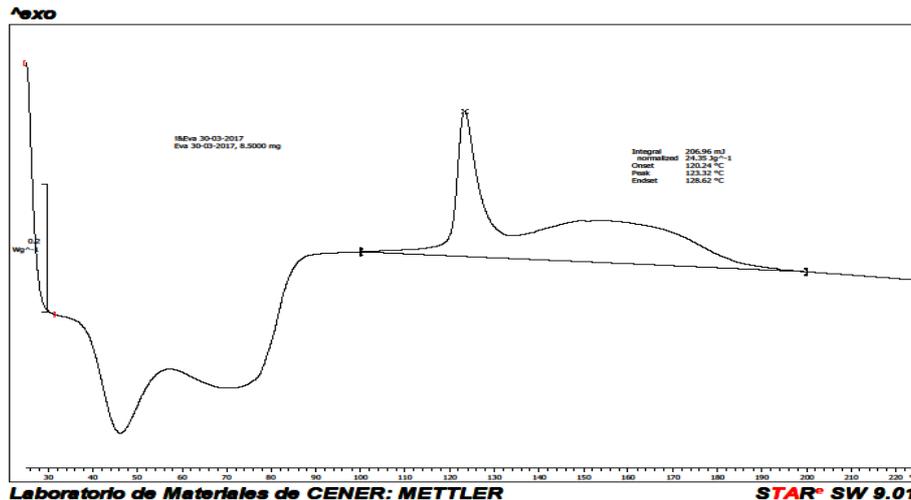


Figura 57: Curva DSC del EVA convencional caducado.

De esta gráfica se verifica una similitud en cuanto al orden de temperaturas de grado de curado con el EVA convencional antes de caducar. Sin embargo, se observa una bajada en la velocidad de reacción del encapsulante. Este último dato puede suponer una diferencia en los resultados de los laminados si se utilizan las mismas recetas del TFG anterior.

C) Comparación Método primario (Gel) vs Método secundario (DSC)

PC 2 mm			
Muestra	Gel Content(%)	DSC (%)	Diferencia
46.0116.0_23	58.50	60.22	2.86%
46.0116.0_24	67.46	71.92	6.20%
46.0116.0_25	73.14	79.72	8.25%

PC 4 mm			
Muestra	Gel Content(%)	DSC (%)	Diferencia
46.0116.0_26	51.45	69	25.43%

Tabla 8: Comparación métodos de ensayo de grado de curado.

Esta tabla refleja claramente lo comentado en el capítulo 4.2.2. *Relación entre el método primario y el DSC.* En documentos bibliográficos se puede leer que el ensayo de contenido en gel o método primario debería obtener valores de curado mayores a

los obtenidos mediante el método secundario o DSC. Sin embargo, se ha observado que es claramente al revés. Así pues, se contemplan en general grados de curado demasiado bajos para una certificación de módulos fotovoltaicos.

### 6.1.2. EVA de baja Temperatura

Para el EVA de baja temperatura, recibido en el período final de la realización de este TFM, se ha realizado una caracterización mediante el ensayo de DSC para obtener su curva.

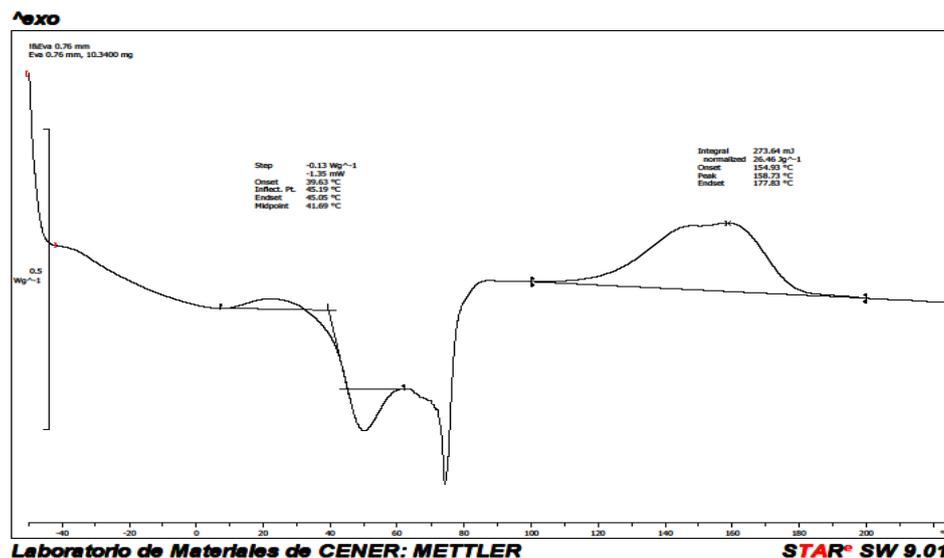


Figura 58: Curva DSC del EVA de baja temperatura.

Se observa que la reacción de polimerización comienza a partir de los 80 °C. Sin embargo, tampoco se muestra una clara diferencia con el EVA convencional. Es destacable los picos que muestra el EVA convencional en la región de polimerización, indicadores de varios componentes en su estructura. Esto no se da en el EVA de baja temperatura, donde la curva en la región de polimerización de esta temperatura es más gradual.

El fabricante Huchi Glass del EVA de baja temperatura sugiere unas recetas de laminación con bajas temperaturas (entre 80°C y 120 °C) y altos tiempos de laminación (entre 70 minutos y 160 minutos). Este tipo de recetas puede ser debido a la relación existente entre saltos escalonados de temperaturas y el grado de polimerización. A más saltos de temperaturas en el proceso de laminado, se consiguen mejores resultados de polimerización.

Los últimos laminados realizados en el período final de la realización del presente TFM, encapsulados con el nuevo EVA de baja temperatura (EVA HC), muestran los siguientes resultados en cuanto a su grado de curado.

PC 2 mm				
Muestra	Receta		Sándwich	DSC (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)		
46.0116.0_63	131	17.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	64,74

PC 4 mm				
Muestra	Receta		Sándwich	DSC (%)
	Temperatura (°C)	Tiempo (min)		
46.0116.0_64	140	12.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	88,7
46.0116.0_65	130	12.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	41.6
46.0116.0_66	135	12.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	64.9
46.0116.0_67	130	17.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	61.0
46.0116.0_68	130	22.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	51.7
46.0116.0_69	130	17.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	49.8
46.0116.0_70	125	22.5	PC+EVAHC(0,76mm)+PPE	37.8

*Tabla 9. Resultados para laminados con Eva de baja temperatura.*

Estos resultados incrementan el grado de curado respecto al EVA convencional.

### 6.1.3. Policarbonato

Además de los ensayos de calidad del encapsulante, se añade a continuación la gráfica del ensayo DSC realizado a una muestra de policarbonato sin laminar.

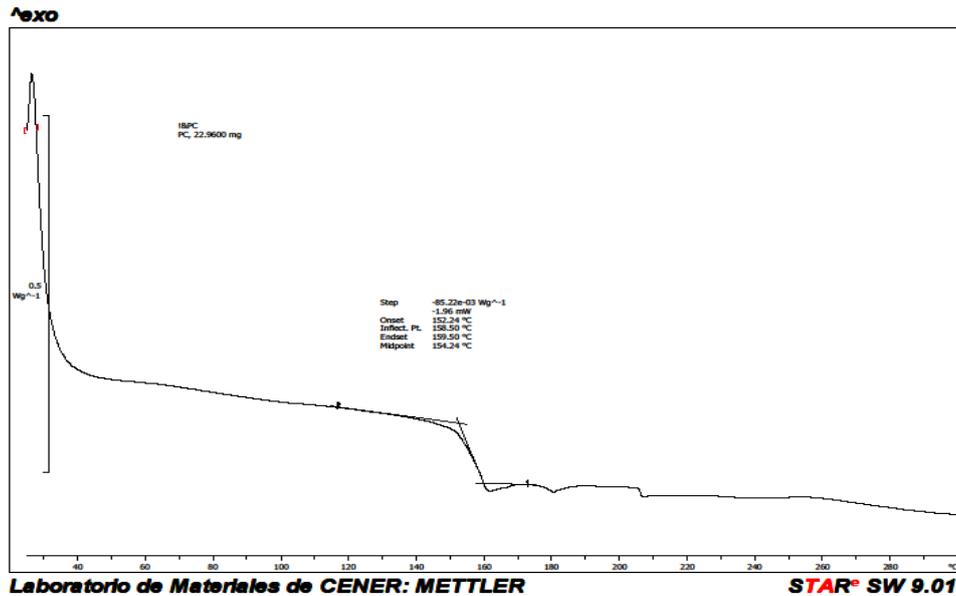


Figura 59. Curva DSC realizada al policarbonato.

De esta figura se pueden obtener temperaturas de referencia para realizar los laminados. Se observa que la Temperatura de transición vítrea del policarbonato se encuentra en 152 °C. La Temperatura de reblandecimiento del material es algo superior, en torno a los 160 °C. Para asegurar un buen comportamiento de las propiedades del material, el margen de seguridad que se obtiene de la gráfica, supone una no superación de temperatura del laminado de 120 °C. Esta temperatura había sido claramente superada en las recetas concluidas en el trabajo realizado anteriormente.

No obstante, cabe señalar el cuidado que será necesario tomar en el enfriamiento de los laminados, ya que un enfriamiento muy rápido puede producir una cristalización o craqueo del material.

## 6.2. Ensayo de calor húmedo

Este ensayo se ha llevado a cabo en diferentes muestras, con el objetivo de verificar la validez del proceso del laminado y de la no absorción de agua o humedad de los materiales empleados.

En la siguiente Figura se muestra la colocación de las muestras dentro de la cámara de ensayo de calor húmedo.



Figura 60: Cámara de ensayo de calor húmedo con muestras.

### 6.2.1. Laminados ensayados

En la siguiente tabla se muestra los laminados sometidos al ensayo de calor húmedo, así como el número de horas que han pasado dentro de la cámara de ensayo.

Muestra	Composición	Horas de ensayo
46.0116.0-32	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE	163 + 72
46.0116.0-34	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE	163 + 72
46.0116.0-51	PC (4mm) + EVA + EVA + PPE	72
46.0116.0-56	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + PPE	72
46.0116.0-61	PC (2mm) + EVA + PC (2mm)	72
46.0116.0-62	PC (2mm) + EVA + PC (2mm)	72

Tabla 10: Resumen de muestras sometidas a ensayos de calor húmedo.

En la siguiente figura vemos la inspección visual general de algunas de las muestras tras la prueba de calor húmedo.



Figura 61: Módulo 46.0116.0-56 con claras delaminaciones frontales y traseras.



Figura 62: Laminados 46.0116.0-32 y 46.0116.0-62 con delaminaciones.

Los resultados obtenidos muestran una degradación del laminado en todos los casos. Se observa una penetración de la humedad, en general a través del policarbonato, ya que en laminados como 46.116.0-32 la delaminación se ha producido por el centro de la célula, esto indica que la humedad no ha entrado por los bordes.

### 6.2.2. Policarbonato

Las muestras de policarbonato ensayadas bajo calor húmedo se recogen en la siguiente Tabla.

Muestra	Composición	Horas de ensayo
46.0116.0-54	PC 2mm	72
46.0116.0-55	PC 4mm	72

Tabla 11: Resumen de muestras sometidas a ensayos de calor húmedo.

En cuanto al policarbonato, no se observa una degradación o absorción de humedad visible o analizable mediante el ensayo de inspección visual.

### 6.2.3. Resultados del ensayo de calor húmedo

Tras el ensayo de calor húmedo a las diferentes muestras, los resultados finales se muestran en la siguiente Tabla.

Muestra	Composición	Horas de ensayo	¿Pasa el ensayo de calor
---------	-------------	-----------------	--------------------------

			húmedo?
46.0116.0-32	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE	235	NO
46.0116.0-34	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE	235	NO
46.0116.0-51	PC (4mm) + EVA + EVA + PPE	72	NO
46.0116.0-56	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + PPE	72	NO
46.0116.0-61	PC (2mm) + EVA + PC (2mm)	72	NO
46.0116.0-62	PC (2mm) + EVA + PC (2mm)	72	NO
46.0116.0-54	PC 2mm	72	SI
46.0116.0-55	PC 4mm	72	SI

Tabla 12: Resultados tras el ensayo de calor húmedo.

Se muestra un claro problema de delaminación, debido a la absorción de humedad del policarbonato. No obstante, el laminado 46.0116.0-32 es el que menos delaminación ha obtenido en comparación con el resto.

Comparando las características eléctricas del módulo 46.0116.0-56 antes (Buckling) y después del ensayo de calor húmedo (MQT13), vemos las siguientes pérdidas en la Figura que se muestra a continuación. Este ensayo de calor húmedo ha sido realizado tras el ensayo de Buckling, estado del que se parte como estado inicial.

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
<b>46.0116.0-056 Buckling</b>	<b>8.04</b>	<b>2.51</b>	<b>14.42</b>	<b>2.00</b>	<b>7.20</b>	<b>71.55</b>
<b>46.0116.0-056 MQT13</b>	<b>7.72</b>	<b>2.51</b>	<b>13.93</b>	<b>1.97</b>	<b>7.06</b>	<b>72.02</b>
<b>Δ Tras MQT13 vs Buckling</b>	<b>-4.05%</b>	<b>0.03%</b>	<b>-3.39%</b>	<b>-1.47%</b>	<b>-1.95%</b>	<b>0.66%</b>

Tabla 13: Pérdidas eléctricas después del ensayo de calor húmedo.

Como se puede observar, se produce una pérdida de I<sub>sc</sub> del 4,05 % y una pérdida de potencia máxima del 3,39 %.

La comparación del ensayo visual para este módulo se contempla en la siguiente Figura.

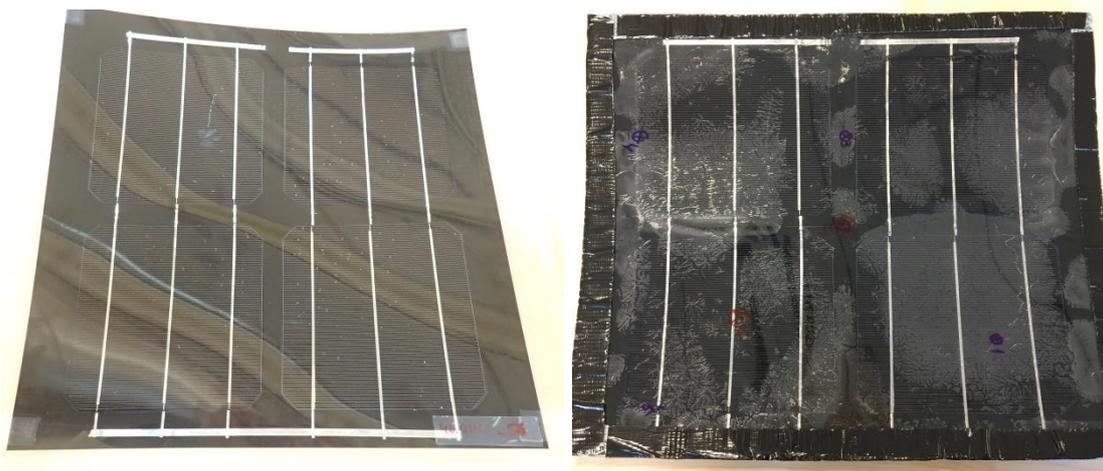


Figura 63: Comparación visual del laminado 46.0116.0-56.

También se ha realizado la medida de transmitancia en las muestras 46.0116.0-61, 46.0116.0-62, 46.0116.0-54 y 46.0116.0-55, para medir la diferencia de los valores con la posible absorción de humedad.

En la siguiente Figura se muestra la gráfica con los valores de transmitancia de cada muestra.

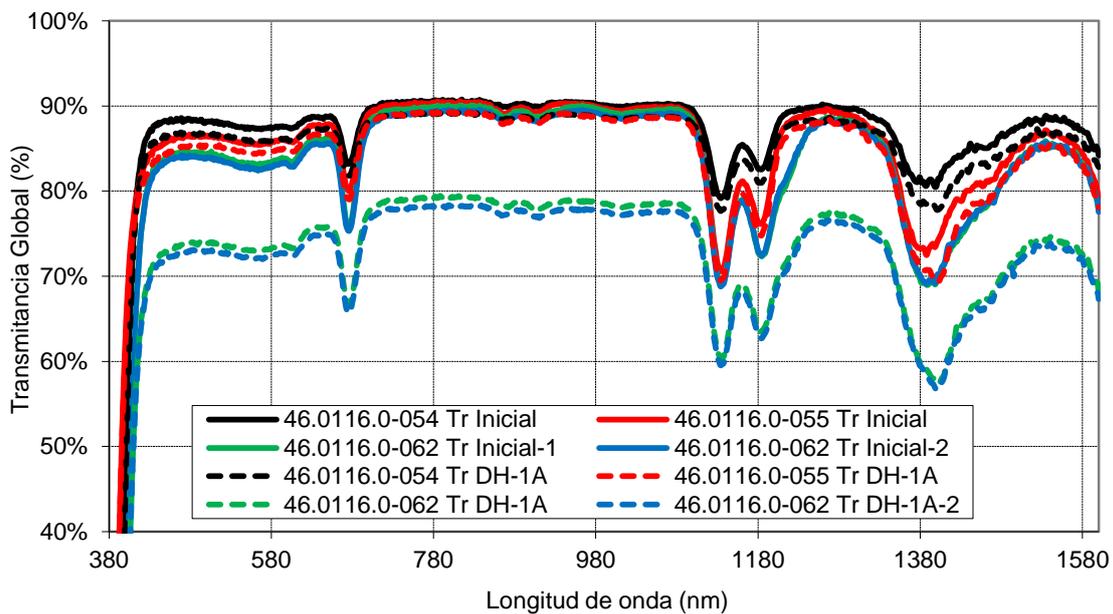


Figura 64: Valores de transmitancia de los diferentes laminados ensayados.

A continuación, se observan las pérdidas obtenidas en las muestras anteriores tras el ensayo de calor húmedo.

Transmitancia promedio (400nm-1200nm)	Policarbonato 3mm	Policarbonato 5mm	Laminado-1	Laminado-2	
		46.0116.0-054	46.0116.0-055	46.0116.0-061	46.0116.0-062
<b>Inicial</b>	88.0	86.7		84.9	84.4
<b>Tras DH-1A (72h; 85°C; 85%RH)</b>					
	86.5	85.5	77.2	74.5	73.5
<b>Tras DH-1B (24h Recuperación)</b>					
	87.2	85.9	78.6	75.2	75.7
<b>ΔTr. Tras DH-1A</b>					
	-1.7%	-1.4%		-12.2%	-12.9%
<b>ΔTr. Tras DH-1B</b>					
	-0.9%	-0.9%		-11.4%	-10.3%

Tabla 14: Pérdidas de transmitancia tras el ensayo de calor húmedo.

El laminado 46.0116.0-62 compuesto por PC (2mm) + EVA + PC (2mm) es el que mayor pérdida de transmitancia obtiene.

Se han realizado medidas de transmitancia 24 horas después del ensayo de calor húmedo, como período de recuperación, mejorando levemente la transmitancia, como se observa en la Tabla anterior.

### 6.3. Ensayos mecánicos

A continuación se describen los ensayos llevados a cabo a las muestras fabricadas con diferentes composiciones de sándwich, además de distintas recetas.

Como se comentó en el capítulo 3, se han ensayado también laminados de 4 células con dimensiones del policarbonato de 400 x 400 mm para realizar ensayos de Buckling.

#### 6.3.1. Ensayo de granizo

En este capítulo se presentan los resultados tras el ensayo de granizo. Se han sometido muestras de laminados completos con espesores de policarbonato de 2 mm y de 4 mm. También se han comparado los resultados de los laminados con refuerzo y sin refuerzo. En la siguiente Tabla se muestran los nombres de las muestras sometidas a ensayo, así como su composición de laminado.

Muestra	Composición
46.0116.0-27	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE
46.0116.0-28	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + PPE
46.0116.0-29	PC (4mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE
46.0116.0-56	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + PPE
46.0116.0-58	PC (4mm) + EVA + CEL + EVA + PPE

Tabla 15: Resumen de muestras sometidas a ensayos de calor húmedo.

En el caso de la muestra 46.0116.0-56, corresponde a un laminado de 400 mm x 400 mm con células monocristalinas.

Previo a la realización de cada ensayo, se ha procedido a realizar una inspección visual y una imagen de electroluminiscencia para poder comparar los daños y las modificaciones resultantes del impacto de granizo. Además, también se ha realizado una caracterización eléctrica de cada laminado, obteniendo las curvas I-V para poder comprobar las posibles pérdidas en cuanto a eficiencia y valores eléctricos representativos.

### 6.3.1.1. Policarbonato 2mm sin refuerzo

#### A) DIAGNÓSTICO INICIAL

La muestra ensayada 46.0116.0-28 se compone de un laminado sin refuerzo. En la siguiente figura se muestra el estado inicial mediante electroluminiscencia.

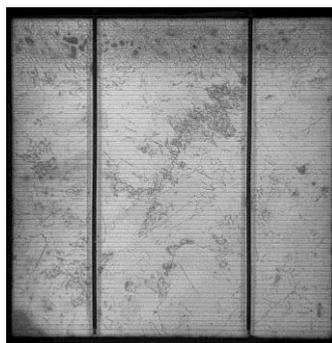
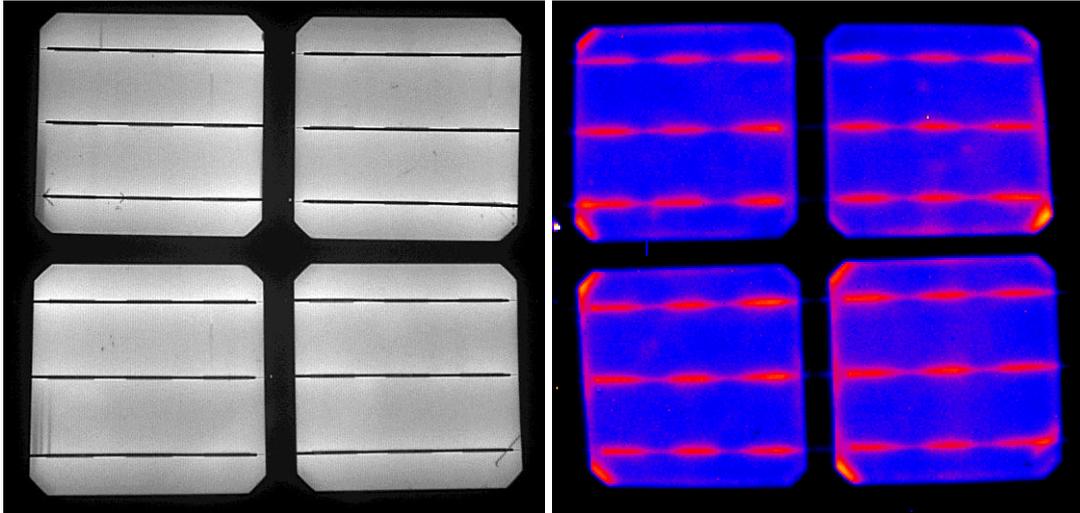


Figura 65: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-28.

En este caso en particular, también se ha sometido a ensayo de granizo el módulo 46.0116.0-56, compuesto por 4 células monocristalinas conectadas en serie. Este módulo tiene un tamaño de 400 x 400 mm. A continuación se muestran las imágenes de electroluminiscencia y termografía realizadas tras su laminación.



*Figura 66: electroluminiscencia y termografía del módulo 46.0116.0-56.*

Estas imágenes muestran una pequeña grieta en la célula inferior derecha. Esta grieta puede ser debida al proceso de soldadura previa a la laminación. No obstante, no afecta a la aparición de shunts o cortocircuitos ya que no se aprecian puntos calientes en la imagen de termografía.

#### B) DIAGNÓSTICO FINAL

Tras un impacto de granizo en el centro del laminado, el resultado final de la muestra 46.0116.0-28 se muestra en la siguiente Figura. Se puede observar los daños causados por el impacto.



*Figura 67: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-28.*

En cuanto al módulo de 4 células, las imágenes de electroluminiscencia y termografía tras el impacto de granizo son las siguientes.

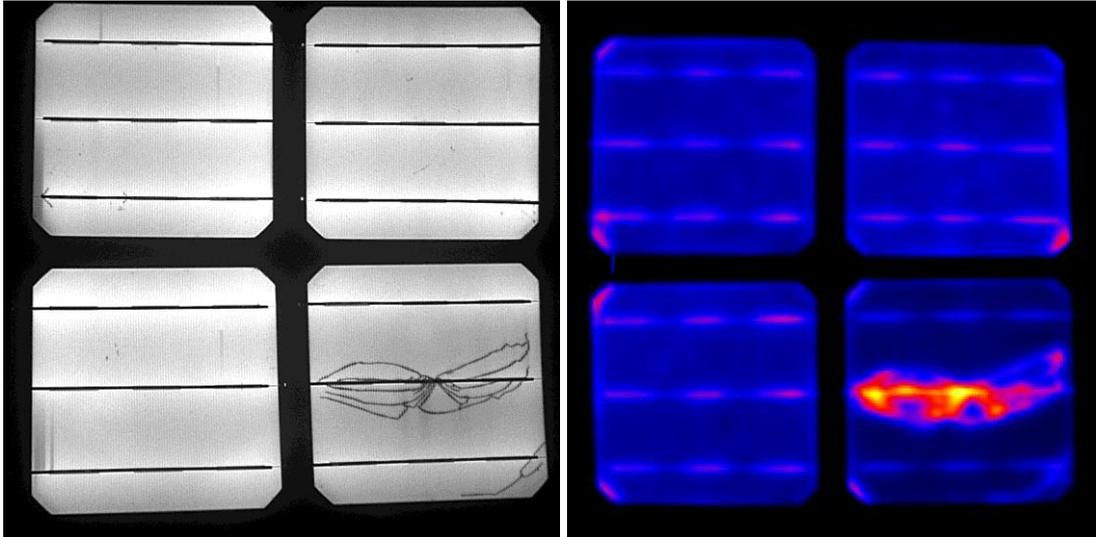


Figura 68: electroluminiscencia y termografía del módulo 46.0116.0-56 tras el impacto de granizo.

Se puede observar claramente el impacto del granizo en la célula inferior derecha. Además, se ha agrandado la grieta inicial con la que contaba.

Respecto a la imagen de termografía, muestra claramente un shunt en el lugar del impacto, generando un punto caliente.

### 6.3.1.2. Policarbonato 2mm con refuerzo

#### A) DIAGNÓSTICO INICIAL

La muestra ensayada 46.0116.0-27 se compone de un laminado con refuerzo. En la siguiente figura se muestra el estado inicial mediante electroluminiscencia.

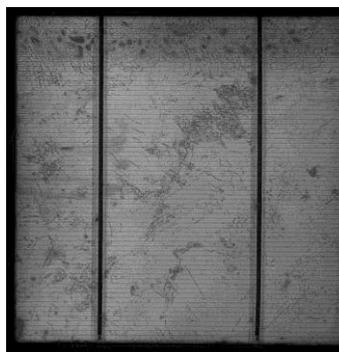


Figura 69: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-27

#### B) DIAGNÓSTICO FINAL

Tras un impacto de granizo en el centro del laminado, el resultado final se muestra en la siguiente Figura. Se puede observar los daños causados por el impacto.



*Figura 70: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-27 tras un impacto de granizo*

### **6.3.1.3. Policarbonato 4mm sin refuerzo**

#### **A) DIAGNÓSTICO INICIAL**

La muestra ensayada 46.0116.0-58 se compone de un laminado sin refuerzo. En la siguiente figura se muestra el estado inicial mediante electroluminiscencia.



*Figura 71: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-58*

#### **B) DIAGNÓSTICO FINAL**

Tras un impacto de granizo en el centro del laminado, el resultado final se muestra en la siguiente Figura. Se puede observar los daños causados por el impacto.



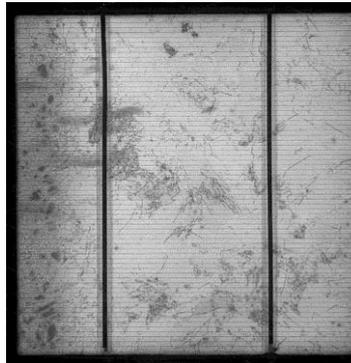
*Figura 72: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-58 tras un impacto de granizo*

Los daños han sido menores que en los policarbonatos con menor espesor. A pesar de ello, las grietas son evidentes.

#### **6.3.1.4. Policarbonato 4mm con refuerzo**

##### **A) DIAGNÓSTICO INICIAL**

La muestra ensayada 46.0116.0-29 se compone de un laminado con refuerzo. En la siguiente figura se muestra el estado inicial mediante electroluminiscencia.



*Figura 73: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-29*

##### **B) DIAGNÓSTICO FINAL**

En este caso, se han realizado dos impactos en el laminado, ya que el primero no ha ocasionado ningún daño, comprobando así la repetitividad del experimento.



Figura 74: electroluminiscencia del laminado 46.0116.0-29 tras un impacto de granizo

No se observa ningún tipo de daño en el laminado.

### 6.3.1.5. Resultados finales del ensayo de granizo

Tras el ensayo de granizo, los resultados finales se muestran en la siguiente Tabla.

Muestra	Composición	¿Pasa el ensayo de granizo?
46.0116.0-27	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE	NO
46.0116.0-28	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + PPE	NO
46.0116.0-29	PC (4mm) + EVA + CEL + EVA + REF + EVA + PPE	SI
46.0116.0-56	PC (2mm) + EVA + CEL + EVA + PPE	NO
46.0116.0-58	PC (4mm) + EVA + CEL + EVA + PPE	NO

Tabla 16: Resultados finales del ensayo de granizo.

Por tanto, de este ensayo se concluye que es necesario un policarbonato de espesor 4 mm acompañado de un refuerzo en sus componentes estructurales para la resistencia al impacto de granizo.

Por otro lado, en la siguiente tabla se comparan las características eléctricas de cada laminado antes (Inicial) y después de los ensayos (MQT17\_1). De esta forma se puede observar las pérdidas ocasionadas tras la rotura de alguna de las células.

Nº SERIE	I <sub>sc</sub> (A)	V <sub>oc</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-027 Inicial	7.78	0.62	3.05	0.43	7.05	63.62
46.0116.0-027 MQT17_1	7.70	0.62	2.98	0.43	6.87	63.02

<b>Δ Tras MQT-17_1 vs Inicial</b>	<b>-1.09%</b>	<b>-0.05%</b>	<b>-2.07%</b>	<b>0.47%</b>	<b>-2.53%</b>	<b>-0.94%</b>
-----------------------------------	---------------	---------------	---------------	--------------	---------------	---------------

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-028 Inicial	7.74	0.62	2.95	0.42	6.99	61.72
46.0116.0-028 MQT17_1	7.65	0.61	2.91	0.43	6.80	61.83
<b>Δ Tras MQT-17_1 vs Inicial</b>	<b>-1.21%</b>	<b>-0.43%</b>	<b>-1.48%</b>	<b>1.23%</b>	<b>-2.67%</b>	<b>0.17%</b>

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-029 Inicial	7.70	0.62	2.99	0.43	6.97	62.84
46.0116.0-029 MQT17_1	7.65	0.62	2.95	0.43	6.91	62.62
<b>Δ Tras MQT-17_1 vs Inicial</b>	<b>-0.63%</b>	<b>-0.40%</b>	<b>-1.36%</b>	<b>-0.52%</b>	<b>-0.85%</b>	<b>-0.34%</b>

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-056 Inicial	8.04	2.53	15.51	2.05	7.56	76.12
46.0116.0-056 MQT17_1	7.99	2.53	14.80	2.04	7.26	73.24
<b>Δ Tras MQT-17_1 vs Inicial</b>	<b>-0.65%</b>	<b>-0.14%</b>	<b>-4.54%</b>	<b>-0.52%</b>	<b>-4.04%</b>	<b>-3.78%</b>

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-058 Inicial	7.48	0.62	2.89	0.43	6.76	62.75
46.0116.0-058 MQT17_1	7.39	0.61	2.77	0.42	6.53	61.03
<b>Δ Tras MQT-17_1 vs Inicial</b>	<b>-1.17%</b>	<b>-0.38%</b>	<b>-4.24%</b>	<b>-0.84%</b>	<b>-3.43%</b>	<b>-2.73%</b>

Tabla 17: Comparación de características eléctricas tras el ensayo de granizo.

Además, en la siguiente gráfica se observa la comparativa entre las curvas I-V realizadas en condiciones estándar de medida del módulo 46.0116.0-56 antes y después del impacto de granizo. Están señalados los puntos de máxima potencia para cada caso.

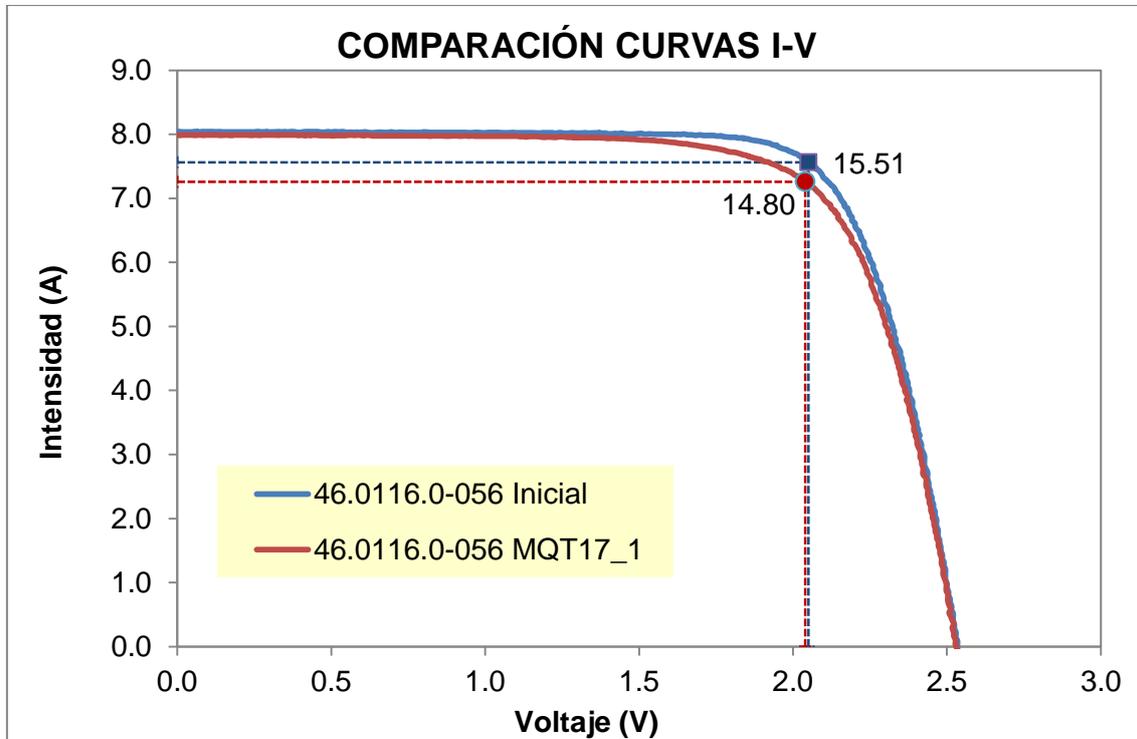


Figura 75: Curva I-V antes y después del ensayo de granizo del módulo 46.0116.0-56.

### 6.3.2. Ensayo de Buckling

Para el ensayo de Buckling o ensayo de pandeo, se han utilizado módulos laminados de 400 mm x 400 mm y con policarbonato de 2 mm de espesor. Se han utilizado células de silicio monocristalinas de 3 Bus-Bar (3BB) y células de silicio policristalino de 2 Bus-Bar (2BB). Éstas últimas son las que se utilizan en todos los laminados dentro del proyecto AiSoVol, no obstante, se ha querido comparar los resultados utilizando diferentes tipos de células.

Muestra	Composición	Tipo de células
46.0116.0-56	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + PPE	3BB
46.0116.0-57	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + REF + EVA + PPE	3BB
46.0116.0-59	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + REF + EVA + PPE	2BB

46.0116.0-60	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + PPE	2BB
--------------	------------------------------------	-----

*Tabla 18: Resumen de muestras sometidas a ensayos de Buckling.*

Para este ensayo, se han realizado pruebas de electroluminiscencia y termografía antes y después de la prueba. De esta forma, se puede observar las grietas que se han generado tras el pandeo, gracias a la electroluminiscencia, mientras que la termografía nos muestra los posibles shunts generados.

Se ha realizado una inspección visual inicial para comprobar el pandeo con el que cuenta en estado de reposo, además de una caracterización eléctrica antes y después de cada prueba para comparar las posibles pérdidas ocasionadas.

### **6.3.2.1. Polycarbonato 2mm sin refuerzo célula 3BB monocristalinas**

El primer ensayo de Buckling se ha realizado con un módulo de 4 células 3BB conectadas en serie, laminado con polycarbonato de 2 mm de espesor y sin refuerzo. Esta muestra esta numerada como 46.0116.0-56.

#### **A) DIAGNÓSTICO INICIAL**

En la siguiente Figura se muestran las imágenes tomadas durante la inspección visual, donde se aprecia una vista frontal y una lateral para mostrar el pandeo en estado de reposo. Cabe señalar que este laminado ya ha sido previamente ensayado en el ensayo de granizo, por lo que cuenta con una de sus células ya agrietadas por dicho impacto.



*Figura 76: Inspección visual del módulo 46.0116.0-56.*

Las imágenes tomadas en el ensayo de electroluminiscencia y termografía muestran el siguiente aspecto.

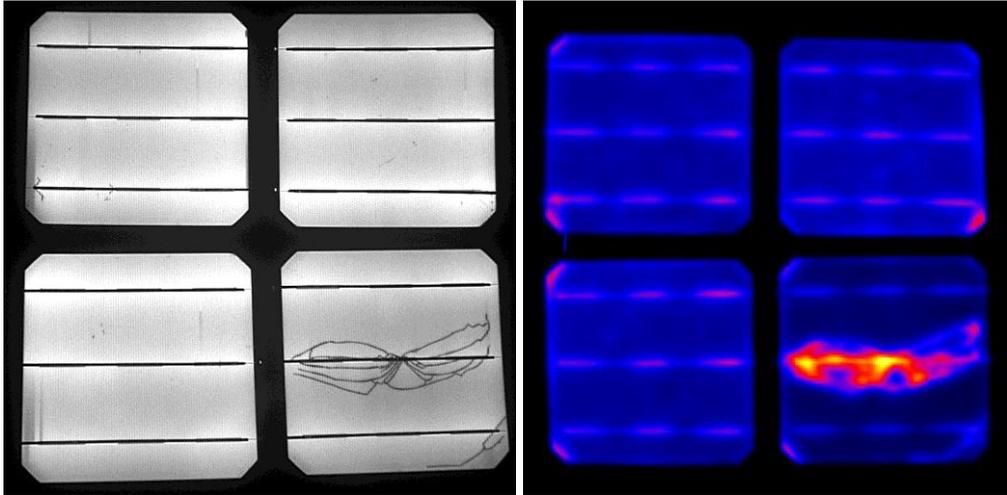


Figura 77: Electroluminiscencia y termografía del módulo 46.0116.0-56.

Como se ha anteriormente, el estado inicial del módulo es en este caso, el estado final del ensayo de granizo. No obstante, no afectará al resultado ya que las 3 células restantes se encuentran sin ningún tipo de daño. Por tanto, a la hora de analizar los resultados y sacar conclusiones de este experimento, habrá que centrarse en esas 3 células no dañadas.

#### B) DIAGNÓSTICO FINAL

Tras el ensayo de Buckling, el cual se ha realizado hasta el agrietamiento de la totalidad de las células que componen el módulo, se observan las siguientes imágenes de electroluminiscencia y termografía. En concreto, en la figura correspondiente a la termografía se observa los shunts generados por las grietas.

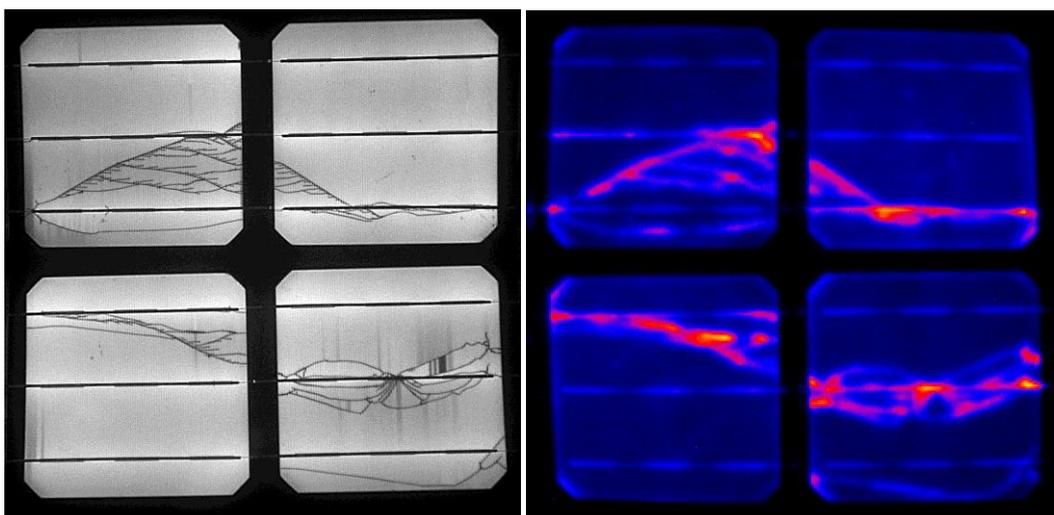


Figura 78: Electroluminiscencia y termografía tras el ensayo de Buckling.

En la siguiente Figura se muestra una imagen para ayudar a visualizar el pandeo total al que ha sido sometido en esta prueba.

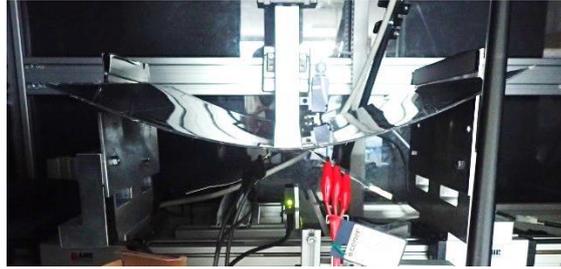


Figura 79: Situación final de pandeo.

La distancia de flecha máxima de pandeo, previo a la rotura de la totalidad de las células es de 3,212 cm desde el estado de reposo.

En la siguiente Figura queda reflejada la gráfica del pandeo frente al tiempo.

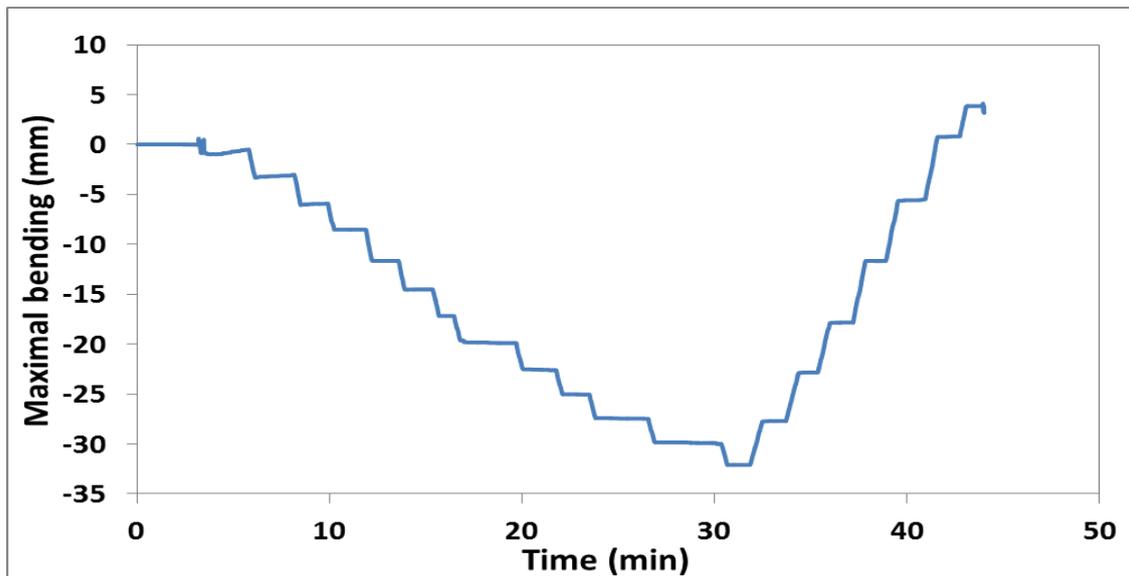


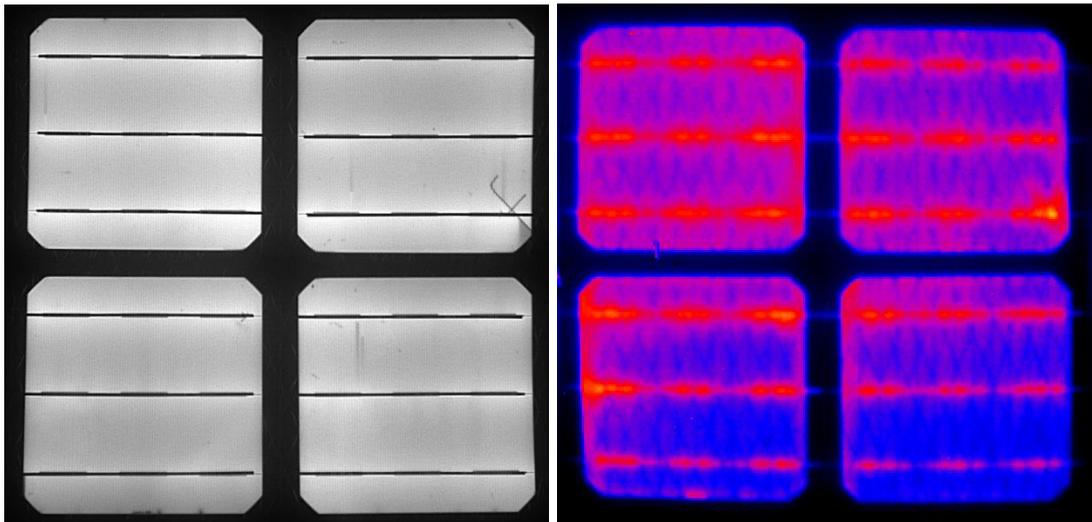
Figura 80: Bending o pandeo frente al tiempo de la muestra 46.0116.0-56.

### 6.3.2.2. Polycarbonato 2mm con refuerzo célula 3BB monocristalinas

En este ensayo se ha probado la resistencia al pandeo de un módulo de 4 células de 3BB monocristalinas, con polycarbonato de 2 mm con refuerzo en su laminado. Esta muestra tiene la numeración 46.0116.0-57.

#### A) DIAGNÓSTICO INICIAL

Las imágenes de electroluminiscencia y termografía del laminado 46.0116.0-57 se muestran en la Figura 81. Estas imágenes han sido tomadas tras su laminado.



*Figura 81: Electroluminiscencia y termografía de la muestra 46.0116.0-57.*

Se puede observar una grieta en la célula superior derecha. La aparición de esta grieta a 45° cercana al bus, hace indicar su aparición durante el proceso de soldadura. Como se comentó en el capítulo 3 en referencia a la soldadura de las células, es un proceso delicado, en el que una excesiva presión del estañador sobre el ribbon puede generar defectos como este.

Por otro lado, al igual que en el caso del laminado 46.0116.0-56, esta grieta no resulta un problema para el análisis del experimento, ya que ofrece una visión real del posible estado de las células.

Cabe destacar que en la imagen de termografía se observa una no homogeneidad del calor. Esto es debido a que el laminado cuenta con un pandeo inicial, este pandeo hace que la imagen tomada con la cámara termográfica sea irregular. No obstante, no se aprecian disconformidades en cuanto a su estructura, a excepción de la pequeña grieta comentada anteriormente.

## B) DIAGNÓSTICO FINAL

Tras aplicar presión lateral y forzar al laminado al pandeo, los resultados finales se muestran en las siguientes imágenes.

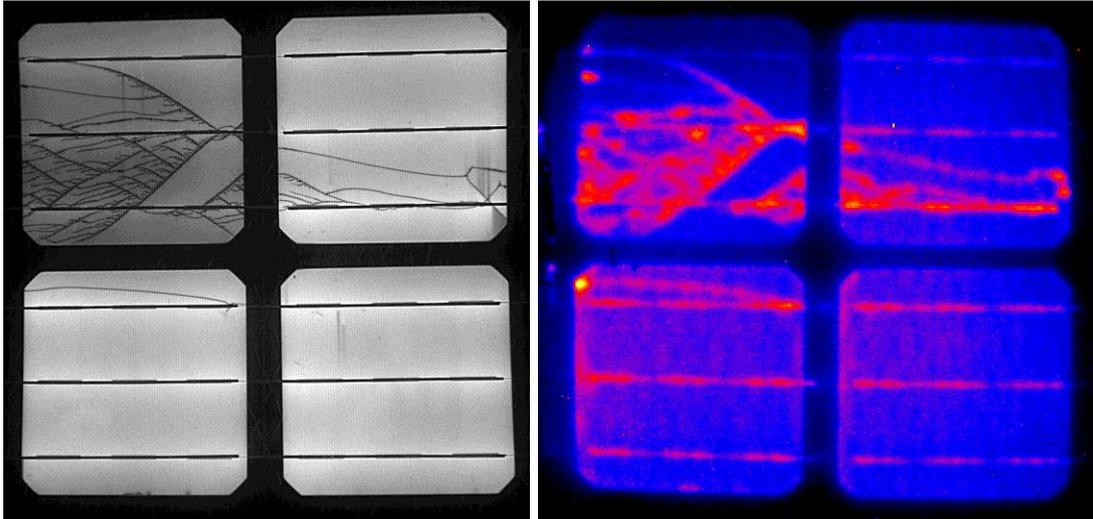


Figura 82: Electroluminiscencia y termografía tras el Buckling en la muestra 46.0116.0-57.

La distancia de flecha máxima de pandeo, previo a la rotura de la totalidad de las células es de 5,203 cm desde el estado de reposo.

En la siguiente Figura se refleja el pandeo sometido frente al tiempo.

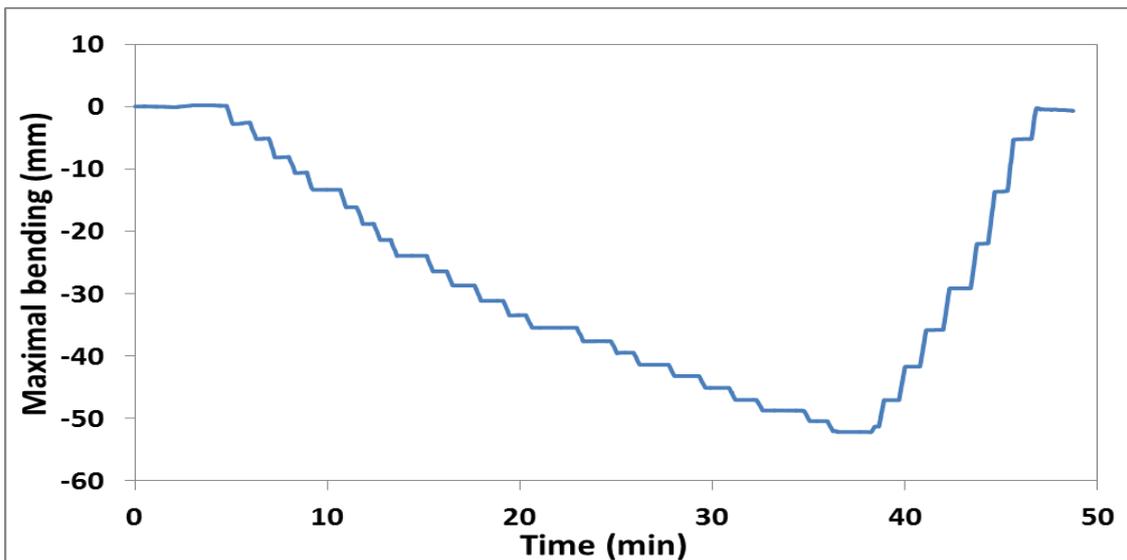


Figura 83: Bending o pandeo frente al tiempo en la muestra 46.0116.0-57.

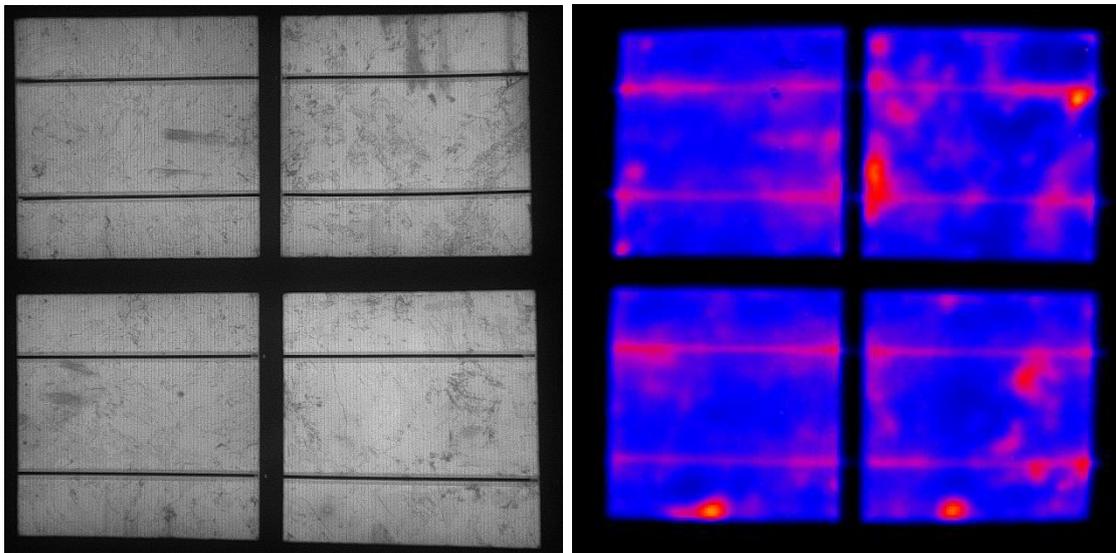
### 6.3.2.3. Policarbonato 2mm sin refuerzo célula 2BB policristalina

Continuando con el ensayo de Buckling, en este caso se ha realizado el estudio de las células disponibles para el proyecto AiSoVol. Estas células son de silicio policristalino

de 2BB. De esta forma se ha podido comparar resultados con las células de silicio monocristalino.

#### A) DIAGNÓSTICO INICIAL

A continuación se muestran las imágenes de electroluminiscencia y termografía tomadas tras el proceso de laminado de la muestra 46.0116.0-60. Este laminado se compone de 4 células, con policarbonato de 2 mm. Se observa una pequeña grieta en la célula superior derecha, generadora de un pequeño shunt como se aprecia en la termografía. Se prevé por tanto, que el agrietamiento durante el ensayo de Buckling comenzará en dicha célula.



*Figura 84: Electroluminiscencia y termografía de la muestra 46.0116.0-60.*

#### B) DIAGNÓSTICO FINAL

Tras el pandeo hasta el agrietamiento total de todas las células, los resultados finales quedan reflejados en la siguiente Figura.

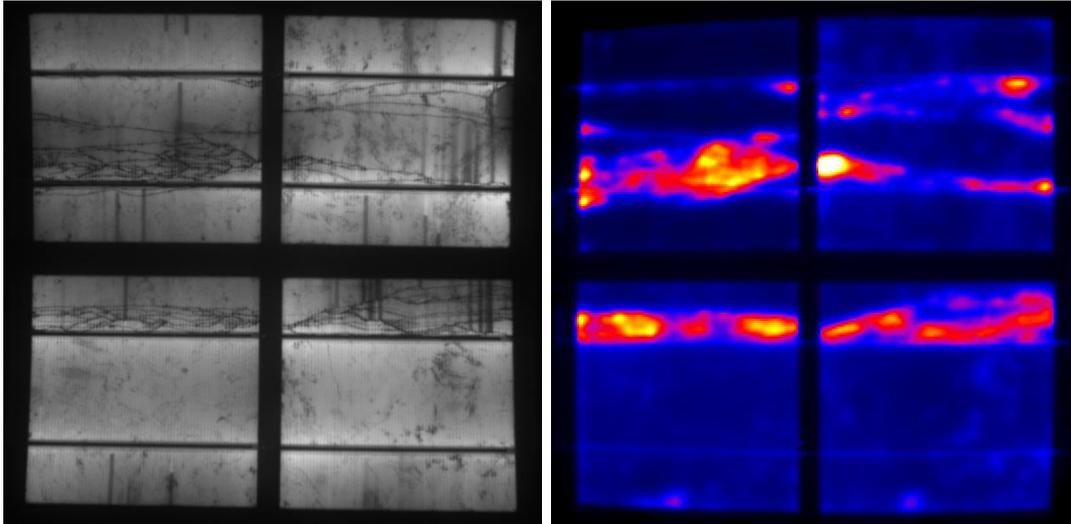


Figura 85: Electroluminiscencia y termografía del laminado 46.0116.0-60 tras Buckling.

La distancia de flecha máxima soportada hasta la rotura de la totalidad de las células es de 5,438 cm.

En la siguiente Figura se muestra el pandeo sometido frente al tiempo.

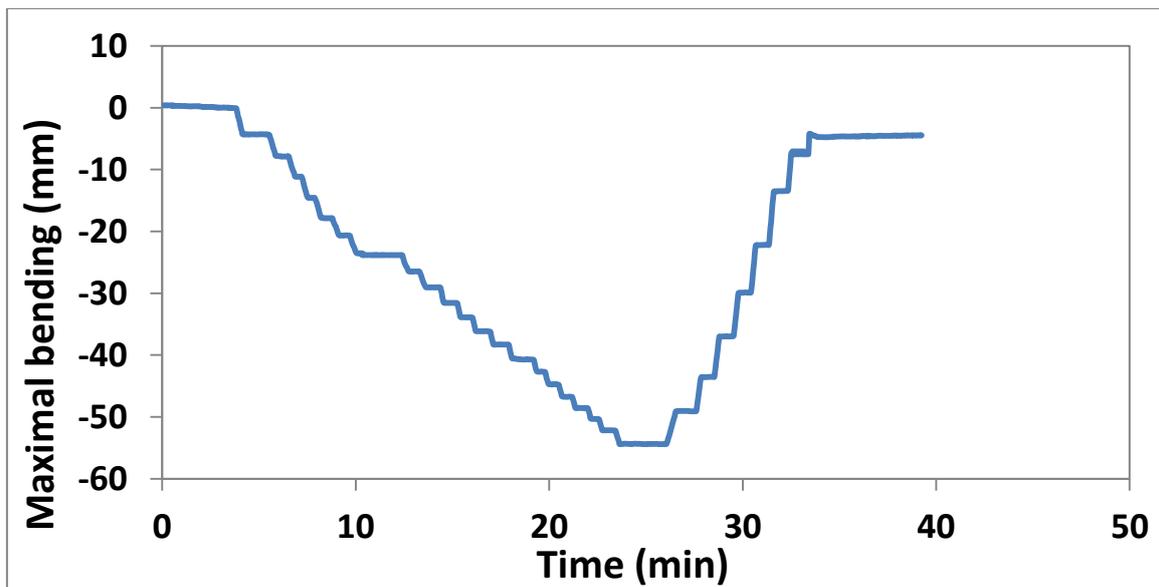


Figura 86: Pandeo frente al tiempo de la muestra 46.0116.0-60.

#### 6.3.2.4. Policarbonato 2mm con refuerzo célula 2BB policristalina

El último ensayo de Buckling se ha realizado sobre un laminado similar al anterior, pero esta vez con refuerzo. Este laminado tiene la numeración 46.0116.0-59.

#### A) DIAGNÓSTICO INICIAL

La caracterización inicial tras el proceso de laminado, muestra el siguiente aspecto.  
(Ver Figura 87).

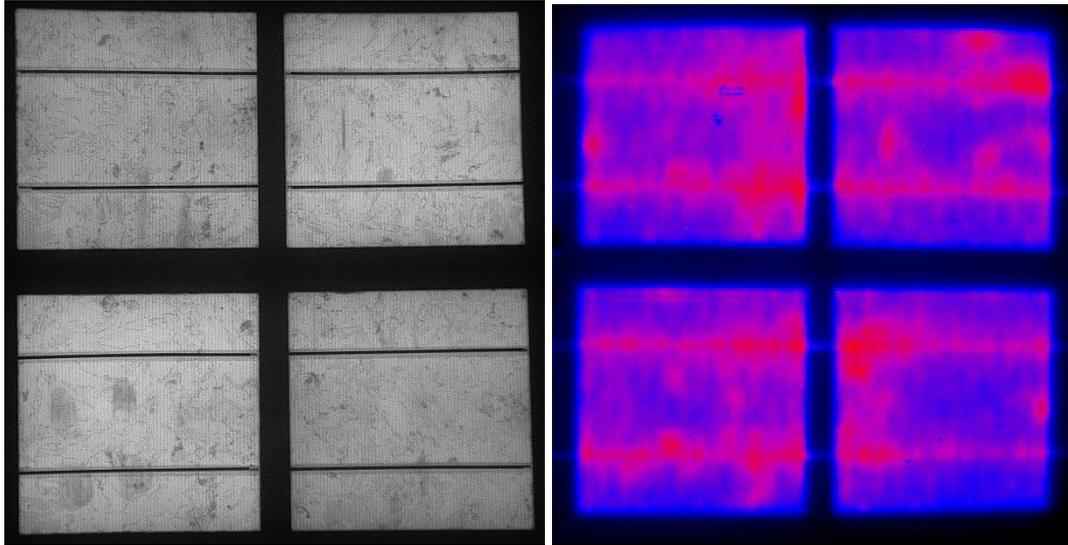


Figura 87: Electroluminiscencia y termografía del laminado 46.0116.0-59.

En este caso, el laminado muestra un aspecto impecable en cuanto a defectos en sus células.

#### B) DIAGNÓSTICO FINAL

Tras el ensayo de pandeo, este último laminado muestra los siguientes daños en sus células.

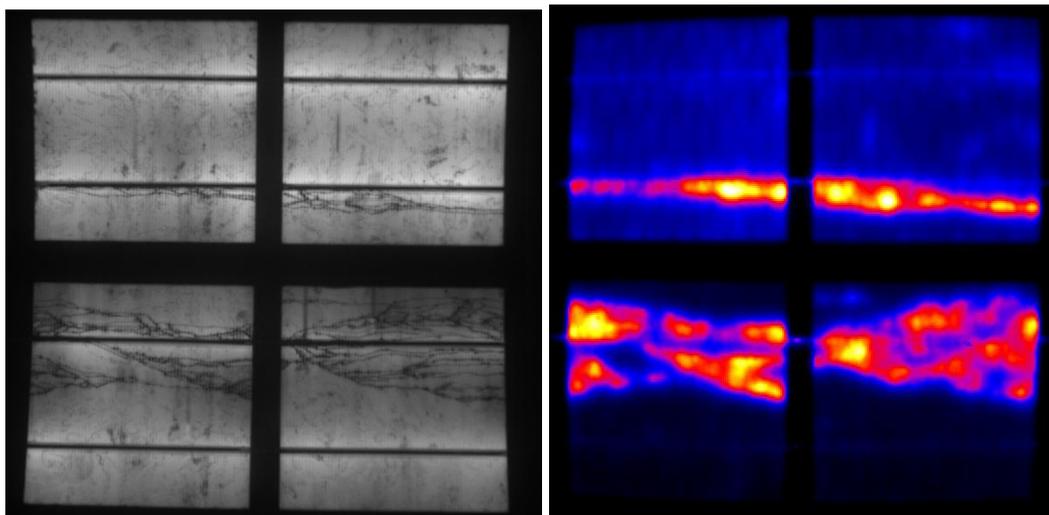


Figura 88: Electroluminiscencia y termografía tras Buckling en laminado 46.0116.0-59.

En este caso, se observa que la rotura ha generado shunts importantes, aislando parcialmente las células inferiores del paso de la corriente.

La distancia de flecha máxima soportada hasta la rotura de la totalidad de las células es de 6,583 cm.

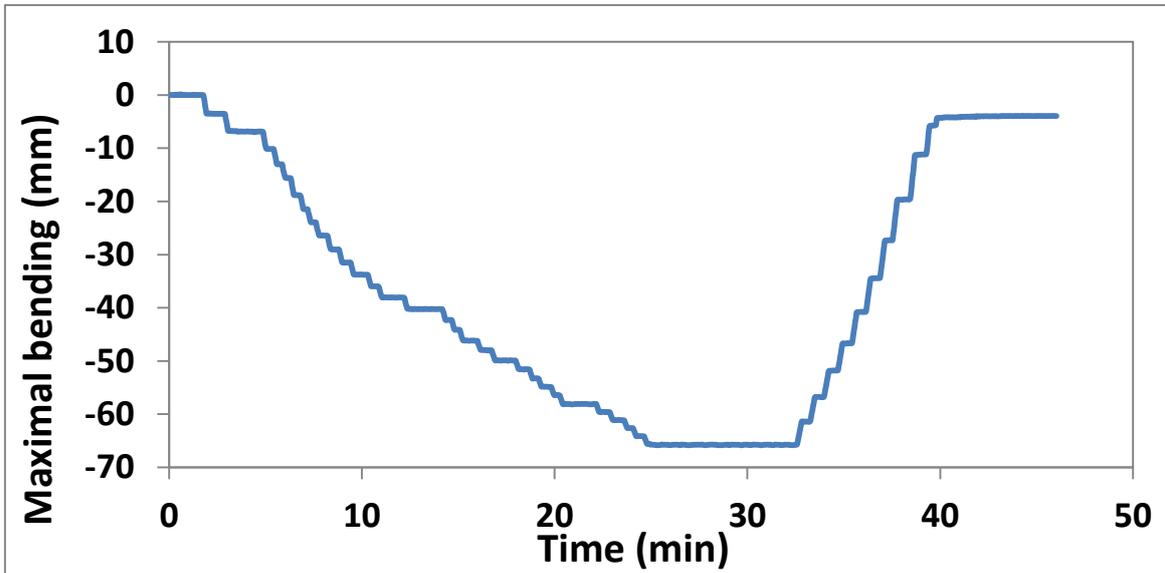


Figura 89: Pandeo frente al tiempo de la muestra 46.0116.0-59.

#### 6.3.2.5. Resultados finales del ensayo de Buckling

Del ensayo de Buckling, se puede resumir todos los resultados obtenidos en la Tabla 19.

Muestra	Composición	Tipo de células	Flecha máxima (cm)
46.0116.0-56	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + PPE	3BB Mono-Si	3,212
46.0116.0-57	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + REF + EVA + PPE	3BB mono-Si	5,203
46.0116.0-59	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + REF + EVA + PPE	2BB poli- Si	6,583
46.0116.0-60	PC (2mm) + EVA + 4 CEL + EVA + PPE	2BB poli- Si	5,438

Tabla 19: Resultados tras el ensayo de Buckling.

Como se puede observar, este resultado confirma la mejora en la aportación del refuerzo en el laminado, dándose la flecha máxima en el módulo de 4 células tipo 2BB de silicio policristalino con refuerzo.

En la siguiente Tabla se muestra la comparación eléctrica previa y posterior al ensayo. De esta forma, se puede observar las pérdidas ocasionadas por la rotura de las células.

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-056 MQT17_1	7.99	2.53	14.80	2.04	7.26	73.24
46.0116.0-056 Buckling	8.04	2.51	14.42	2.00	7.20	71.55
<b>Δ Tras Buckling vs MQT17_1</b>	<b>0.68%</b>	<b>-0.95%</b>	<b>-2.59%</b>	<b>-1.83%</b>	<b>-0.77%</b>	<b>-2.32%</b>

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-057 Inicial	8.12	2.54	15.58	2.05	7.61	75.62
46.0116.0-057 Buckling	8.10	2.51	14.24	1.99	7.15	70.17
<b>Δ Tras Buckling vs Inicial</b>	<b>-0.25%</b>	<b>-1.27%</b>	<b>-8.63%</b>	<b>-2.79%</b>	<b>-6.00%</b>	<b>-7.22%</b>

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-059 Inicial	7.58	2.47	13.98	1.97	7.09	74.80
46.0116.0-059 Buckling	7.55	2.42	11.09	1.87	5.92	60.78
<b>Δ Tras Buckling vs Inicial</b>	<b>-0.38%</b>	<b>-1.99%</b>	<b>-20.67%</b>	<b>-5.11%</b>	<b>-16.40%</b>	<b>-18.75%</b>

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-060 Inicial	7.38	2.47	13.80	1.98	6.96	75.84
46.0116.0-060 Buckling	7.58	2.42	11.64	1.89	6.17	63.41
<b>Δ Buckling vs Inicial</b>	<b>2.59%</b>	<b>-1.73%</b>	<b>-15.70%</b>	<b>-4.92%</b>	<b>-11.34%</b>	<b>-16.38%</b>

Tabla 20: Comparación características eléctricas en CEM

La comparación de características eléctricas también se ha realizado mediante ensayo flash a baja irradiancia. A continuación se muestran los resultados.

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-056 MQT17_1	1.61	2.33	2.71	1.90	1.43	72.42
46.0116.0-056 Buckling	1.63	2.28	2.39	1.82	1.31	64.61
<b>Δ Tras Buckling vs MQT17_1</b>	<b>1.01%</b>	<b>-1.98%</b>	<b>-11.67%</b>	<b>-3.94%</b>	<b>-8.05%</b>	<b>-10.78%</b>

Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-057 Inicial	1.65	2.35	3.05	1.97	1.55	78.70
46.0116.0-057 Buckling	1.64	2.26	2.39	1.74	1.37	64.81
<b>Δ Tras Buckling vs Inicial</b>	<b>-0.95%</b>	<b>-3.77%</b>	<b>-21.50%</b>	<b>-11.58%</b>	<b>-11.22%</b>	<b>-17.65%</b>

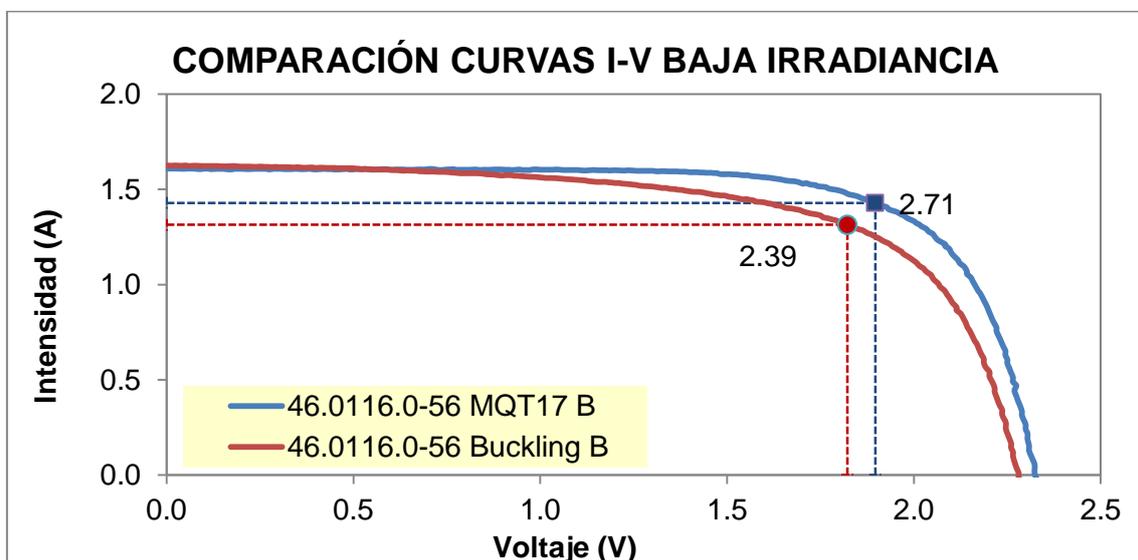
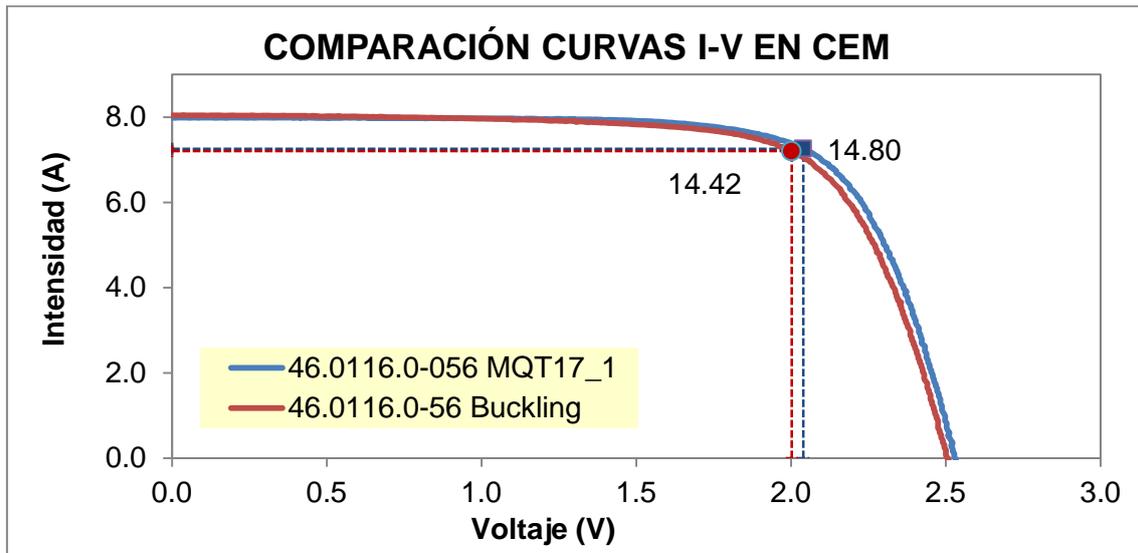
Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-059 Inicial	1.54	2.28	2.74	1.92	1.43	77.83
46.0116.0-059 Buckling	1.54	2.00	1.42	1.35	1.05	46.24
<b>Δ Tras Buckling vs Inicial</b>	<b>-0.42%</b>	<b>-12.41%</b>	<b>-48.18%</b>	<b>-29.74%</b>	<b>-26.24%</b>	<b>-40.59%</b>

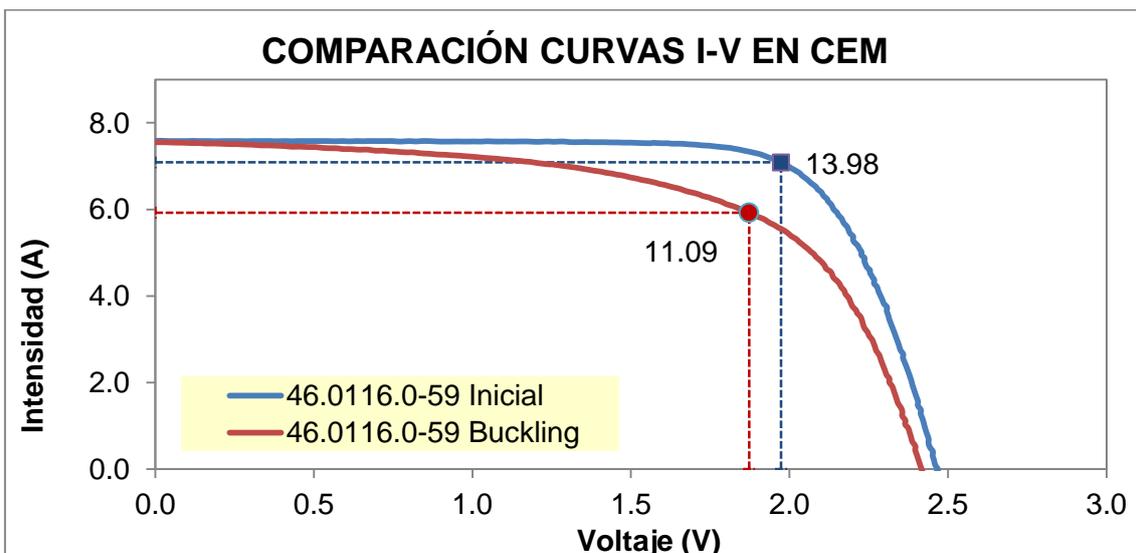
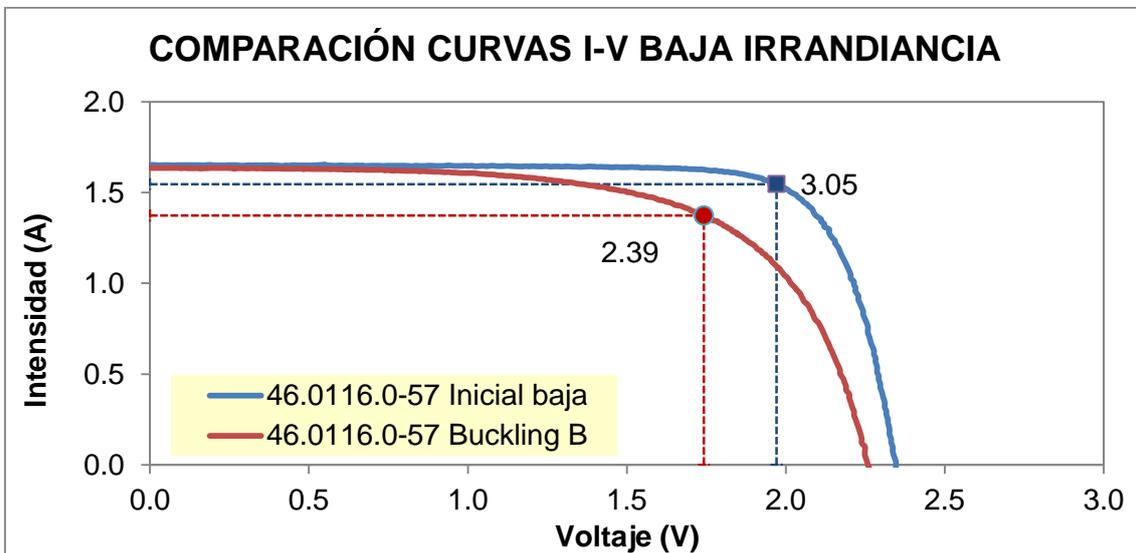
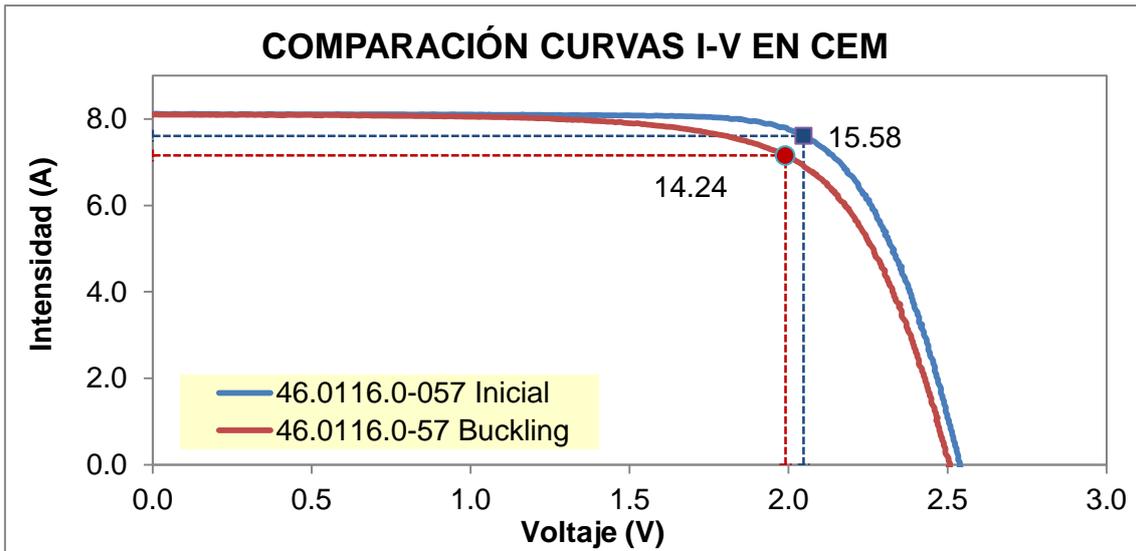
Nº SERIE	I <sub>SC</sub> (A)	V <sub>OC</sub> (V)	P <sub>MAX</sub> (W)	V <sub>MP</sub> (V)	I <sub>MP</sub> (A)	FF (%)
46.0116.0-060 Inicial	1.51	2.29	2.69	1.92	1.40	77.81
46.0116.0-060 Buckling	1.54	2.09	1.57	1.45	1.08	48.56
<b>Δ Buckling vs Inicial</b>	<b>2.20%</b>	<b>-8.69%</b>	<b>-41.76%</b>	<b>-24.36%</b>	<b>-23.01%</b>	<b>-37.59%</b>

Tabla 21: Comparación características eléctricas a baja irradiancia.

Las mayores pérdidas de los módulos 46.0116.0-59 y 46.0116.0-60 están relacionadas con unos cortocircuitos aparecidos en las células agrietadas. Estos cortocircuitos o shunts tienen la peculiaridad de ser no lineales, disminuyendo drásticamente los valores eléctricos de las células donde aparecen.

La última caracterización de este ensayo de Buckling se ha realizado comparando los resultados de las curvas I-V de cada módulo antes y después del ensayo de pandeo. A continuación se muestran las curvas I-V realizadas en CEM y baja irradiancia.





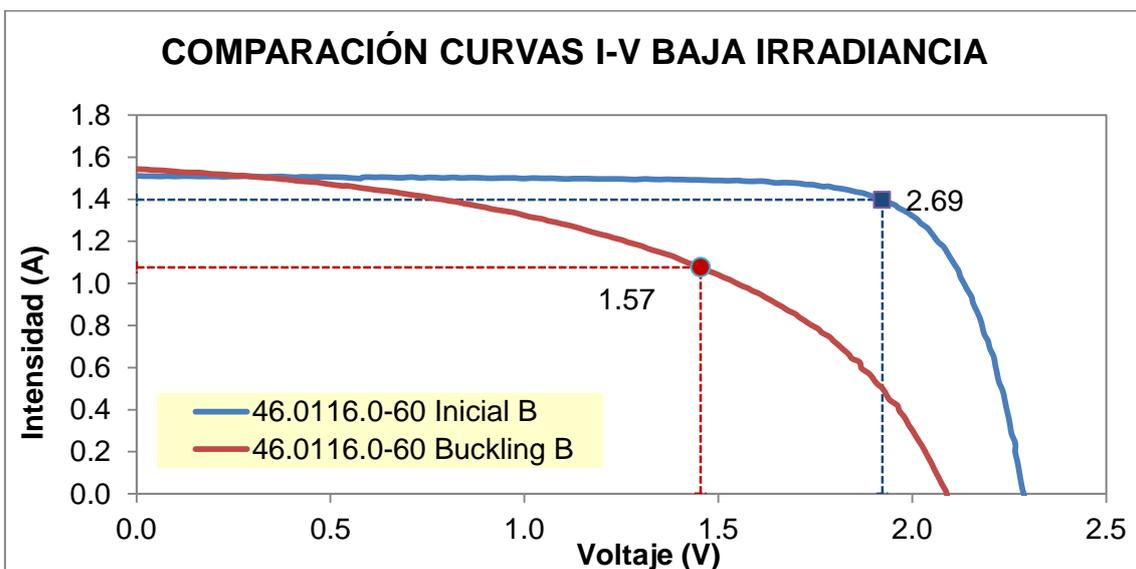
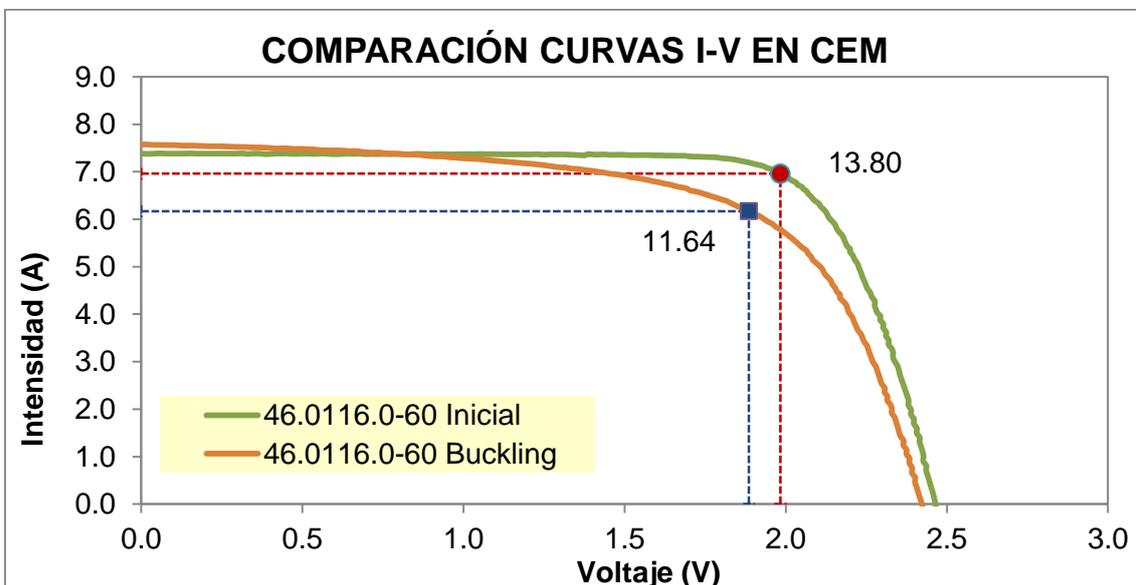
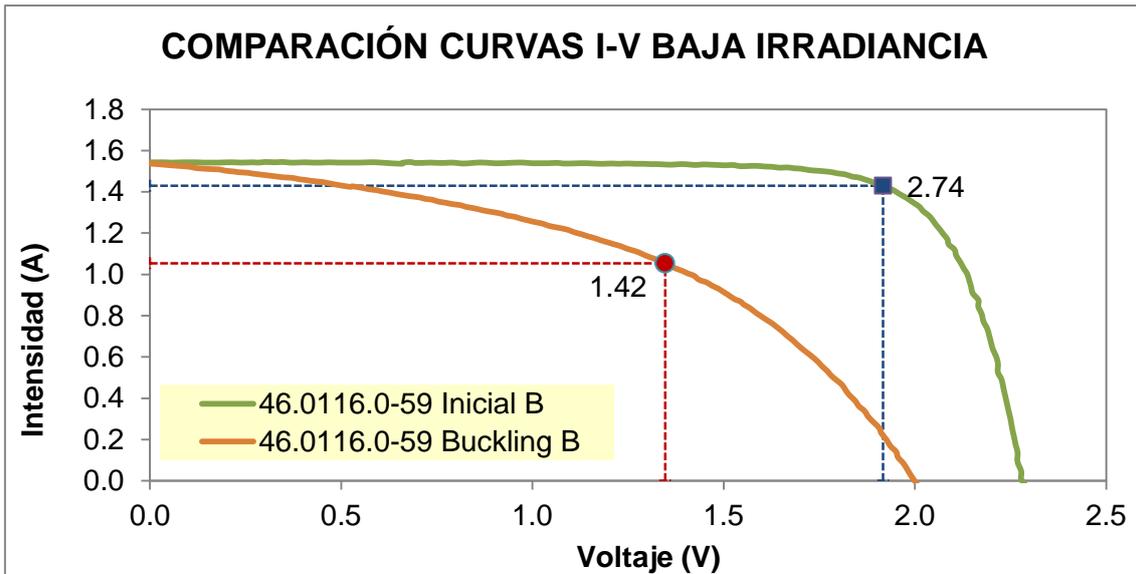


Figura 90: Comparación de curvas I-V.

Como se observa en las curvas anteriores, la caída de potencia es mayor en los ensayos de baja irradiancia. Esto es debido a que a los problemas causados por la resistencia paralelo asociadas a los cortocircuitos o shunts locales, se manifiesta con valores porcentuales mucho mayores en condiciones de baja irradiancia.

### 6.3.3. Ensayo de impacto de bola

Este ensayo se ha realizado para comprobar la resistencia a impacto del encapsulante EVA de STRE. De esta forma, se pueden plantear posibles soluciones a problemas como los daños generados por el impacto de granizo.

Todos los impactos se han realizado soltando la bola desde una altura de 1800 mm. De tal modo, que la energía absorbida por el material es la siguiente:

$$E = m \cdot g \cdot h = 0,5 \cdot 9,81 \cdot 1,8 = 8,829 \text{ J} \quad (8)$$

#### 6.3.3.1. EVA sin curar

En primer lugar, se han ensayado muestras de encapsulante EVA sin polimerizar. Se ha procedido a realizar el ensayo de impacto de bola con diferentes capas de encapsulante.

En concreto, se ha realizado el impacto sobre 1 y 2 capas de EVA. Los resultados no ofrecen valores comparables, ya que el cambio de estado en el EVA al estar sin polimerizar y una vez polimerizado, cambia sus propiedades drásticamente.

#### 6.3.3.2. EVA curado

Al igual que con el EVA sin curar, se ha realizado el ensayo de impacto de bola sobre encapsulante EVA curado. Estos resultados nos darán una aproximación más realista para el objetivo del proyecto.

Se ha procedido a realizar el impacto de la bola sobre 1, 2,3 y 4 capas de EVA curado a 145 °C durante 8 minutos respectivamente.

En la siguiente figura se observan las huellas grabadas en el papel que se introduce entre la capa de EVA y el papel carbón y el resultado del análisis de la imagen con el software correspondiente para analizar el área de impacto.

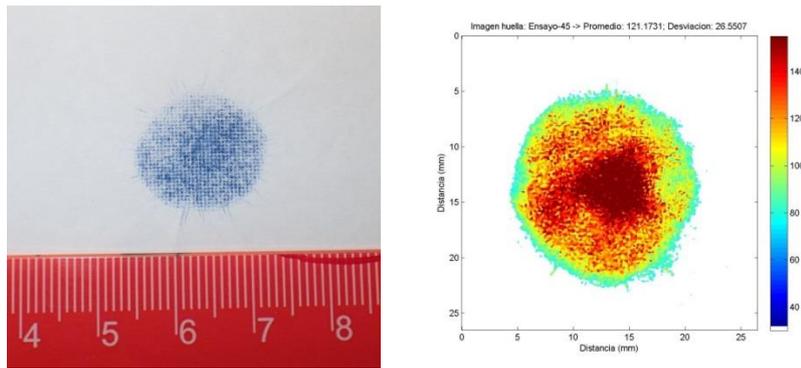


Figura 91: Huella antes y después del tratamiento de imagen.

### 6.3.3.3. Resultados del ensayo de impacto de bola

Los resultados obtenidos tras el ensayo del impacto de bola se recogen en la siguiente Tabla. En ella se observa las características de cada muestra ensayada, así como los resultados de área de huella y altura de rebote. La parte más importante es la rotura o no del EVA curado, reflejado en forma de agrietamiento en el encapsulante.

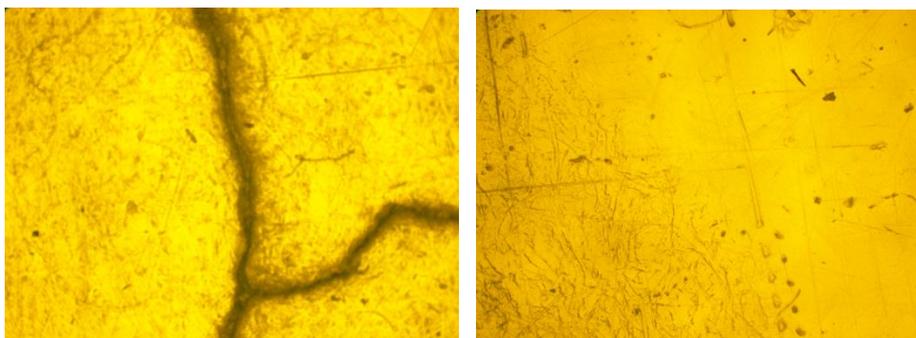
Muestra	Composición	¿Curado?	Área de huella (mm <sup>2</sup> )	Altura de rebote (cm)	¿Agrietamiento?
EVA STRE	1 capa	NO	137,4	-	NO
EVA STRE	2 capas	NO	156,7	-	NO
EVA STRE	1 capa	SI	138,4	82,7	NO
EVA STRE	2 capas	SI	146,9	79,1	NO
EVA STRE	3 capas	SI	126,4	80,4	SI
EVA STRE	4 capas	SI	140,3	86,4	SI

Tabla 22: Resultados tras el ensayo de impacto de bola.

Por tanto, las laminaciones de EVA polimerizado de 3 y 4 capas sufren rotura o agrietamiento debido al impacto.

En cuanto altura de rebote y huella, se observa que el EVA curado de 2 capas es el que más energía de impacto absorbe, ya que la huella es la que mayor área deja y la altura de rebote es la menor.

A continuación se muestra una imagen tomada por microscopio de las grietas causadas tras el impacto de la bola, así como de la frontera entre EVA impactado y EVA sin impacto.



*Figura 92: Imagen tomada con microscopio de la huella tras el impacto de bola.*

#### 6.3.4. Ensayo de pelado

Otra de las comprobaciones realizadas para la repetitividad de los laminados realizados en el TFG anterior, y los laminados realizados durante este TFM, ha sido el ensayo de pelado.

De este modo, se ha realizado un ensayo de pelado a un nuevo laminado, realizado con el encapsulante EVA STRE en estado de degradación, y se han comparado los resultados con su homónimo.

También se han realizado ensayos de pelado tras la prueba de calor húmedo, visualizando de esta forma el efecto de la absorción de humedad en la adhesión de las diferentes capas del laminado y ensayos a dos laminados realizados con el encapsulante EVA de baja temperatura.

En la siguiente Tabla se recogen los laminados tipo ensayados en el test de pelado.

Muestra	Composición	Encapsulante
46.0116.0-26	PC (4mm) + EVA + EVA + PPE	EVA STRE
46.0116.0-53	PC (2mm) + EVA + EVA + PPE	EVA STRE (caducado)

46.0116.0-51	PC (2mm) + EVA + EVA + PPE	EVA STRE (caducado)
46.0116.0-63	PC (2mm) + EVA + PPE	EVA baja temperatura
46.0116.0-64	PC (4mm) + EVA + PPE	EVA baja temperatura

*Tabla 23: Laminados ensayados en test de pelado.*

#### 6.3.4.1. EVA STRE

En este apartado, se compara en primer lugar los resultados obtenidos del test de pelado en un laminado fabricado con el EVA en el estado actual y otro laminado fabricado en el anterior TFG.

A continuación se muestran los valores obtenidos antes y después del ensayo de calor húmedo en cuanto a valores de adhesión.

##### A) Repetición de laminado

Tras el ensayo de pelado realizado a la muestra 46.0116.0\_53 realizada como un laminado sencillo de espesor de Policarbonato 4 mm a 140 °C durante 12,5 minutos, los resultados han sido los siguientes:

Muestra	Receta	Tipo de Ensayo	Veloc.	Long. Tira (mm)	Anchura tira (mm)	Nº Puntos	Fuerza media (N/cm)
			desplaz. (mm/min)				
46.0116.0_53.1	140°C, 12,5 min	2-Eva-PPE	50	100	10	1200	94
46.0116.0_53.2	140°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	100	10	1200	74
46.0116.0_53.3	140°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	100	10	1200	74

*Tabla 24: Resultados test pelado 46.0116.0-53.*

Como se puede observar, los dos ensayos de pelado entre el EVA y PC han dado los mismos resultados, con una fuerza de adhesión de 74 N/cm.

En cuanto a la adhesión entre EVA-PPE ha sido de 94 N/cm.

A continuación se muestran los resultados de la muestra 46.0116.0\_26, la cual fue realizada varios meses atrás bajo las mismas condiciones, 140 °C durante 12,5 minutos.

Muestra	Receta	Tipo de Ensayo	Veloc.	Long. Tira (mm)	Anchura tira (mm)	Nº Puntos	Fuerza media (N/cm)
			desplaz. (mm/min)				
46.0116.0_26.1	140°C, 12,5 min	2-Eva-PPE	50	100	10	1200	120
46.0116.0_26.2	140°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	100	10	1200	146
46.0116.0_26.3	140°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	100	10	1200	107

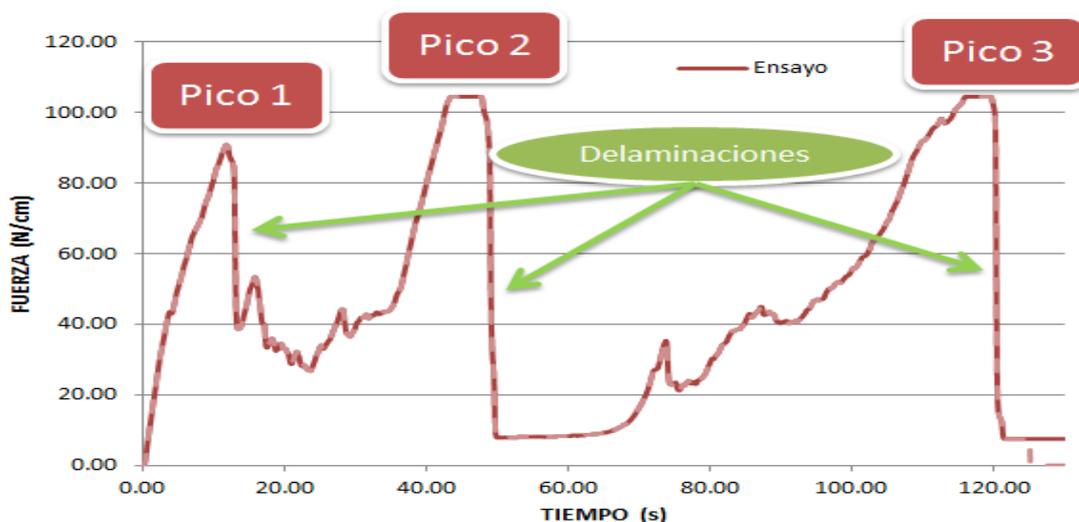
Tabla 25: Resultados test pelado 46.0116.0-26.

Se observa unos valores de adhesión muy diferentes. Se entiende que una de las principales causas que explica la diferencia de adhesión podría ser la caducidad del EVA, debido a que el laminado 46.0116.0\_53 se ha laminado con el EVA STRE ya caducado.

#### B) Test de pelado tras calor húmedo

Tras el ensayo de pelado de la muestra 46.0116.0-51, realizado tras el ensayo de calor húmedo, compuesto por PC (2mm) + EVA + EVA + PPE, no se ha podido obtener una media de los resultados de fuerza de adhesión.

Esto es debido a la delaminación causada por el ensayo de calor húmedo, el cual ha despegado el EVA del policarbonato, dejando zonas de valle o con burbujas, sin apenas adhesión entre el policarbonato y el EVA. Sin embargo, se ha podido plotear los valores de la fuerza ejercidos en el ensayo en la siguiente gráfica, la cual se puede comparar con la inspección visual realizada tras el ensayo.



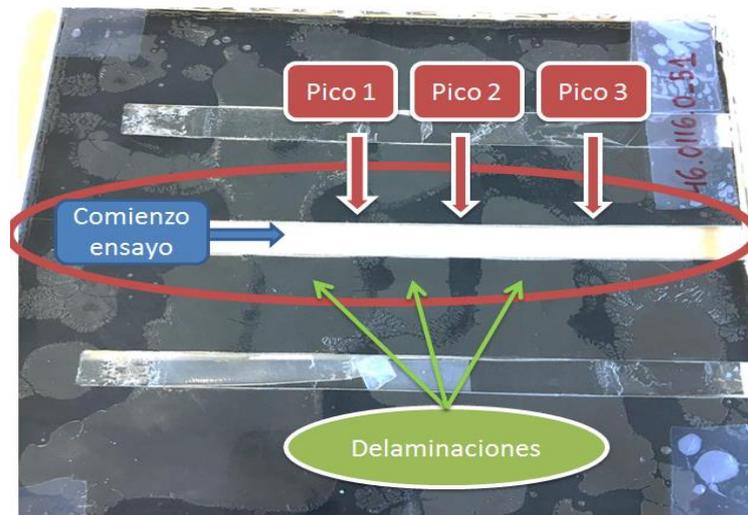


Figura 93: Gráfica de fuerza de adhesión y laminado ensayado.

Se observa una clara correlación entre las burbujas apreciadas en el laminado, indicadoras de absorción de humedad y sus consecuentes delaminaciones, y las caídas en la fuerza de adhesión mostradas en la gráfica.

#### 6.3.4.2. EVA baja temperatura

En este apartado se muestran los resultados obtenidos tras el test de pelado en los laminados realizados con el encapsulante EVA de baja temperatura. Estos laminados se han realizado con policarbonato de 2mm a 131 °C durante 17,5 minutos (46.0116.0-63), y con policarbonato de 4mm a 140 °C durante 12,5 minutos (46.0116.0-64). Visualmente han aparecido burbujas, aparecidas sobre todo en el laminado de 4mm debido a la alta temperatura de laminación. Este hecho puede influir en los resultados de adherencia arrojados mediante este test de pelado.

En la siguiente Tabla se muestran los resultados de las 3 tiras de pelado para cada laminado respectivamente

Muestra	Receta	Tipo de Ensayo	Veloc. desplaz. (mm/min)	Long. Tira (mm)	Anchura tira (mm)	Nº Puntos	Fuerza media (N/cm)
46.0116.0_63.1	131°C, 17,5 min	2-Eva-PPE	50	45	10	1200	114.26
46.0116.0_63.2	131°C, 17,5 min	1-Eva-PC	50	75	10	1200	115.97

46.0116.0_63.3	131°C, 17,5 min	1-Eva-PC	50	80	10	1200	105.11
46.0116.0_64.1	140°C, 12,5 min	2-Eva-PPE	50	67	10	1200	43.18
46.0116.0_64.2	140°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	90	10	1200	57.90
46.0116.0_64.3	140°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	100	10	1200	56.05

Tabla 26. Resultados de pelado para 46.0116.0-63 y 46.0116.0-64.

A la vista de los resultados, se observa una clara disminución de los valores de adhesión en el laminado realizado con policarbonato de 4mm de espesor a 140 °C.

En el período final de la realización del TFM, se volvieron a realizar nuevos laminados con el EVA de baja temperatura, obteniendo unos resultados de pelado recogidos en la siguiente tabla, diferenciando los laminados con policarbonato de espesor 2 mm y espesor 4 mm.

PC 2 mm							
Muestra	Receta	Tipo de Ensayo	Veloc. desplaz. (mm/min)	Long. Tira (mm)	Anchura tira (mm)	Nº Puntos	Fuerza media (N/cm)
46.0116.0_71.1	125°C, 17,5 min	2-Eva-PPE	50	20	10	1200	10
46.0116.0_71.2	125°C, 17,5 min	1-Eva-PC	50	75	10	1200	94.5
46.0116.0_74.1	131°C, 17,5 min	1-Eva-PC	50	80	10	1200	143
46.0116.0_74.2	131°C, 17,5 min	2-Eva-PPE	50	70	10	1200	170

PC 4 mm							
Muestra	Receta	Tipo de Ensayo	Veloc. desplaz. (mm/min)	Long. Tira (mm)	Anchura tira (mm)	Nº Puntos	Fuerza media (N/cm)
46.0116.0_65.1	130°C, 12,5 min	2-Eva-PPE	50	45	10	1200	40
46.0116.0_65.2	130°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	75	10	1200	70
46.0116.0_66.1	135°C, 12,5 min	1-Eva-PC	50	80	10	1200	53
46.0116.0_66.2	135°C, 12,5 min	2-Eva-PPE	50	67	10	1200	41

46.0116.0_67.1	130°C, 17,5 min	1-Eva-PC	50	90	10	1200	97
46.0116.0_67.2	130°C, 17,5 min	2-Eva-PPE	50	20	10	1200	13
46.0116.0_68.1	130°C, 22,5 min	1-Eva-PC	50	80	10	1200	85
46.0116.0_68.2	130°C, 22,5 min	2-Eva-PPE	50	80	10	1200	100
46.0116.0_69.1	130°C, 17,5 min	1-Eva-PC	50	100	10	1200	106
46.0116.0_69.2	130°C, 17,5 min	2-Eva-PPE	50	20	10	1200	10
46.0116.0_70.1	125°C, 22,5 min	1-Eva-PC	50	100	10	1200	80

*Tabla 27. Resultados de adhesión tras ensayo de pelado.*

Los valores de adhesión son parecidos a los obtenidos en los resultados del test de pelado con encapsulante convencional.

## 7. CONCLUSIONES

En este apartado se presentan conclusiones detalladas tras los resultados obtenidos durante los ensayos experimentales. A continuación se dividen las conclusiones para los dos objetivos buscados en la elaboración de este proyecto.

### 7.1. Optimización del proceso de laminado

De los ensayos realizados para determinar la calidad del encapsulante se demuestra una clara degradación del encapsulante convencional tras el paso de su período de caducidad. Este hecho está claramente relacionado con la pérdida de valores de adhesión de los mismos laminados realizados antes y después de la caducidad del material.

Referente a los estudios teóricos que describían unos resultados mayores de grado de curado en el método primario, se ha comprobado que para el EVA convencional con el que se ha trabajado en este proyecto la relación entre ambos métodos no coincide con la bibliografía consultada. Los resultados muestran unos valores de curado menores en el método primario o contenido en gel que el método secundario o DSC. Los valores de grado de polimerización resultantes del método primario han permitido confirmar la necesidad de mejorar este parámetro respecto a los resultados obtenidos de los trabajos previos realizados a este TFM. Por tanto, con esta conclusión se pasa a la tarea de realizar los laminados con diferentes recetas que puedan incluir temperaturas de laminado o tiempos de procesado más altos, o probar otros encapsulantes que permitan aplicar unas temperaturas de laminación más bajas, como es el EVA de baja temperatura.

El análisis DSC realizado al EVA virgen de baja temperatura adquirido a la empresa Huichi Glass han mostrado que las temperaturas a las que se produce la polimerización no coinciden con las especificaciones del fabricante y muestran poca diferencia respecto al encapsulante EVA convencional del que se dispone. Los ensayos de caracterización inicial mediante DSC realizados a este EVA de baja temperatura indican que es necesario incrementar la temperatura de laminación hasta valores similares a los empleados con el EVA convencional. El principal resultado obtenido de las laminaciones con el EVA de “baja temperatura” es que utilizando las mismas recetas que con el EVA convencional se han obtenido grados de curado superiores.

## 7.2. Validación del funcionamiento

### 7.2.1. Ensayo de calor húmedo

Los resultados obtenidos en el ensayo de calor húmedo han resultado ser determinantes debido a la absorción de humedad por parte del policarbonato. Las especificaciones proporcionadas por el fabricante del policarbonato en cuanto a la absorción de vapor de agua están referidas a unas condiciones de humedad y temperatura inferiores (50%HR y 23°C) a las que fija el ensayo de calor húmedo de la normativa de cualificación de módulos fotovoltaicos (85%HR y 85°C). Al someter a los laminados a la severidad indicada en la norma se ha comprobado que las muestras no superan la prueba.

Este hecho hace evidente la necesaria adición de una capa extra sobre el frontsheet para reforzar la barrera frente a la penetración de humedad, o pensar en otras posibilidades que puedan solucionar este problema.

Como se muestran en los resultados experimentales, la absorción de humedad tras el ensayo de calor húmedo genera unas zonas de delaminación que afecta a la adhesión de las diferentes capas, así como los valores de transmitancia y la consiguiente pérdida de potencia de las células y laminados.

### 7.2.2. Ensayos mecánicos

El análisis de los resultados derivados de los ensayos mecánicos permite extraer una serie de conclusiones que se deben tener en cuenta para el futuro desarrollo del proyecto.

El ensayo de granizo ha resultado ser una evidencia de la necesidad de utilizar el policarbonato de 4 mm de espesor. Sin embargo, las pruebas de laminaciones con doble capa de EVA con policarbonatos de 2 mm de espesor han aportado resultados de rotura, aunque ésta rotura de la célula es mínima. Por tanto, apoyándose en los ensayos realizados de impacto de bola, se podría concluir que la aportación de una capa extra de encapsulante EVA puede beneficiar a las propiedades mecánicas. Este hecho puede ser relevante para trabajos futuros, y poder sustituir el policarbonato de 4 mm de espesor por el de 2 mm de espesor, añadiendo bien 2 o más capas de EVA en la parte frontal del laminado o empleando un EVA de mayor espesor. De este modo se lograría mejorar las propiedades mecánicas en relación al ensayo de impacto de granizo.

En cuanto al ensayo de Buckling o pandeo, se ha observado una clara mejora en la utilización del refuerzo como una capa extra, aportando una mayor rigidez y resistencia de rotura a las células del módulo. En los resultados se observa un incremento de resistencia al pandeo de un 21% respecto al módulo sin refuerzo.

Por último, los ensayos de pelado han servido para demostrar la capacidad de adherencia entre las diferentes capas, aportando resultados satisfactorios y concluyentes en cuanto a la posibilidad real de utilizar policarbonato como frontsheet. En referencia a los últimos ensayos de pelado en los laminados realizados con EVA de baja temperatura, hay una clara evidencia de necesidad de búsqueda de una receta optimizada para este material, que tenga menores valores de temperaturas, disminuyendo el número de burbujas o delaminaciones encontrados en el laminado, y aumento de esta forma la adhesión entre sus capas. A pesar de ello, y como se ha comentado anteriormente el grado de curado logrado con el encapsulante EVA de baja temperatura utilizando las mismas recetas ha aumentado respecto al EVA convencional.

## 8. TRABAJOS A DESARROLLAR

A la vista de los resultados y las conclusiones obtenidas tras este Trabajo Fin de Master, es conveniente pensar en el desarrollo futuro que debería continuar este proyecto.

Para cumplir con los objetivos propuestos por el presente proyecto, y por tanto, los objetivos del proyecto AiSoVol, sería recomendable pensar en varios aspectos a tener en cuenta.

En primer lugar, se ha pensado en la adición de una capa superior al frontsheet, laminada encima del policarbonato, que ayude a aislar al laminado de las condiciones adversas ensayadas en la prueba de calor húmedo. En la siguiente Tabla aparecen posibles materiales que deberían evaluarse como propuesta, junto a sus coeficientes de absorción [17].

<b>MATERIAL</b>	<b>Water Vapor Transmission Rate (g/m<sup>2</sup>)</b>	<b>Water adsorbition (%)</b>
<b>PC</b>	115,00	0,35
<b>ETFE</b>	1,65	0,03
<b>PVDF</b>	29,76	0,05
<b>VIDRIO</b>	-	-

*Tabla 28: Materiales alternativos y coeficientes de absorción.*

Por lo tanto, se puede contemplar como alternativa la configuración de una capa superior por encima del Policarbonato que aisle el laminado. Además, en caso de utilizar vidrio ultrafino, se solucionaría el problema del pandeo, otro de los inconvenientes del laminado con Policarbonato.

Continuando con este problema de pandeo en segundo lugar se ha pensado en un posible ciclo de refrigeración lineal tras el proceso de laminado. Este proceso de enfriamiento ayudaría a disminuir la temperatura del laminado de forma lineal, disminuyendo el gradiente de temperatura de forma más progresiva, ayudando de esta forma a que el policarbonato y las diferentes capas que componen el laminado, no modifiquen de forma tan exagerada sus dimensiones, generando el pandeo.

Esta solución podría implementarse fácilmente en líneas de laminación que cuenten con procesos de enfriamiento en sus máquinas. En el caso de la laminadora utilizada

en el laboratorio de CENER, ésta no cuenta con un sistema de refrigeración, por lo que no se ha podido probar o ensayar dicha solución.

En tercer lugar, en referencia al ensayo de impacto de granizo, se ha visto que sólo los laminados con policarbonatos de 4 mm y refuerzo han sido capaces de soportar el impacto de hielo. Sin embargo, el laminado de policarbonato 4 mm sin refuerzo ha sufrido daños menores. Se propone la utilización de una doble capa de EVA entre la célula y el policarbonato, mejorando la absorción de energía de impacto en esta capa, incrementando la resistencia del laminado en general, y de la célula en concreto. Otra alternativa propuesta para este problema sería la incorporación de fibra de vidrio como otra capa del laminado. Esta fibra de vidrio daría solidez y consistencia al laminado aportándole mejoras en las características mecánicas.

Esta solución se ve favorecida gracias al ensayo de impacto de bola, el cual ha arrojado valores mayores de energía de absorción en laminaciones de 2 capas de EVA que en 1 sola capa.

Por último, es necesario continuar evaluando la resistencia mecánica que aporta la capa de refuerzo para determinar si podrá sustituir por completo el uso del marco o será preciso mejorar la rigidez mecánica del conjunto añadiendo algún sistema que abarque todas las capas de la laminación, y que sea lo suficientemente flexible para aguantar el posible pandeo que pueda tener el módulo una vez instalado. Además, será necesario diseñar una caja de conexiones para el conexionado de los componentes del módulo que sea compatible con el diseño final del laminado.

## 9. REFERENCIAS

- [1] Martin Green et al., “Solar cell efficiency tables (version 49),” in *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*. Sidney, Australia, 2017.
- [2] EurObserv’ER (Abril 2017). *Photovoltaic Barometer*.
- [3] ITRPV Eighth Edition 2017 International Technology Roadmap for Photovoltaic Results 2016.
- [4] C. Peike et al., “Overview of PV module encapsulation materials” in *Photovoltaics International*, Freiburg, pp. 85-91.
- [5] <http://www.penergy.it>
- [6] <https://www.sabic-ip.com>
- [7] <http://www.espaicenor.com/docs/EVA%20LAMINADO.pdf>
- [8] D. Wu (Junio 2015), “Investigation of the Reliability of the Encapsulation System of Photovoltaic Modules” PhD. Dissertation, Loughborough University, June 2015.
- [9] Yen-Shan Hsu et al., “Thermoanalytical Characterization of Ethylene Vinyl Acetate Copolymer (EVA) for Lamination Process Simulation and Gel Content Determination in Photovoltaic Modules”, 2012 Module Reliability Workshop. Golden, Colorado, USA, 2012.
- [10] Ch. Hirschl et al. “Determining the degree of crosslinking of ethylene vinyl acetate photovoltaic module encapsulants”, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, pp. 494-502, 2015.
- [11] ISO 813:2016. Rubber, vulcanized or thermoplastic –Determination of adhesion to a rigid substrate -90 degree peel method.
- [12] S. Krauter et al., “PV Module Laminación Durability”, Photovoltaic Institute Berlin, Berlin, Germany, 2011.
- [13] A. Petraglia and V. Nardone. “Electroluminescence in photovoltaic cell”, *Phys. Educ*, 2011, pp 46-511.
- [14] EN 438-2:2005 Laminados decorativos de alta presión (HPL). Láminas basadas en resinas termoestables (normalmente denominadas laminados). Parte 2: Determinación de propiedades.
- [15] UNE-EN 60068-2-78 Ensayos ambientales. Parte 2-78: Ensayos. Ensayo Cab: Calor húmedo, ensayo continuo.
- [16] Estudio del proceso de laminación de módulos fotovoltaicos con materiales alternativos. Ana Murillo Larrey.
- [17] <http://photos.labwrench.com/equipmentManuals/15174-5924.pdf>

[18] "Cross-linking and postcross-linking of ethylene vinyl acetate in photovoltaic modules"  
Journal of Applied Polymer Science · February 2017

## 10. ANEXOS

ANEXO 1: Policarbonato

ANEXO 2: Encapsulante EVA

ANEXO 3: Encapsulante EVA baja temperatura

ANEXO 4: Entramado estructural

ANEXO 5: Cubierta posterior PPE

ANEXO 6: Artículo AISOVOL

# ANEXO 1: Policarbonato

# LEXAN EXELL™ D SHEET

## PRODUCT DATASHEET

### DESCRIPTION

LEXAN EXELL™ D sheet is a transparent polycarbonate sheet with proprietary UV protection on both sides offering excellent weathering properties. With its excellent impact resistance it is a good candidate for a wide variety of building and construction applications. LEXAN EXELL D sheet can be easily cold formed into gentle curves which makes it a good material choice for skylights, covered walkways, barrel vaults etc. LEXAN EXELL D sheet is thermoformable and can be thermoformed into the desired geometry whilst retaining the UV resistant protection specially developed for weather resistant applications.

### TYPICAL PROPERTY VALUES

PROPERTY	TEST METHOD	UNITS	VALUE
<b>PHYSICAL</b>			
Density	ISO 1183	g/cm <sup>3</sup>	1.20
Water absorption, 50% RH, 23 °C	ISO 62	%	0.15
Water absorption, saturation, 23°C	ISO 62	%	0.35
<b>MECHANICAL</b>			
Yield stress 50 mm/min	ISO 527	MPa	>60
Yield strain 50 mm/min	ISO 527	%	6
Nominal strain at break 50 mm/min	ISO 527	%	>100
Tensile modulus 1 mm/min	ISO 527	MPa	2300
Flexural strength 2 mm/min	ISO 178	MPa	90
Flexural modulus 2 mm/min	ISO 178	MPa	2300
<b>IMPACT</b>			
Charpy impact, notched 23°C, 3.0 mm	ISO 179/1eA	kJ/m <sup>2</sup>	75
Izod impact, unnotched 23°C, 3.0 mm	ISO 180/1U	kJ/m <sup>2</sup>	NB
Izod impact, notched 23°C, 3.0 mm	ISO 180/1A	kJ/m <sup>2</sup>	70
<b>THERMAL</b>			
Vicat softening temperature, rate B/120	ISO 306	°C	145
Temperature of deflection under load (type A), 1.8 MPa, flat	ISO 75-2	°C	127
Thermal conductivity	ISO 8302	W/m.°C	0.2
Coefficient of linear thermal expansion, 23-55°C	ISO 11359-2	1/°C	7x 10 <sup>-5</sup>
Ball pressure test 125 ±2°C	IEC 60695-10-2	-	Pass
<b>ELECTRICAL</b>			
Volume resistivity	IEC 60093	Ohm.cm	>10 <sup>15</sup>
Dielectric strength, in oil, 3.2 mm	IEC 60243-1	kV/mm	18
<b>FIRE RATINGS</b>			
<b>Building &amp; Construction</b>			
Europe	EN13501-1	-	b,s1,d0 (2-6mm)

◆ These property values have been derived from LEXAN™ resin data for the material used to produce this sheet product. Variation within normal tolerances are possible for various colors. These typical values are not intended for specification purposes. If minimum certifiable properties are required please contact your local SABIC, Specialty Film & Sheet representative. All values are measured at least after 48 hours storage at 23°C/50% relative humidity. All properties are measured on injection molded samples. All samples are prepared according ISO 294.

™ Trademarks of SABIC.

---

## LIGHT TRANSMISSION

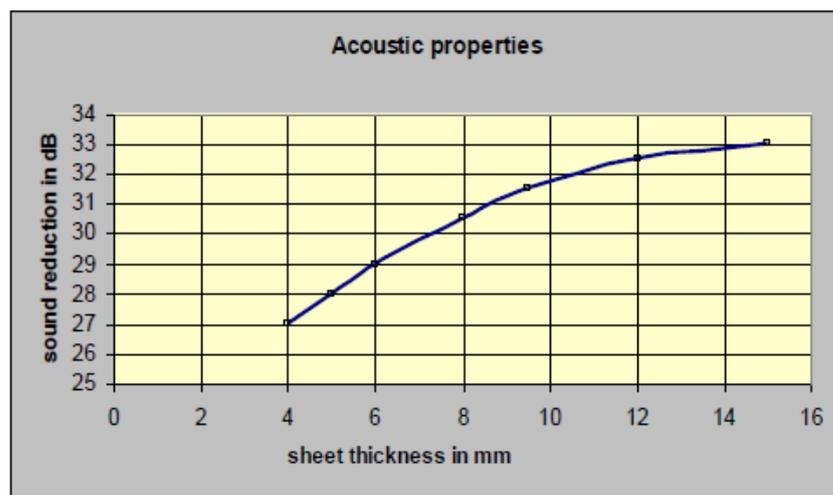
Transparent LEXAN EXELL D sheet have excellent light transmission, between 84 and 87%. However for buildings in hot climates or with south facing aspects, LEXAN EXELL D sheet is available in translucent bronze, grey and opal white. LEXAN EXELL D is essential opaque to all wave lengths below 385 nanometers. This useful shielding property can help prevent discoloration of sensitive materials placed under or behind LEXAN EXELL D sheet.

## UV PROTECTION

LEXAN EXELL D sheet has proprietary UV protected surfaces, giving excellent durability to outdoor weathering. This superior UV resistance and toughness of LEXAN EXELL D sheet is backed by a 10 years limited written warranty against yellowing, loss of light transmission and breakage.

## SOUND REDUCTION

Below graph shows the acoustic properties for different thicknesses of the sheet:



## PERFORMANCE

LEXAN EXELL D sheet has a good fire performance against many national fire codes dependant on thickness and color; please check with the local sales office for details.

## PRODUCT AVAILABILITY

LEXAN EXELL D sheet is normally manufactured in the standard sizes listed below. Deliveries from stock or cut to size can be ordered via our customer service organisation.

**Standard gauge in mm:**

2 - 3 - 4 - 5 - 6 - 8 - 9.5 - 12- 15

**Standard sizes:**

2050 x 3050 mm (is max. size for 15mm), 2050 x 6100 mm

**Masking:**

Top side: Coex. opal white PE/purple print, Bottom side: Coex. transparent PE

**Standard colors:**

clear code 112, solar bronze code 5109, solar grey code 713, opal white code WH7D2870 (max. 8 mm), opal white code WH4D3480.

---

## CONTACT US:

### Middle East and Africa

SABIC Global Headquarters  
PO Box 5101  
Riyadh 11422  
Saudi Arabia  
T +966 (0) 1 225 8000  
F +966 (0) 1 225 9000  
E [info@sabic.com](mailto:info@sabic.com)

### Email

[sfs.info@sabic-ip.com](mailto:sfs.info@sabic-ip.com)

### Americas

Specialty Film & Sheet  
1 Plastics Avenue  
Pittsfield, MA 01201  
USA  
Toll-free 1 800 323 3783  
T 1 413 448 6655  
F (888) 443 2033  
E [Spinside.sales@sabic-ip.com](mailto:Spinside.sales@sabic-ip.com)

### Europe

Specialty Film & Sheet  
Plasticslaan 1  
4612 PX  
Bergen op Zoom  
The Netherlands  
T +31 (0)164 293678  
F +31 (0)164 293272  
E [sfs.info@sabic-ip.com](mailto:sfs.info@sabic-ip.com)

### Asia Pacific

Specialty Film & Sheet  
2550 Xiupu Road  
Pudong  
201319 Shanghai  
China  
T +86 21 2037 8188  
F +86 21 2037 8288  
E [sfs.info@sabic-ip.com](mailto:sfs.info@sabic-ip.com)

DISCLAIMER: THE MATERIALS, PRODUCTS AND SERVICES OF SAUDI BASIC INDUSTRIES CORPORATION (SABIC) OR ITS SUBSIDIARIES OR AFFILIATES ("SELLER") ARE SOLD SUBJECT TO SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, WHICH ARE AVAILABLE UPON REQUEST. INFORMATION AND RECOMMENDATIONS CONTAINED IN THIS DOCUMENT ARE GIVEN IN GOOD FAITH. HOWEVER, SELLER MAKES NO EXPRESS OR IMPLIED REPRESENTATION, WARRANTY OR GUARANTEE (i) THAT ANY RESULTS DESCRIBED IN THIS DOCUMENT WILL BE OBTAINED UNDER END-USE CONDITIONS, OR (ii) AS TO THE EFFECTIVENESS OR SAFETY OF ANY DESIGN OR APPLICATION INCORPORATING SELLER'S MATERIALS, PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS. UNLESS OTHERWISE PROVIDED IN SELLER'S STANDARD CONDITIONS OF SALE, SELLER SHALL NOT BE RESPONSIBLE FOR ANY LOSS RESULTING FROM ANY USE OF ITS MATERIALS, PRODUCTS, SERVICES OR RECOMMENDATIONS DESCRIBED IN THIS DOCUMENT. Each user is responsible for making its own determination as to the suitability of Seller's materials, products, services or recommendations for the user's particular use through appropriate end-use and other testing and analysis. Nothing in any document or oral statement shall be deemed to alter or waive any provision of Seller's Standard Conditions of Sale or this Disclaimer, unless it is specifically agreed to in a writing signed by Seller. Statements by Seller concerning a possible use of any material, product, service or design do not, are not intended to, and should not be construed to grant any license under any patent or other intellectual property right of Seller or as a recommendation for the use of any material, product, service or design in a manner that infringes any patent or other intellectual property right.

SABIC and brands marked with ™ are trademarks of SABIC or its subsidiaries or affiliates.  
© 2014 Saudi Basic Industries Corporation (SABIC). All Rights Reserved.

\* Any brands, products or services of other companies referenced in this document are the trademarks, service marks and/or trade names of their respective holders.

[www.sabic.com/sfs](http://www.sabic.com/sfs)



## ANEXO 2: Encapsulante EVA

**Technical Data**
**PHOTOCAP<sup>®</sup> 15585P HLT<sup>™</sup>**

PHOTOCAP<sup>®</sup> 15585P HLT<sup>™</sup> is an ultra fast cure EVA (ethylene vinyl acetate copolymer) photovoltaic encapsulating film with HLT<sup>™</sup> higher light transmission in the UV wavelength region to allow greater power generation with blue light sensitive photovoltaic devices.

PHOTOCAP 15585P HLT is intended for applications in any crystalline silicon photovoltaic module construction and for many thin film photovoltaic designs. PHOTOCAP 15585P HLT is provided as rolled film ready for use in thermal lamination processes. The material is self-priming for adhesion to glass. The same process equipment and conditions used for other ultra-fast cure PHOTOCAP EVA encapsulant can be used for this product.

Properties	Test Method	Units	Condition	Results
<b>ASTM</b>				
<b>Physical Mechanical</b>				
Tensile Strength	D638	MPa	23 °C, 250 mm/min elongation rate	15
Ultimate Elongation	D638	%	23 °C, 250 mm/min elongation rate	530
10% Secant Modulus	D638	MPa	23 °C, 250 mm/min elongation rate	24
Hardness	D2240	Shore A/D	23 °C	80 / 25
Adhesion to Glass	STR	N/cm	23 °C	130
MVTR	F1249	g/m <sup>2</sup> /day	25 °C/100sccm flow, 100%RH	18
Water Absorption	D570	wt%	23 °C	< 0.1
<b>Optical</b>				
Optical Transmission	E424	%	23 °C, 0.46 mm thickness	91
UV Cutoff Wavelength	E424	nm	23 °C, 0.46 mm thickness	305
Refractive Index	D542	-	23 °C, 0.46 mm thickness	1.48
<b>Electrical</b>				
Volume Resistivity	D257	ohm cm	23 °C/50%RH	>1 x 10 <sup>15</sup>
Dielectric Strength	D149	kV/mm	23 °C/50% RH, 500V/sec	>20

*Tests are made in accordance with the current issue of the ASTM, or other cited test method. Test data reported here are nominal values measured on extruded films, 0.5 mm thick, or compression molded sheets and test bars, which have been cured at 150 °C for 7 minutes with a laboratory press. Optical measurements made with glass-EVA coupons with high transmission solar glass.*

Americas	Europe	Asia
Specialized Technology Resources, Inc. 18 Craftsman Road East Windsor, CT 06088 USA Phone: +1 860 763 7014 Email: <a href="mailto:sales@STRSolar.com">sales@STRSolar.com</a>	Specialized Technology Resources, España Parque Tecnológico de Asturias, parcela 36 33428 Llanera, Asturias SPAIN Phone: +34 985 73 23 33 Email: <a href="mailto:sales@STRsolar.com">sales@STRsolar.com</a>	Specialized Technology Resources, Malaysia Plot 20, Jalan Tanjung A/3 Port of Tanjung Pelepas 81560 – Gelang Patah, Johor MALAYSIA Phone: +607 507 3185 Email: <a href="mailto:sales@STRSolar.com">sales@STRSolar.com</a>

WWW.STRSOLAR.COM

REV A 2013-01

**Technical Data**  
 page 2

**PHOTOCAP<sup>®</sup> 15585P HLT<sup>™</sup>**
**AGENCY APPROVALS:**

PHOTOCAP 15585P HLT is a UL listed product in category QIHE2 Photovoltaic Polymeric Materials. Each STR manufacturing plant maintains a separate UL file. Please refer to UL file numbers E349543, E335471 and E335472.

**PRODUCT VARIATIONS:**

Suffix	Release Paper	Shrinkage	Notes
15585P/UF HLT	Yes	Zero	STR's User Friendly (UF) technology allows sheets to be cut closer to size, resulting in less voids and shifting of ribbon and cells
15585P/UFP HLT	No	Minimal	Paperless UF option, resulting in minimal shrinkage
15585P/PL HLT	No	Higher than UF or UFP	Possesses a greater tendency to shrink but perfectly acceptable for use in most applications

**PROCESS GUIDELINES:**

Vacuum Lamination Step		Heat Cure Cycle	
Nominal Temperature	145 - 150 °C	Platen Temperature	145 - 150 °C
Vacuum Range	< 60 mbar	Cure Time	8 min
Evacuation Time	4 min	Applied Bladder Pressure	910 mbar
EVA Melting Range Via DSC	65 - 75 °C	Target Temperature within the Encapsulant	140 °C
		Time Above the Target Temperature	> 3 min

*Processing conditions shown here are a recommended starting point for a crystalline silicon photovoltaic module processed with a typical 2-step vacuum lamination system. Actual values required to achieve desired cure levels will depend on the specific PV module design and the lamination process used.*

*The temperature of the encapsulant should be at or above the EVA melting range before pressure is applied for the cure cycle. The encapsulant should reach the target temperature during the cure cycle, and should remain above that target temperature for the time shown. Temperatures within encapsulant should be periodically measured with embedded thermocouples to assess temperature uniformity of the laminator heating plate and the rate of heat transfer to the PV module. More information about how to laminate PV modules with PHOTOCAP encapsulants is available from STR.*

**All PHOTOCAP grades are based upon over 30 years of STR's commercial experience in the photovoltaic market.**

**For further information, please contact the nearest Specialized Technology Resources office or agent.**

PHOTOCAP<sup>®</sup> is a registered trademark of Specialized Technology Resources, Inc. The data set forth above is believed to be accurate. It is for informational purposes only and is not to be used for specification purposes. Neither Specialized Technology Resources, Inc., nor any of its affiliates, makes any representation or warranty as to, and disclaims all liability for, the information herein. PHOTOCAP is to be used by technically skilled persons at their own discretion and risk.

## **ANEXO 3: Encapsulante EVA baja temperatura**



## EVA FILM FOR OUTDOOR TECHNICAL PARAMETERS FOR CONSTRUCTION SAFETY LAMINATED GLASS

### Performance parameter

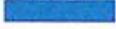
	TEST ITEM	TEST METHOD	TEST RESULT "HC-D80-120" low-high temperature EVA
<b>basical physical property</b>	Tensile Strength	HC LAB METHOD	20.6MPA
	AShore hardness A	HC LAB METHOD	71HA
	Adhesion with glass(180°C pealingspeed: 300mm/min)	HC LAB METHOD	>95N/cm
	Light Transmittance(390nm-900nm)	HC LAB METHOD	>90.5%
	Haze	HC LAB METHOD	<0.25%
	Blocked UV wavelength	HC LAB METHOD	380nm
	UVblocked rate	HC LAB METHOD	>99%
	4mm+0.4mm+4mm		
	Elongation	HC LAB METHOD	>450%
	Water Absorption	ASTMD570	≤0.1%
<b>simulated weather-resistance test</b>	Heat Resistance	GB-15763.3-2009	No water penetration\bubbles\ and de-lamination
	2hrs in the 100°C water		
	Humidity Resistance I	HC LAB METHOD	No water penetration\ bubbles/de-lamination, and No Haze appearance
	60°C , 97%RH, 400hrs		
	Humidity Resistance II	HC LAB METHOD	Haze appeared just at 3.5cm from the edge with no bubbles and de-lamination
	85°C 85%RH 1000hrs		
	Anti-aging UVB340 light tube	HC LAB METHOD	light changeΔYI : <0.7
	50°C 65%RH Radiation 2000hrs		
Heat & Cold shock	HC LAB METHOD	light changeΔYI : <0.7	
Cold-40°C30min, Heat80°C30min, 50circles			
<b>tested by authority institution</b>	Impact Resistance Against Shot-Bag	GB-15763.3-2009	Qualified
	Ball Impact Peeling Resistance	GB-15763.3-2009	Qualified

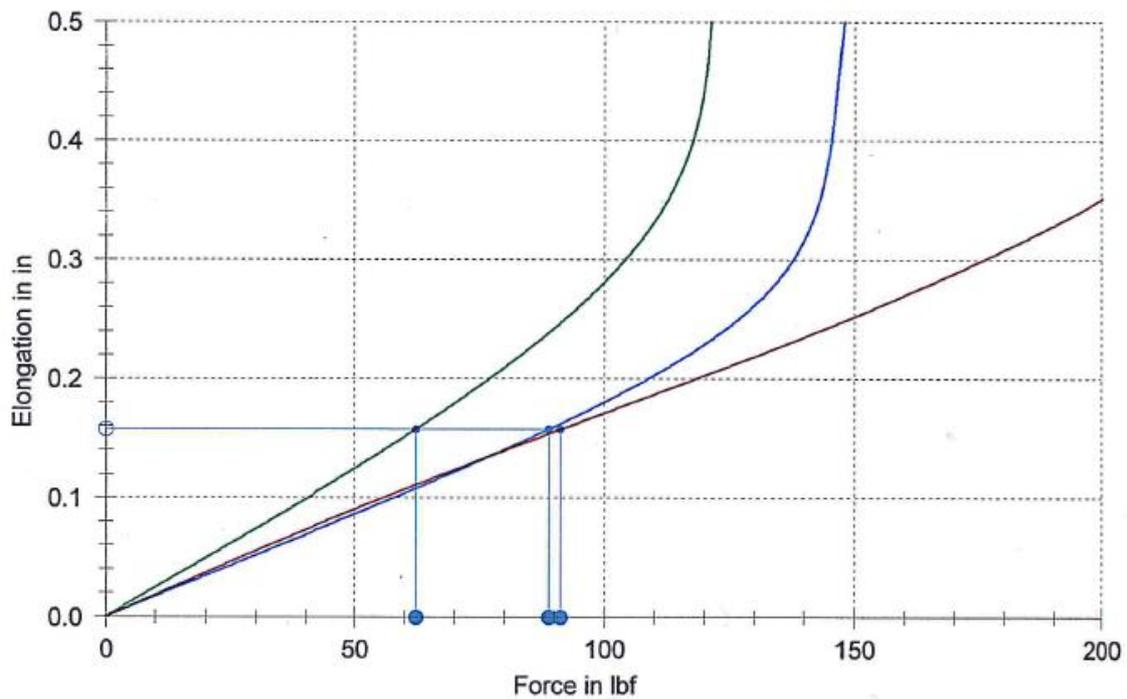
NOTE:ABOVE DATA GET IN LAB METHOD CONDITIONS, ONLY FOR REFERENCE

## ANEXO 4: Entramado estructural

## Laminate Stretch Test Report

Style : C648 4 MIL      Act. Weight : 208 g/m<sup>2</sup>  
 Lot-No.: 53020      Act. Weight : 4.86 sm oz  
 Color: :

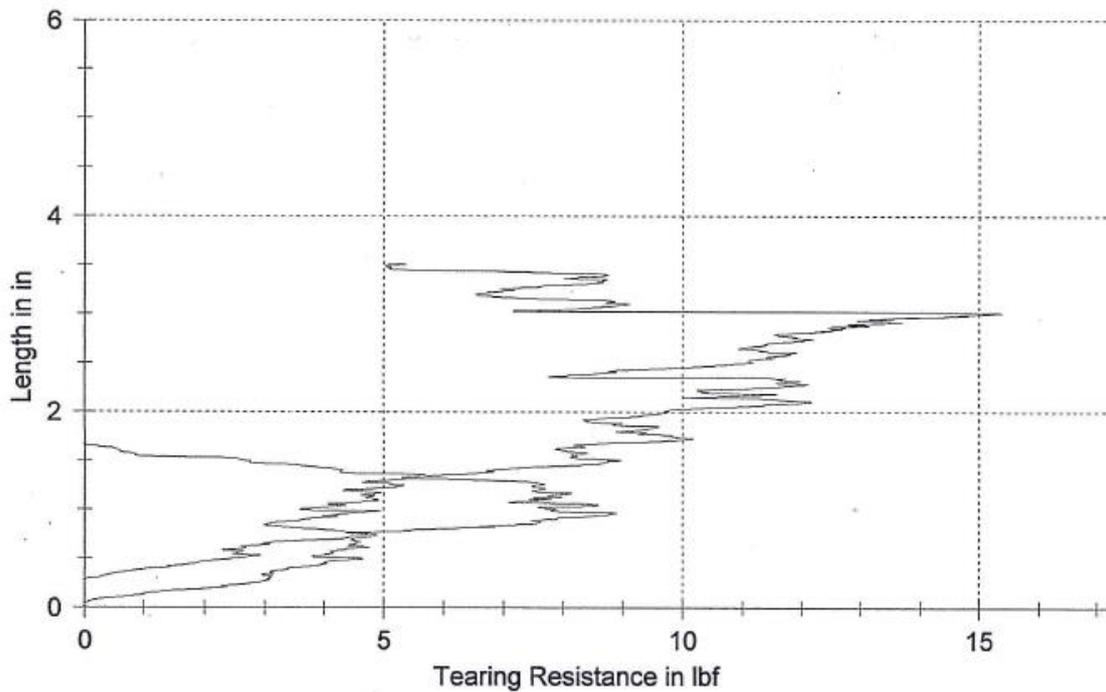
Legends	warp 0° Nr	condition	10 lbf	25 lbf	50 lbf	100 lbf	200 lbf	ε 1% lbf
	1	Lab	1.9	4.6	9.0	17.1	35.1	91.3
Legends	fill 90° Nr	condition	10 lbf	25 lbf	50 lbf	100 lbf	200 lbf	ε 1% lbf
	2	Lab	2.5	6.2	12.5	28.1	-	62.2
Legends	bias 45° Nr	condition	10 lbf	25 lbf	50 lbf	100 lbf	200 lbf	ε 1% lbf
	3	Lab	1.8	4.4	8.6	18.0	-	88.8



## Tearing Strength Test Report

Item Number : W/C64840002  
 Style : C648 4 MIL  
 Lot Number : 53020  
 Piece Number : 201  
 Identifier : 00  
 Test Date :  
 Color :  
 Act. Weight : 208 g/m<sup>2</sup>  
 Finish :  
 Coating - Side 1 :  
 Coating - Side 2 :  
 UV Protection :  
 Remarks :

Nr	Direction	Date	Fmax. Lvm lbf	Faverage Lm lbf	Fmax Lm lbf	No. of Fmax. peaks	AverageVal Fmax Sp lbf
1	Warp	01/15/2016	0.0	2.9	5.7	5	5.2
2	Fill	01/15/2016	-0.0	8.5	12.2	5	10.4

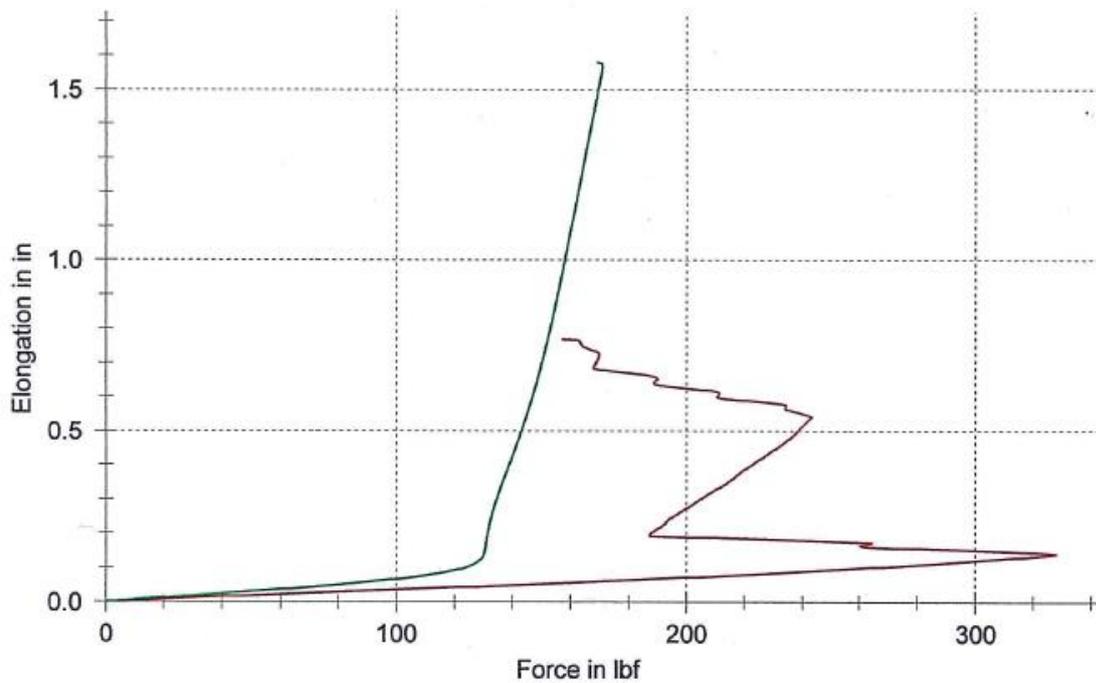


## Tensile Strength Test Report

Style : C648 4 MIL      Act. Weight : 208 g/m<sup>2</sup>  
 Lot-No.: : 53020      Act. Weight : 4.86 sm oz  
 Color: :

Legends	Warp 0° Nr	condition	Fmax pro 5cm lbf	L Fmax in
	1	Lab	327.76	0.14

Legends	Fill 90° Nr	condition	Fmax pro 5cm lbf	L Fmax in
	2	Lab	170.78	1.56



## ANEXO 5: Cubierta posterior PPE

## AKALIGHT ECS® 385 b

### Additional properties not required by IEC 61730-1

Property	Unit	Test method	Typical values
Thickness	mm	EN 60674-2	0.30
Area weight	g/m <sup>2</sup>	EN 60674-2	380
Water vapour permeability 38°C/90%rh	g/m <sup>2</sup> · d	ISO 15106-3 Test condition 2	2.1
Dimensional stability, MD + TD (30 min. / 150 °C)	%	EN 60674-2	≤ 1.2
Reflection of visible light (380 – 780nm) <sup>1)</sup>	%	EN 410	5.0
Reflection of radiation (280 – 2500nm) <sup>4)</sup>	%	EN 410	4.9
Volume resistivity	Ω · cm	UL 746A	10 <sup>16</sup>
Dielectric strength	kV/mm	UL 746A	70
High-current arc ignition	PLC	UL 746A	1

1) Tested at Primer side = cell side; direct solar radiation. Test equipment: Perkin Elmer Lambda 900 (Ulbrichtkugel) Tested at Fraunhofer ISE, Freiburg, Germany

## ANEXO 6: Artículo AISOVOL

Este artículo ha sido eliminado por restricciones de derechos de autor:

### AISOVOL PROJECT: A PHOTOVOLTAIC GENERATION SOLUTION AS AN ALTERNATIVE CONSTRUCTION MATERIAL

A.B. Cueli<sup>1</sup>, J. Bengoechea<sup>1</sup>, A. Murillo<sup>(1,4)</sup>, M.J. Rodríguez<sup>1</sup>, A.R. Lagunas<sup>1</sup>, C. Montes<sup>2</sup>, A. Linares<sup>3</sup>, E. Llarena<sup>2</sup>, O. González<sup>2</sup>, D. Molina<sup>2</sup>, A. Pio<sup>2</sup>, L. Ocaña<sup>2</sup>, C. Quinto<sup>2</sup>, M. Friend<sup>2</sup> & M. Cendagorta<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>NATIONAL RENEWABLE ENERGY CENTRE (CENER)  
C/ Ciudad de la Innovación 7, 31621 Sarriguren (Navarra), Spain  
Telephone: +34 948 25 28 00; Fax: +34 948 27 07 74

<sup>2</sup>Instituto Tecnológico y de Energías Renovables, S. A. (ITER)  
<sup>3</sup>Agencia Insular de Energía de Tenerife (AIET)

Pol. Industrial de Granadilla, s/n  
E 38600 Granadilla de Abona, Spain

<sup>4</sup>Universidad Pública de Navarra  
C/Sadar, s/n, 31006 Pamplona, Navarra  
Email: abcueli@cener.com

**ABSTRACT:** AiSoVol project consists on the development, manufacturing and testing in a controlled environment of a new concept of photovoltaic modules, conceived for facilitating their use as architectural elements. Thus, the modules will be fabricated by encapsulating its constituent electrical elements (cells and interconnections) with lamination techniques at low curing temperatures and using transparent thermoplastic instead of tempered glass, as well as binding materials structurally strengthened by a grid made of high-tenacity yarns, such as the ones used in sail technologies and thus avoiding the need for aluminum frames. This type of solution will provide, due to the nature of the constituent materials, lighter PV modules which can adapt easier to different surfaces. In this paper the methodology followed to define a suitable lamination process compatible to obtain reliable AiSoVol photovoltaic modules is described. Results achieved from materials and processes validation will pave the way for manufacturing the prototypes in next project phase.

**Keywords:** BIPV, encapsulation, polymer film, polycarbonate.

