



UNIVERSIDAD DE JAÉN

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN

**CENTRO DE ESTUDIOS AVANZADOS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA,
ENERGÍA Y MEDIO AMBIENTE**

TESIS DOCTORAL

**DESARROLLO DE NUEVAS ARQUITECTURAS
DE CÉLULAS SOLARES VERTICALES PARA
ULTRA-ALTOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN**

**PRESENTADA POR:
CELIA OUTES CASTRO**

**DIRIGIDA POR:
DR. D. EDUARDO FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ
DR. D. ANTONIO JESÚS GARCÍA LOUREIRO**

JAÉN, 6 DE SEPTIEMBRE DE 2022



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE NUEVAS ARQUITECTURAS DE CÉLULAS SOLARES VERTICALES PARA ULTRA- ALTOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN

**PRESENTADA POR:
CELIA OUTES CASTRO**

**DIRIGIDA POR:
DR. D. EDUARDO FERNÁNDEZ FERNÁNDEZ
DR. D. ANTONIO JESÚS GARCÍA LOUREIRO**

JAÉN, 6 DE SEPTIEMBRE DE 2022



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

UNIVERSIDAD DE JAÉN ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR DE JAÉN

TESIS DOCTORAL

La memoria titulada “DESARROLLO DE NUEVAS ARQUITECTURAS DE CÉLULAS SOLARES VERTICALES PARA ULTRA-ALTOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN”, ha sido desarrollada dentro del Centro de Estudios Avanzados en Ciencias de la Tierra, Energía y Medio Ambiente (CEACTEMA) de la Universidad de Jaén y en el Centro Singular de Tecnologías Intelixentes (CiTIUS) de la Universidad de Santiago de Compostela y presentada por Dña. Celia Outes Castro, aspirante al grado de Doctora en “Energías Renovables”, bajo la dirección de los doctores D. Eduardo Fernández Fernández y D. Antonio Jesús García Loureiro.

Jaén, a 6 de septiembre de 2022

El doctorando

Fdo. Celia Outes Castro

Los directores de Tesis

Fdo. Dr. D. Eduardo Fernández Fernández

Fdo. Dr. D. Antonio Jesús García Loureiro



Universidad de Jaén

Escuela de Doctorado

TESIS DOCTORAL

DESARROLLO DE NUEVAS ESTRUCTURAS DE CÉLULAS SOLARES VERTICALES PARA ULTRA- ALTOS NIVELES DE CONCENTRACIÓN

TRIBUNAL EVALUADOR:

Presidente: Natalia Seoane Iglesias

Secretario: Pedro Jesús Pérez Higuera

Vocal: Alberto Soria Moya

Suplente: Florencia Marina Almonacid Cruz

Suplente: Enrique Comesaña Figueroa

JAÉN, 6 DE SEPTIEMBRE 2022

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Eduardo Fernández y a Antonio García Loureiro por darme la oportunidad de realizar una investigación en el campo de la energía solar fotovoltaica de ultra – alta concentración desarrollando nuevas arquitecturas de células verticales con el objetivo de realizar una Tesis Doctoral. Me gustaría agradecerles también el tiempo y el trabajo invertido durante todo el proceso.

Agradezco a mi familia por el esfuerzo, la paciencia y apoyo recibido durante la realización de esta Tesis Doctoral, así como durante todos los años de formación recibidos desde el colegio hasta la actualidad.

Agradezco a mis amigos y a todas las personas que estuvieron cerca de mí durante el período de realización de esta Tesis por el apoyo y paciencia que me han brindado.

Por último, me gustaría agradecer también la colaboración de todos los profesores y compañeros del grupo AdPVTEch y del CiTIUS.

ÍNDICE

1. Resumen	13
2. Introducción	16
3. Justificación	21
4. Objetivos	23
5. Resultados de la tesis.....	26
5.1 Relación de publicaciones	26
5.2 Conexión de las publicaciones con los Objetivos de la Tesis.....	27
5.2.1 Objetivo nº 1: Revisión del estado del arte de materiales semiconductores y arquitecturas de células para UHCPV.....	27
5.2.2 Objetivo nº 2: Modelización avanzada mediante herramientas TCAD y diseño de nuevas arquitecturas de células solares para UHCPV.	29
5.2.3 Objetivo nº 3: Evaluación a distintas condiciones de operación y modelización analítica de nuevas estructuras de células solares para UHCPV.....	30
5.2.4 Objetivo nº 4: Diseño y evaluación de nuevas estructuras de convertidores láser mediante herramientas TCAD para sistemas HPLT.	33
5.3 Otras publicaciones relacionadas con la Tesis	35
5.3.1 Publicaciones de congresos.....	35
6. Conclusiones y trabajo futuro	37
7. Referencias.....	39
8. Copias de las publicaciones JCR	41

GLOSARIO

- CPV: concentración fotovoltaica
- C_{ratio} : concentración solar
- E_G : energía de gap
- FF: Fill Factor
- GaAs: arseniuro de galio
- HPLT: transmisión láser de alta potencia (High – Power Laser Transmission)
- HSC: células solares horizontales (Horizontal Solar Cells)
- I_0 : corriente de saturación del diodo
- I_{max} : corriente máxima o corriente en el punto de máxima potencia
- I_{ph} : corriente fotogenerada
- I_{sc} : corriente de cortocircuito
- IV: corriente – voltaje
- J_{sc} : densidad de corriente de cortocircuito
- JV: densidad de corriente – voltaje
- L: longitud de difusión
- m: factor de idealidad del diodo
- MJ: multiunión (Multi – Junction)
- η : eficiencia
- η_{max} : eficiencia máxima
- η_{record} : eficiencia récord
- PC: convertidor de potencia (Power Converter)
- P_{in} : potencia incidente o densidad de potencia incidente
- P_{max} : potencia máxima
- R_s : resistencia en serie
- R_{sh} : resistencia en paralelo
- SEM: Modelo de una Sola Exponencial (Single Exponential Model)
- Si: silicio
- SRH: Shockley – Read – Hall
- TCAD: Diseño Asistido por Tecnología de Computación (Technology Computer Aided Design)
- TJ: unión túnel (Tunnel Junction)
- UH: ultra – alta (Ultra – High)
- UHCPV: ultra – alta concentración fotovoltaica
- UHP_{in} : ultra – alta potencia incidente
- UV: ultra – violeta
- V_{max} : voltaje máximo o voltaje en el punto de máxima potencia
- VMJ: células solares verticales multiunión (Vertical Multi – Junction)
- V_{oc} : voltaje de circuito abierto
- VTJ: Vertical – Tunnel - Junction
- WPT: transferencia de potencia sin cables (Wireless Power Transfer)

DESARROLLO DE NUEVAS ARQUITECTURAS DE CÉLULAS SOLARES VERTICALES PARA ULTRA-ALTA CONCENTRACIÓN

1. Resumen

Actualmente vivimos en una época en la que los combustibles fósiles son la principal fuente de energía en nuestro día a día. Uno de los principales retos de la sociedad actual es cambiar esta situación, y para ello se intentan desarrollar y mejorar las diferentes tecnologías de energías renovables (solar, eólica, hidráulica, maremotriz, etc). Paralelamente, y como consecuencia de las necesidades emergentes de las energías renovables, se está investigando en el desarrollo de, por ejemplo, sistemas de almacenamiento de energía. Estos sistemas son necesarios ya que se necesita acumular la energía obtenida para los momentos en los que no se puede generar, como por ejemplo de noche en el caso de la fotovoltaica o cuando no hay viento en el caso de la eólica. Una forma de aprovechar la energía generada por estas fuentes renovables sería utilizar el excedente para producir el denominado hidrógeno verde o la hidráulica inversa, que, a su vez, pueden ser utilizadas posteriormente para generar electricidad cuando las fuentes eólicas o solares no puedan producir. Otros desarrollos emergentes son algunas aplicaciones que no dependerían de los combustibles fósiles, como puede ser por ejemplo el vehículo eléctrico. El objetivo de los desarrollos anteriormente mencionados es llevarnos por el camino de una nueva sociedad libre de combustibles fósiles. Es en este escenario donde se espera que la energía solar y la tecnología fotovoltaica jueguen un papel importante.

La fotovoltaica se divide en diferentes tecnologías (silicio, fotovoltaica de concentración (CPV), fotovoltaica orgánica, fotovoltaica de películas delgadas, etc). Entre todas las tecnologías fotovoltaicas, la CPV ha permitido aumentar el límite teórico de eficiencia (η) obtenida por una célula de silicio típica a bajo coste. Esto se debe a que la CPV está basada en el uso de dispositivos ópticos baratos que concentran la luz solar en una célula pequeña y muy eficiente. Actualmente, los sistemas CPV están basados principalmente en células solares horizontales (HSC) multi-unión (MJ) de alta eficiencia. Sin embargo, las células HSC MJ no permiten alcanzar altas eficiencias a concentraciones solares (C_{ratio}) mayores a los 1000-2000 soles, lo que limita el desarrollo de la ultra - alta (UH) CPV. Los sistemas UHCPV tienen un gran interés debido a su potencial para aumentar la eficiencia y disminuir los costes de la tecnología CPV. La principal limitación de las células actuales para UHCPV es debido al sombreado de los contactos superiores, así como por las pérdidas por resistencia en serie (R_s). Es en este punto donde el objetivo de esta Tesis Doctoral intenta contribuir al estudio de nuevas arquitecturas de células solares para UHCPV, centrándonos en el desarrollo de estructuras verticales con el objetivo de reducir las pérdidas debidas al sombreado de los contactos superiores y las de R_s .

En primer lugar, se realizó una revisión del estado del arte de materiales semiconductores y de arquitecturas de células solares, con el objetivo de seleccionar los que mejor se adecuen a los niveles de UHCPV. Esta selección, además de estar basada en una profunda revisión de la literatura, también se combinó con simulaciones realizadas mediante el software Silvaco TCAD, específico para el diseño de dispositivos semiconductores. A partir de los resultados del estado del arte y las simulaciones llevadas a cabo, se determinó qué células actuales se adaptan mejor a la tecnología UHCPV.

A partir del estudio realizado se decidió investigar la denominada célula Vertical – Tunnel – Junction (VTJ). Para ello, en primer lugar, se realizó una optimización de la estructura a 4000 soles, obteniendo una eficiencia máxima (η_{max}) de 31.7%. Por otro lado, se llevó a cabo un análisis de cómo afectan los mecanismos de recombinación a la estructura, obteniendo que la recombinación radiativa dominaba en los distintos puntos de operación estudiados, voltaje de circuito abierto (V_{oc}), corriente de cortocircuito (I_{sc}) y potencia máxima (P_{max}). Además de ello, se hizo un análisis de cómo afectaban

el C_{ratio} y los mecanismos de recombinación a cada uno de los parámetros característicos de una célula solar. De este análisis se obtuvo que el comportamiento de estos parámetros no estaba limitado por ninguno de los mecanismos de recombinación. Se observó que la I_{sc} aumentaba de forma lineal con C_{ratio} independientemente de la recombinación considerada y sin verse afectada por ninguna de ellas. En el caso de V_{oc} , se obtuvo que aumentaba de forma lineal con el logaritmo de C_{ratio} , y que la recombinación radiativa dominaba. Para el Fill Factor (FF), se obtuvo que aumentaba con el C_{ratio} hasta un valor de 2000 soles mientras que a C_{ratio} mayores decrecía, afectándole más la recombinación radiativa. Por último, se obtuvo que η aumentaba linealmente con el logaritmo de C_{ratio} , sin observarse un impacto considerable de los mecanismos de recombinación y siendo la recombinación radiativa la que degrada más η . A pesar de ello, se obtuvo una eficiencia récord (η_{record}) de 32.2% a 10000 soles, mejorando el récord actual hasta el momento, que era de 29.3% a 50 soles.

Por otro lado, se validó el modelo de una sola exponencial (Single Exponential Model (SEM)) mediante el método de Phang et al. para la célula solar VTJ. Además, también se analizó el comportamiento eléctrico respecto al C_{ratio} y la temperatura en el rango de 1000 a 10000 soles y de 298 a 423 K respectivamente. En primer lugar, se halló que el SEM en combinación con el método de Phang et al. es apropiado para predecir y evaluar el funcionamiento de la célula VTJ, obteniendo errores menores al 1% para todos los casos estudiados. Por otro lado, los parámetros característicos del SEM fueron analizados, observando que la corriente fotogenerada (I_{ph}) aumentaba de forma lineal con C_{ratio} , así como que crecía ligeramente con la temperatura. La corriente de saturación (I_0) y el factor de idealidad del diodo (m) seguían una tendencia similar aumentando ambos con C_{ratio} y la temperatura. Las resistencias en serie (R_s) y en paralelo (R_{sh}) decrecían de forma exponencial con C_{ratio} , y también disminuyen con la temperatura.

Dado el potencial de la nueva estructura de proporcionar altas eficiencias a UH intensidades, se decidió también investigar su potencial como convertidor de alta potencia (power converter (PC)). Para ello se realiza una revisión del estado del arte de PCs, tanto de estructuras como de materiales utilizados, encontrando que principalmente están basados en arquitecturas horizontales de arseniuro de galio (GaAs). Estas estructuras, al igual que ocurre en el caso de células solares, tienen su η limitada a UH potencias incidentes (P_{in}) debido a las inevitables pérdidas por R_s , la alta densidad de corriente y al sombreado que crean los contactos superiores. Es por ello por lo que se introduce el PC basado en la estructura VTJ. En primer lugar, se realizó una optimización del dispositivo para una longitud de onda próxima a la energía del gap del material a una P_{in} de $10 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ y a $3000 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, obteniéndose dos diseños denominados PC1 y PC2 respectivamente. Los parámetros a optimizar son la longitud de onda con la que vamos a iluminar el dispositivo, la anchura y dopado de las capas P y N y la altura del PC. De las optimizaciones se obtiene una η_{max} de 69.5% para el PC1 y 76.3% para el PC2. Una vez optimizados, se estudió el comportamiento del dispositivo para diferentes P_{in} . Para ello se analizaron las curvas de corriente – voltaje (IV) del PC2, hallando que I_{sc} , V_{oc} y P_{max} aumentaban con P_{in} . Por otro lado, se realizó el estudio de cómo variaba η con P_{in} y se hizo una comparación con los resultados experimentales y simulados de estructuras encontradas en la literatura. Para el PC1 se observó que η aumentaba con P_{in} hasta un valor de $100 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, alcanzando su máximo en 71.7%, y disminuyendo rápidamente para valores mayores de P_{in} . Para el PC2 se halló que η aumenta linealmente para todo el rango de P_{in} estudiado. Los dos PCs mejoran significativamente la eficiencia de las estructuras encontradas en la literatura, mejorando incluso la eficiencia récord (66.0% a $64.4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$) en un 5.3% y un 4.3% para el PC1 y PC2 respectivamente, a pesar de que no están optimizados para esa P_{in} . Además, también se calcularon las R_s de los PCs basados en VTJ y los de la literatura, observando que los VTJ - PCs tienen una R_s al menos dos o tres órdenes de magnitud menor. Por otro lado, se estudió la dependencia de V_{oc} y FF con P_{in} . Se encontró que V_{oc} aumentaba de forma lineal con el logaritmo de P_{in} para los dos PCs. Sin embargo, para el PC1 el FF decrecía con P_{in} , mientras que el PC2 mantiene un alto FF para todo el rango de P_{in} estudiado. Por último, se calculó cómo afectaban los efectos de recombinación a los PCs basados en VTJ, hallando que el mecanismo dominante era la recombinación radiativa, ya que disminuye la eficiencia del PC1 un 22.1% y la del PC2 un 3.3% respecto al caso sin ninguna recombinación.

2. Introducción

Actualmente, el sistema energético del planeta está dominado por la energía proveniente de combustibles fósiles tales como el carbón, el petróleo y sus derivados. Estos combustibles son fuentes no renovables debido a que se formaron a partir de materia orgánica bajo determinadas condiciones de presión y temperatura hace millones de años. Además, son altas fuentes de contaminación, ya que en su combustión emiten dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera. Debido a la gran demanda de estos combustibles, a su tiempo de formación y a las condiciones tan específicas para su creación, estos recursos energéticos comienzan a escasear, situación que se agravará a largo plazo debido a que su cantidad es limitada. Por otro lado, respecto a la contaminación derivada de su combustión, los gases emitidos son los principales causantes del aumento del efecto invernadero, lo que está provocando un cambio climático en el planeta que está siendo agravado y acelerado por el hombre. Estos gases, además de generar contaminación, también son perjudiciales para la salud [1], por lo que pueden provocar enfermedades, mayoritariamente de tipo respiratorio, y especialmente en lugares como las grandes ciudades debido a la alta actividad industrial y al tráfico. Además de ello, no solo son perjudiciales para la salud de los seres humanos, sino que también son tóxicos para el resto de seres vivos, lo cual puede afectar a su vez a los diferentes ecosistemas [2].

La solución a los problemas derivados de los combustibles fósiles la podemos encontrar en las energías renovables (solar, hidráulica, eólica, etc). Estas fuentes de energía se obtienen de la propia naturaleza (sol, agua y viento respectivamente) y por tanto son fuentes inagotables. Dentro de las energías renovables, esta Tesis está enmarcada dentro de la energía solar fotovoltaica, que consiste en el aprovechamiento de la luz solar para generar electricidad, principalmente por medio de un dispositivo semiconductor. Al ser una energía que depende de la luz del sol, es un recurso disponible en la mayor parte del planeta, lo que puede ayudar a la reducción e incluso eliminación de conflictos y tensiones entre distintos países por las fuentes energéticas. Por otro lado, el hecho de que la conversión de la radiación solar en electricidad sea directa implica que no es necesario utilizar máquinas grandes y complejas. Actualmente la energía solar está siendo implantada de forma global a nivel mundial debido principalmente a que es una fuente de energía competitiva [3].

La tecnología de concentración fotovoltaica (CPV) es un tipo de tecnología fotovoltaica que se basa en aumentar la irradiancia que incide sobre las células solares con el fin de incrementar la eficiencia y disminuir el coste de la electricidad [4]–[6]. La tecnología consiste en el uso de dispositivos ópticos baratos capaces de concentrar la luz del sol en una célula pequeña pero muy eficiente. En general, la tecnología CPV se clasifica según la concentración solar (C_{ratio}), es decir, el número de veces que la luz del sol se concentra, siendo baja para valores inferiores a 10 soles, media para valores entre 10 y 100 soles, alta entre 100 y 2000 soles y ultra-alta (UH) para valores mayores de 2000 soles [7]. Los sistemas CPV tienen varias ventajas como: (i) células solares con áreas más pequeñas, (ii) células caras, pero con alta eficiencia, (iii) aumento de la eficiencia de la célula solar y la eficiencia del sistema completo y (iv) la reducción del coste de la electricidad generada.

Actualmente, los sistemas CPV están basados en arquitecturas de células solares horizontales (HSC) multi-unión (MJ) de alta eficiencia (η) [8], [9], [10]. Estas células están compuestas por varias uniones PN, llamadas subcélulas, de materiales semiconductores III-V capaces de alcanzar η mayores al 40% [8], [11]. Estas subcélulas están conectadas entre sí por diodos túnel altamente dopados, con baja resistencia en serie (R_s) y grosor, reduciendo tanto como sea posible las pérdidas óhmicas y las pérdidas por absorción. En general, las células solares MJ están compuestas por tres subcélulas de materiales semiconductores distintos con diferente energía de gap (E_g) [10]. Las subcélulas están apiladas unas encima de otras, siendo la subcélula superior (top subcell) la que tiene mayor E_g , por lo que es la subcélula que absorbe los fotones más energéticos, es decir, los que tienen longitudes de onda más pequeñas con luz cercana al ultravioleta (UV). En el medio de la arquitectura se encontraría la subcélula cuyo material tiene un gap intermedio (middle subcell), y por tanto absorbería fotones de energías y longitudes de onda intermedias. Y, por último, tendríamos la subcélula cuya E_g es la más pequeña, y por tanto absorbe los fotones menos energéticos, es decir, los que tienen una longitud de onda más larga y cercana al infrarrojo. La Figura 1 muestra un esquema de una célula MJ compuesta por tres

uniones [12]. Las células MJ poseen dos contactos eléctricos que serán los encargados de extraer la corriente generada y que están situados en la parte superior e inferior del dispositivo. En este tipo de estructuras horizontales es muy importante optimizar el contacto superior para maximizar la conversión de η según la C_{ratio} con la que estamos operando. Esto es imprescindible para reducir las pérdidas óhmicas y por sombreado que genera dicho contacto. Por otro lado, la relación que hay entre el sombreado del contacto superior y la R_s de las células MJ actuales, que están basadas en arquitecturas horizontales, impide que se desarrollen células solares capaces de alcanzar η pico a C_{ratio} mayores a 1000-2000 soles [13]. Esta limitación es la que impide que se desarrollen sistemas a UHCPV capaces de obtener altas η y que sean de bajo coste.

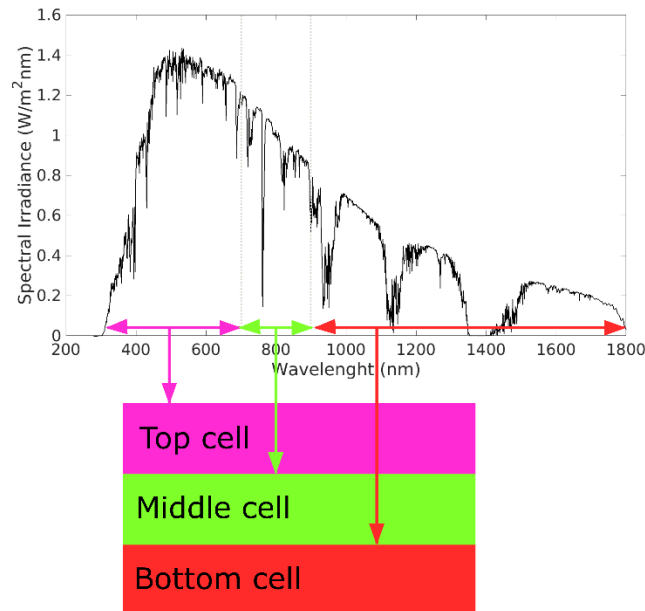


Figura 1. Esquema de una célula solar compuesta por tres subcélulas con distintas energías de gap (E_g) y parte del espectro que absorbería cada una de ellas (adaptada de [12]).

La limitación de las células horizontales MJ actuales para producir η altas a niveles UH de concentración es el punto de partida de esta Tesis doctoral. Concretamente, el objetivo es estudiar las denominadas células verticales multi-unión (VMJ), arquitecturas que comenzaron a ser estudiadas en los años 70 [14] y cuyas características son muy interesantes para el desarrollo de dispositivos a UHCPV. En la Figura 2 [15] se muestra un esquema de una célula solar VMJ típica. Estas estructuras consisten en la conexión de múltiples uniones PN con los contactos metálicos colocados en los laterales, al contrario que en las células solares horizontales (HSC), en donde se sitúan en la parte superior e inferior del dispositivo [14], [16], [17]. Estas células, al tener los contactos en los laterales, se iluminan perpendicularmente a las uniones PN, lo que implica que el flujo de corriente también sea lateral. Como consecuencia de esto, la gran sección eficaz de la corriente implica que las densidades de corriente sean pequeñas, las pérdidas por R_s serán menores, y por tanto la η aumentará con C_{ratio} [18]. Esto permitiría desarrollar células optimizadas para UHCPV.

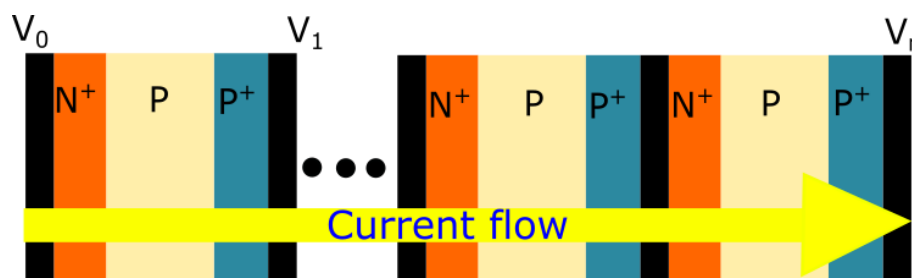


Figura 2. Esquema de una célula solar vertical multi-unión (adaptada de [15]).

Hasta la presente Tesis, solo se habían desarrollado células VMJ basadas en silicio (Si) [19], que es un semiconductor de gap indirecto, con una eficiencia del 19% a un C_{ratio} de 1200 soles [20], debido a las longitudes de difusión (L) del material (100-300 μm) [15]. Esta limitación se debe a que los semiconductores de gap directo tienen una L de aproximadamente 1-5 μm , lo que implica conexiones en serie de aproximadamente 1000 VMJ para obtener una célula solar de 1 mm mediante el uso de contactos metálicos. Por tanto, aunque la baja R_s de las células VMJ no limita η con C_{ratio} , no es posible actualmente elegir los materiales semiconductores que optimizan la absorción del espectro solar [21], y esto impide el desarrollo de estructuras verticales de alta eficiencia para aplicaciones de UHCPV.

Dentro de los últimos avances llevados a cabo, es necesario destacar un nuevo diseño de célula solar, la denominada Vertical-Tunnel-Junction (VTJ) [22]. Este nuevo diseño ha sido propuesto por los co-directores de la presente Tesis doctoral y permite el uso de semiconductores tanto de gap directo como de gap indirecto en estructuras verticales. Debido a esto, es posible seleccionar la E_g apropiada para cada caso particular. La célula VTJ está compuesta por dos subcélulas idénticas unidas por una unión tunnel (TJ) con los contactos situados en los laterales de la estructura. Con esta arquitectura es posible aumentar el área de la célula que está expuesta a la luz sin más que conectar varias VTJs mediante TJs. Las simulaciones previas han demostrado que la VTJ aumenta el valor de η con C_{ratio} hasta alcanzar un valor máximo de 28.4% a 15000 soles (Figura 3) [22], este es un resultado prometedor, ya que el récord de eficiencia (η_{record}) en HSC de arseniuro de galio (GaAs) es 29.3% a un C_{ratio} de 50 soles [13]. Los resultados obtenidos en esta publicación son importantes, ya que las HSC tienen su máxima eficiencia (η_{max}) limitada a C_{ratio} de aproximadamente 1000 soles.

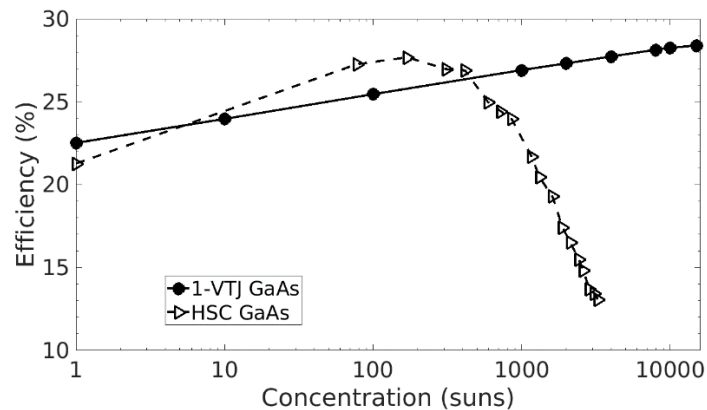


Figura 3. Eficiencia en función del logaritmo de la concentración solar para una célula solar Vertical-Tunnel-Junction (VTJ) de GaAs y los datos experimentales de una célula solar convencional (HSC) de GaAs (adaptada de [22]).

Por otro lado, la arquitectura VTJ también puede ser utilizada para la transferencia de potencia mediante un sistema sin cables (Wireless power transfer (WPT)). La tecnología WPT está atrayendo un gran interés y ya cuenta con un mercado de millones en los últimos años [23]. Entre todas las tecnologías WPT, la más prometedora debido al gran número de aplicaciones potenciales y perspectivas de futuro [24] es la transmisión láser de alta potencia (high-power laser transmission (HPLT)). La HPLT consiste en el uso de una luz monocromática, normalmente un láser, para transferir potencia a un sistema remoto mediante una célula fotovoltaica o un convertidor. Esta tecnología es una posible solución a los sistemas tradicionales de cableado cuando estos no son recomendables o simplemente es imposible utilizarlos [25]. Además, nos ofrece la posibilidad de transferir potencia del orden de quilovatios a varios kilómetros de distancia usando una fuente de luz. Entre las posibles aplicaciones de HPLT podemos encontrar la transferencia de potencia a pequeñas naves aéreas [26], [27], sensores remotos [28], [29], robots [26] o incluso satélites [30]. A pesar de su potencial, la HPLT es todavía una tecnología en desarrollo y se necesita mejorar mucho su η , que actualmente es del ~20%, tanto para fuentes láser como convertidores fotovoltaicos, de esta forma esta tecnología tendría más aprovechamiento [24].

Un factor clave en el desarrollo de convertidores fotovoltaicos es la capacidad de obtener altas η a condiciones de iluminación extremas, lo que es importante para permitir que se transfiera la mayor potencia posible al sistema remoto. Es por ello que se investiga la viabilidad de altas densidades de potencia del láser, en el orden de $\text{kW}\cdot\text{cm}^{-2}$ [31], [32]. En este punto, el principal reto es superar la limitación de conversión de potencia en eficiencia de las células fotovoltaicas para intensidades de

luz extremas. Es en este aspecto donde la arquitectura VTJ entra en juego como PC debido a sus propiedades, ya que su R_s es menor, las densidades de corriente son bajas y tiene un aumento del voltaje de operación debido a la colocación de sus contactos metálicos respecto a la luz incidente, como ya se ha comentado anteriormente en esta introducción.

3. Justificación

Como se ha comentado en la introducción, el desarrollo de nuevas arquitecturas de células solares verticales para ultra-altos niveles de concentración basadas en la arquitectura VTJ es necesario para la obtención de una estructura que sea capaz de obtener eficiencias pico a UHCPV.

Este proyecto de Tesis surge debido a las limitaciones que poseen las células solares convencionales para obtener eficiencias pico por encima de los 1000 soles, lo que complica el desarrollo de sistemas a UHCPV que sean competitivos. Algunas de estas limitaciones son la optimización de los contactos superiores para reducir las pérdidas óhmicas y la minimización de los efectos de sombreado con el objetivo de aumentar la captación de la luz incidente. Como consecuencia de estos inconvenientes, la R_s de las células fotovoltaicas no se puede reducir de forma significativa, por lo que η máxima se suele obtener para concentraciones menores a 1000 soles.

Para obtener estas mejoras y eliminar las barreras de las células solares convencionales se pretende estudiar y desarrollar diferentes arquitecturas de células de concentración que tengan una R_s muy inferior a las actuales, y así eliminar una de las limitaciones principales. De esta forma, a pesar de que se restringe el espectro que puede ser absorbido a una única parte, respecto a los actuales diseños basados en tres uniones, la η de las células a niveles UHCPV (> 2000 soles) puede aumentar debido a su incremento en la concentración y a la menor pérdida por R_s . Además, se puede reducir el coste de producción de las actuales células de tres uniones debido a la simplicidad de estas nuevas arquitecturas.

Para lograr esta finalidad, en primer lugar, se analizarán distintos tipos de materiales semiconductores para así seleccionar los que mejor se adecuen a los niveles de UHCPV y a la arquitectura VTJ. Esta selección se basará en una profunda revisión del estado del arte en combinación con simulaciones realizadas con software específico para el diseño de dispositivos semiconductores. A partir de los resultados obtenidos del estado del arte y las simulaciones realizadas, se determinarán qué arquitecturas de células actuales se podrían adaptar mejor a la tecnología UHCPV. Además, estas estructuras serán estudiadas para su posible implantación como convertidor láser de alta potencia. Esto ayudará a mejorar los sistemas HPLT y aumentará el impacto de los resultados de la presente investigación.

4. Objetivos

El objetivo de esta Tesis Doctoral es realizar el estudio y el desarrollo de distintas arquitecturas de células de concentración fotovoltaica para niveles de UHCPV, centrándonos en arquitecturas de células verticales, debido a que tienen una R_s muy inferior a las actuales, y, por tanto, su η no está limitada por el factor de concentración. Además, también se pretende contribuir al desarrollo de nuevos convertidores láser de alta potencia con el fin de mejorar los denominados sistemas HPLT. Para llevar esto a cabo, se consideran varios objetivos específicos, en los que se incluye la modelización de las nuevas células y convertidores, así como su evaluación a distintas condiciones de operación. Los objetivos específicos son los siguientes:

1. Revisión del estado del arte de materiales semiconductores y arquitecturas de células para UHCPV.
2. Modelización avanzada mediante herramientas TCAD y diseño de nuevas arquitecturas de células solares para UHCPV.
3. Evaluación a distintas condiciones de operación, y modelización analítica de nuevas estructuras de células solares para UHCPV.
4. Diseño y evaluación de nuevas estructuras de convertidores láser mediante herramientas TCAD para sistemas HPLT.

Los objetivos específicos se desarrollan a continuación:

Objetivo nº1. Revisión del estado del arte de materiales semiconductores y arquitecturas de células para UHCPV.

La finalidad principal de este objetivo es realizar una revisión del estado del arte de los posibles materiales y arquitecturas de células solares en UHCPV. Para ello se realizó en primer lugar un estudio de las posibles estructuras de células solares: horizontales, verticales, etc, así como el estudio tanto de sus ventajas como desventajas. Además de ello, se realizó una revisión del estado actual de la tecnología de alta y UHCPV, así como sus limitaciones aplicadas a las distintas arquitecturas de células solares. Por último, y para completar la información obtenida, se hizo un estudio de los diferentes materiales semiconductores que pueden ser utilizados junto con sus propiedades físicas para ver su viabilidad ante las estructuras que se pretenden desarrollar.

Objetivo nº2. Modelización avanzada mediante herramientas TCAD y diseño de nuevas arquitecturas de células solares para UHCPV.

En este objetivo se pretende realizar una modelización de nuevas arquitecturas de células solares para UHCPV. Para ello se utilizaron herramientas TCAD como el software Silvaco, realizando un aprendizaje previo y continuo del mismo. Por otro lado, también es necesario realizar un aprendizaje del análisis de las técnicas y de la metodología a usar en las simulaciones, con el objetivo de desarrollar las distintas arquitecturas y realizar su estudio. Además de ello, en este objetivo de la Tesis se estudiaron, caracterizaron y analizaron físicamente los resultados numéricos de las distintas magnitudes obtenidas, así como de las curvas corriente - voltaje (IV) que caracterizan las células solares.

Objetivo nº3. Evaluación a distintas condiciones de operación y modelización analítica de nuevas estructuras de células solares para UHCPV.

Las nuevas arquitecturas desarrolladas necesitan ser estudiadas y evaluadas bajo distintas condiciones de operación para comprobar así cuál es su funcionamiento, así como para analizar posibles mejoras. De esta forma podemos analizar cómo se comportan los parámetros más característicos de una célula con respecto a la intensidad o la temperatura. Por otro lado, también se analizaron los resultados obtenidos con Silvaco mediante herramientas de software de análisis matemático, como por ejemplo Matlab. Para ello se desarrollaron diversos códigos con el fin de aplicar varios modelos matemáticos, tales como el de la exponencial simple (Single Exponential Model (SEM)), y de esta forma predecir el comportamiento de las arquitecturas verticales desarrolladas durante la Tesis. Así, se puede comprobar cómo se comportan los parámetros característicos del modelo con respecto a magnitudes como la concentración solar o la temperatura, y al mismo tiempo entender y describir su comportamiento eléctrico y físico. Finalmente, los resultados obtenidos se comparan con los datos disponibles en la literatura de los actuales dispositivos. De esta forma, se evalúan las mejoras de las nuevas arquitecturas propuestas en relación a las estructuras actuales.

Objetivo nº4. Diseño y evaluación de nuevas estructuras de convertidores láser mediante herramientas TCAD para sistemas HPLT.

En este último objetivo se pretende diseñar una arquitectura vertical para un PC. Para ello, en primer lugar, se realizó una revisión del estado del arte de los posibles materiales y estructuras para PCs a ultra - alta potencia incidente (UHP_{in}). Se llevó a cabo un estudio de las posibles estructuras de PCs: horizontales, verticales, etc, así como de las ventajas y desventajas de cada una de ellas. Por otro lado, también se realizó un estudio de los diferentes materiales semiconductores que pueden ser utilizados, así como sus propiedades físicas, para ver su viabilidad ante las estructuras que se pretenden desarrollar. En segundo lugar, se hizo una modelización de la estructura VTJ como PC. Para ello se utilizaron herramientas TCAD como el software Silvaco. Además, en este objetivo de la Tesis se estudiaron, caracterizaron y analizaron físicamente los resultados numéricos de las distintas magnitudes obtenidas, así como las curvas $I-V$ características de los PCs. Por último, es necesario evaluar los PCs bajo distintas condiciones de operación para comprobar cuál es su funcionamiento, así como para analizar posibles mejoras. De esta forma podemos estudiar cómo se comportan los parámetros más característicos de una célula con respecto a la P_{in} y entender y describir su comportamiento eléctrico y físico. Finalmente, los resultados obtenidos se comparan con los datos disponibles en la literatura de los actuales dispositivos. De este modo, se pueden evaluar las mejoras de las nuevas arquitecturas propuestas en relación a las estructuras ya existentes.

5. Resultados de la tesis

5.1 Relación de publicaciones

Artículo nº1	“Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns”
Autores	Celia Outes , Eduardo F. Fernández, Natalia Seoane, Florencia Almonacid y Antonio J. García-Loureiro
Revista	<i>Solar Energy</i>
Volumen, etc.	203, 136-144, (2020)
Clasificación JCR	ENERGY & FUELS: 38/114 (Q2)
Índice de impacto	5.742 (2020)
DOI	https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.04.029

Artículo nº2	“Dependence of the Vertical-Tunnel-Junction GaAs Solar Cell on concentration and temperature”
Autores	Celia Outes , Eduardo F. Fernández, Natalia Seoane, Florencia Almonacid, Antonio J. García-Loureiro
Revista	<i>IET Renewable Power Generation</i>
Volumen, etc.	Vol. 16, no. 8, pp. 1577-1588, (2022)
Clasificación JCR	ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC : 120/344 (Q2)
Índice de impacto	3.034 (2021)
DOI	https://doi.org/10.1049/rpg2.12456

Artículo nº3	“GaAs Vertical-Tunnel-Junction Converter for Ultra-High Laser Power Transfer”
Autores	Celia Outes , Eduardo F. Fernández, Natalia Seoane, Florencia Almonacid, Antonio J. García-Loureiro
Revista	<i>IEEE Electron Device Letters</i>
Volumen, etc.	Vol.:42, no.: 12, pp. 1882-1885, (2021)
Clasificación JCR	ENGINEERING, ELECTRICAL & ELECTRONIC: 69/276 (Q1)
Índice de impacto	4.816 (2021)
DOI	10.1109/LED.2021.3121501

5.2 Conexión de las publicaciones con los Objetivos de la Tesis

5.2.1 Objetivo nº 1: Revisión del estado del arte de materiales semiconductores y arquitecturas de células para UHCPV.

Artículo nº 1: “Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns”
Artículo nº 2: “Dependence of the Vertical-Tunnel-Junction GaAs Solar Cell on concentration and temperature”

El objetivo número uno, “**Revisión del estado del arte de materiales semiconductores y arquitecturas de células para UHCPV**”, se desarrolló entre los **artículos número 1 y 2**, citados en la tabla.

En los artículos 1 (“*Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns*”) y 2 (“*Dependence of the Vertical-Tunnel-Junction GaAs solar cell on concentration and temperature*”) se hizo un análisis de las arquitecturas utilizadas y del estado del arte de CPV y UHCPV.

En estas publicaciones se indica que la tecnología de concentración fotovoltaica, con valores entre los 300-1100 soles, ha alcanzado eficiencias superiores al 30%, lo que supone los más altos valores entre todas las tecnologías fotovoltaicas. Además, se ha comprobado que con estos sistemas existe una gran capacidad de producir alta energía y reducir el coste de la electricidad en lugares con grandes recursos de energía solar. Sin embargo, a pesar de su destacable progreso y su alta eficiencia, todavía no existen sistemas capaces de competir con la fotovoltaica convencional de no concentración, como por ejemplo c-Si, p-Si, CdTe, etc. A consecuencia de esto y para poder competir con la fotovoltaica convencional se ha intentado reducir el coste y mejorar el funcionamiento de la CPV.

Por otro lado, se indica que los sistemas de UHCPV con C_{ratio} mayores de 1000 soles son una de las prometedoras tecnologías que pueden alcanzar altas η y a su vez crear una nueva generación de sistemas CPV de bajo coste. Esto es debido a varios factores: 1) la η teórica de las células solares aumenta con C_{ratio} y 2) la cantidad de material semiconductor se reduce drásticamente. Teniendo esto en cuenta, se intenta obtener células solares con altos valores de η a niveles UH, diseños ópticos capaces de alcanzar esos niveles UH con un funcionamiento óptico adecuado y mecanismos térmicos capaces de eliminar y/o explotar las temperaturas extremas producidas por la célula a esas elevadas C_{ratio} . La restricción más grande para desarrollar sistemas UHCPV que sean adecuados está relacionada con las propias células solares. Hoy en día, la mayor parte de los sistemas CPV están basados principalmente en estructuras de células horizontales MJ de diferentes materiales semiconductores III-V con diferentes E_g . Estas células están formadas por dos contactos eléctricos situados en la parte superior e inferior, lo que implica un inevitable sombreado del mismo sobre la propia célula, que, a su vez, está relacionado con la R_s . Este factor limita el desarrollo de células MJ con alta η a niveles UH independientemente de cómo se diseñe el contacto superior o de cuánto se reduzca el área de iluminación, lo que también contribuye a reducir la corriente. Además, y acuerdo a las últimas tablas que recogen los resultados obtenidos de η , no ha sido posible hasta el momento desarrollar células MJ basadas en las configuraciones horizontales actuales con picos de η a más de 1000 soles. Este hecho impide que se desarrollen sistemas de UHCPV competitivos.

Es en este punto donde aparecen las células verticales. La principal diferencia de esta estructura con las células horizontales se encuentra en la colocación de los contactos eléctricos, ya que se sitúan en los laterales, y por tanto la luz incide de forma perpendicular a las uniones PN. De esta forma se eliminan las limitaciones debidas al sombreado del contacto superior, y además, esta estructura ofrece una solución para reducir las limitaciones por R_s de las arquitecturas actuales. Debido a la colocación de sus contactos, es posible obtener células con bajas densidades de corriente debido a la gran sección eficaz de la intensidad y baja R_s y, por tanto, desarrollar células optimizadas para UH C_{ratio} . Por otro lado, hoy en día, la mayoría de las células verticales consisten en la denominada estructura VMJ. En esta arquitectura, cada subcélula se conecta por medio de contactos laterales y como consecuencia estas células están limitadas a materiales semiconductores de gap indirecto con longitudes de difusión de portadores sobre 100-300 μm . Esta limitación se debe

a que los materiales de gap directo tienen una L mucho más bajas, 1-5 μm , lo que implicaría la conexión en serie de 200-1000 células VMJ para alcanzar una célula solar que mida 1 mm de lado usando contactos metálicos laterales. Esta restricción se puede contrastar sin más que observar que las células solares VMJ que hay fabricadas son todas de Si. Para solucionar esta limitación, recientemente se ha introducido la arquitectura de célula solar VTJ. En esta estructura las distintas subcélulas que componen la estructura vertical se conectan por medio de diodos túnel. De esta forma, se pueden usar materiales directos con longitudes de difusión más pequeñas como en el caso del GaAs. Esto aumenta la selección de materiales semiconductores, lo que permitiría mejorar la absorción del espectro, y por tanto, aumentar la eficiencia.

En estos dos artículos se **concluye** que la célula solar VTJ es la estructura más prometedora estudiada hasta el momento para UHCPV. Además, se determinó que para poder conocer todo su potencial es necesario estudiar la estructura en profundidad, proponiendo mejoras y observando su comportamiento a niveles UH de concentración solar.

5.2.2 Objetivo nº 2: Modelización avanzada mediante herramientas TCAD y diseño de nuevas arquitecturas de células solares para UHCPV.

Artículo nº 1: “Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns”

El objetivo número 2, “**Modelización avanzada mediante herramientas TCAD y diseño de nuevas arquitecturas de células solares para UHCPV**”, se llevó a cabo en el **artículo 1** citado en la tabla anterior.

En el artículo 1 (“*Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns*”) se realiza una optimización a 4000 soles de concentración de la estructura VTJ basada en GaAs introducida previamente en [22], mediante el uso del software Silvaco TCAD. Para ello se realizó en primer lugar una optimización de la altura del dispositivo previamente publicado, cambiando su valor con el objetivo de encontrar la máxima η posible, obteniendo un valor óptimo para la altura de 15 μm . Una vez este parámetro está optimizado, se toma este valor y se deja fijo, pasando a analizar la anchura y el dopado de las capas P y N. Para realizar la optimización de estas capas, en primer lugar, se varían los valores de la capa P mientras los de la capa N se mantienen constantes en 2.5 μm y $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. A continuación, los parámetros de la capa N también fueron optimizados, pero en este caso la capa P tenía sus valores fijos en 5 μm y $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Los resultados de la optimización de la capa P muestran que la η aumenta al disminuir el dopado, encontrando una η_{max} de 31.7% en un rango de anchura que va desde los 4.2 a los 6.6 μm y a un dopado desde $1 \cdot 10^{15}$ a $3 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Por otro lado, en lo que respecta a la optimización de la capa N, se observó también que la η aumentaba al disminuir el dopado obteniendo una η_{max} de 31.7% con valores del ancho de la capa que van desde 2.0 a 4.0 μm y valores de dopado desde $1 \cdot 10^{15}$ a $2 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Basándonos en estos resultados, finalmente se tomaron como valores óptimos para la capa P una anchura de 6.0 μm , y para la capa N de 3.0 μm , con un dopado de $1 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ para ambas. De esta forma, con esta configuración conseguimos la máxima η , 31.7%, y la máxima anchura posible para las capas. El criterio establecido es importante para maximizar el área de la célula y de esta forma disminuir el número de TJ tanto como sea posible para arquitecturas con múltiples subcélulas VTJ. Una vez optimizada la arquitectura se comparó su η con la de la estructura de partida [22] para C_{ratio} desde 1 a 10000 soles, obteniendo que el nuevo diseño mejoraba la η en ~ 4%, excepto para el caso de 1 sol donde la mejoría es ~3%.

En este artículo se **concluye** que es importante realizar una optimización detallada de las estructuras VTJ para poder mejorar su funcionamiento y eficiencia. Tal como se ha comentado, se logró mejorar la η de diseños previos basados en GaAs aproximadamente un 4%.

5.2.3 Objetivo nº 3: Evaluación a distintas condiciones de operación y modelización analítica de nuevas estructuras de células solares para UHCPV.

Artículo nº 1: “Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns”
Artículo nº 2: “Dependence of the Vertical-Tunnel-Junction GaAs Solar Cell on concentration and temperature”

El objetivo número 3, “Evaluación a distintas condiciones de operación y modelización analítica de nuevas estructuras de células solares para UHCPV”, se llevó a cabo en los artículos 1 y 2 citados en la tabla anterior.

En el artículo número 1 (“*Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns*”) se realizó un estudio de los efectos de recombinación de la célula VTJ en distintas condiciones de operación.

En primer lugar, y usando la estructura obtenida en una optimización a C_{ratio} de 4000 soles realizada previamente, se hizo un estudio de los efectos de recombinación a lo largo de la anchura del dispositivo en los puntos de operación de V_{OC} , I_{SC} y P_{max} . Para ello, se hicieron dos cortes en la estructura a lo largo del ancho de la célula a dos alturas diferentes (3 μm y 12 μm) respecto a la superficie en la que incide la luz solar. Para comparar debidamente las tasas de recombinación se seleccionaron puntos intermedios de la anchura de las capas P y N de las dos subcélulas que componen la VTJ. Los puntos escogidos fueron 3.0 y 12.2 μm para las capas P y 8.0 y 17.2 μm para las capas N. Los resultados obtenidos mostraron que la recombinación radiativa domina frente a Auger y Shockley – Read – Hall (SRH) para los tres puntos de operación estudiados. Además, se observó que las tasas de recombinación disminuyen a medida que nos alejamos de la superficie en la que incide la luz y varían según el punto de operación que estamos estudiando, es decir, las tasas más grandes las encontramos para V_{OC} , las más pequeñas para I_{SC} y las intermedias para P_{max} . Esto se debe a que los ratios de recombinación son mayores a mayor número de portadores, y en el punto de V_{OC} hay mayor número de portadores que en I_{SC} y P_{max} , siendo I_{SC} el punto en que hay menos.

En segundo lugar, se realizó el estudio del impacto de C_{ratio} sobre los parámetros eléctricos más importantes (I_{sc} , V_{oc} , FF y η), y además de ello, se estudió como les afectan los diferentes mecanismos de recombinación. De esta forma, se contribuyó a comprender mejor el funcionamiento de la estructura VTJ, así como sus posibles limitaciones. Los resultados mostraron que I_{sc} aumentaba de forma lineal con C_{ratio} y que además no estaba afectada por ninguno de los mecanismos de recombinación. Por otro lado, para V_{oc} se obtuvo que esta magnitud aumentaba de forma lineal con el logaritmo de C_{ratio} para todos los casos estudiados. A partir de este estudio se comprobó que para C_{ratio} altas el efecto dominante y que por tanto degrada más la V_{oc} es la recombinación radiativa. En lo que respecta al FF, se vio que éste aumentaba con el logaritmo de C_{ratio} para todos los casos excepto cuando solo está activada la recombinación radiativa y todas las recombinaciones. En este caso el FF aumentaba hasta 1000 y 2000 soles respectivamente, mientras que para concentraciones más altas la tendencia es decreciente debido a las pérdidas por R_s . A pesar de esto, el FF obtenido varía en un rango de ~1% para todos los C_{ratio} investigados. Este resultado es importante, ya que en las actuales células MJ el FF disminuye ~5% para C_{ratio} entre 500 y 1000 soles, y esta magnitud es uno de los principales factores limitantes de los dispositivos actuales para alcanzar altos valores de η a UH C_{ratio} . La pequeña variación del FF en la célula VTJ se debe a la baja R_s , que es $\sim 1.5 \cdot 10^{-3} \Omega \cdot cm^2$, entre una o dos órdenes de magnitud más baja que las células de concentración convencionales. Observando los mecanismos de recombinación, para $C_{ratio} < 1000$ soles, SRH domina, mientras que para $C_{ratio} > 2000$ soles la recombinación radiativa es el principal factor de degradación del FF. Por último, los resultados de η muestran que ésta aumenta con el incremento logarítmico de C_{ratio} para todos los casos, sin que los efectos de recombinación tengan un efecto notable sobre el funcionamiento del dispositivo. Por otro lado, para $C_{ratio} < 100$ soles, SRH y la recombinación radiativa afectan de forma similar a la reducción de η . Para C_{ratio} mayores, el efecto que domina y que por tanto disminuye más η es la recombinación radiativa, mientras que el efecto de SRH se vuelve insignificante.

En este artículo se **concluye** que la recombinación radiativa es la que domina en el dispositivo en los distintos puntos de funcionamiento, V_{OC} , P_{max} e I_{SC} , siendo el mecanismo Auger despreciable. Por otro lado, se observó que la tasa de recombinación disminuye al alejarnos de la superficie en la que está incidiendo la luz solar. Además, el estudio desarrollado en este artículo muestra que el comportamiento de los parámetros eléctricos no está limitado por ninguno de los mecanismos de recombinación. La I_{SC} aumenta de forma lineal con C_{ratio} independientemente de la recombinación y además no está afectada por ninguna de ellas. La V_{OC} también aumenta linealmente con el logaritmo de C_{ratio} , y se halló que los efectos de recombinación le afectan menos a C_{ratio} extremas que a bajas respecto al caso ideal. Por otro lado, los resultados también muestran que para valores mayores de 100 soles el mecanismo de recombinación dominante es el radiativo. Respecto al FF, de los resultados se observa que, para el caso de todas las recombinaciones activadas, éste aumenta con el logaritmo de C_{ratio} hasta 2000 soles y para concentraciones mayores disminuye ligeramente. Por último, se obtuvo que la eficiencia de la VTJ aumenta linealmente con C_{ratio} y que no hay un impacto destacable de los efectos de recombinación sobre ella. Además, se consiguió una η_{record} de 32.2% a 10000 soles, ya que la actual para estructuras convencionales de GaAs se situaba en un 29.3% a 50 soles, un C_{ratio} mucho menor que los investigados en este estudio.

En el artículo número 2 (*“Dependence of the Vertical-Tunnel-Junction GaAs solar cell on concentration and temperature”*) se investigó y se validó el SEM para la célula VTJ de GaAs. Además, se estudiaron las dependencias con la concentración y la temperatura de los parámetros eléctricos del SEM y de los típicos de una célula solar. Por otro lado, también se realizó el estudio de los coeficientes de temperatura de los parámetros típicos en función de C_{ratio} .

Es necesario estudiar y caracterizar el comportamiento de corriente - voltaje de la célula VTJ en función de parámetros como C_{ratio} o la temperatura. Para ello se utilizó el SEM, que relaciona el voltaje y la corriente con cinco parámetros característicos, la corriente fotogenerada (I_{ph}), la corriente de saturación del diodo (I_0), el factor de idealidad del diodo (m), la R_S y la resistencia en paralelo (R_{sh}). Estos cinco parámetros pueden extraerse de las curvas IV que obtenemos directamente del simulador TCAD Silvaco junto con los valores de I_{SC} , V_{OC} , el voltaje máximo (V_{max}) y la corriente máxima (I_{max}). Para calcular los parámetros del SEM existen diferentes métodos y procedimientos, pero en este artículo se usó el método de Phang et al. [33]. Esto se debe a su precisión y sencillez, así como que ha sido usado previamente en células convencionales y células de concentración MJ. A partir de este método se validó el uso del SEM, obteniendo que efectivamente es preciso a la hora de describir las curvas, ya que es capaz de reconstruirlas a partir de sus parámetros característicos con errores inferiores al 1%.

Una vez obtenidos los parámetros del SEM se estudió el impacto de C_{ratio} y la temperatura en los mismos. Para la I_{ph} se observó que su comportamiento aumentaba de forma lineal con C_{ratio} para todas las temperaturas, así como que sus valores crecían ligeramente con el aumento de este parámetro. En el caso de la I_0 , ésta aumenta de forma prácticamente lineal con C_{ratio} y además también se incrementa su valor a medida que la temperatura se hace mayor. Los resultados de m muestran una tendencia similar a la de I_0 , es decir, aumenta al aumentar C_{ratio} y al incrementar la temperatura de estudio. Por último, se observó que R_S y R_{sh} disminuyen de forma exponencial al aumentar C_{ratio} . También, se observó que ambos disminuyen su valor cuando la temperatura se incrementa. Cabe destacar en este punto que las R_S obtenidas son entre una y tres órdenes de magnitud más pequeñas que las R_S de las arquitecturas convencionales de células solares.

Por otro lado, se estudió la dependencia de los parámetros eléctricos más importantes de una célula solar con C_{ratio} y la temperatura. En el caso de I_{SC} se observa que sigue la misma tendencia que I_{ph} , es decir, aumenta linealmente con C_{ratio} , así como también aumenta ligeramente al incrementar la temperatura. Por otro lado, se observó que V_{OC} crecía con el logaritmo de C_{ratio} y que el impacto de la temperatura la disminuía. En lo que respecta al FF, se vio que aumentaba hasta una concentración de 2000 soles y que decrecía ligeramente (~1%) para C_{ratio} más altas debido a las pérdidas por R_S . Por otro lado, se halló que al aumentar la temperatura el FF disminuía. Por último, se observó el impacto de C_{ratio} en η , obteniéndose que ésta aumentaba con el incremento logarítmico de C_{ratio} hasta un máximo de 32.30% a 10000 soles. Estos resultados indican que η no está limitada por las pérdidas de la R_S a UHC_{ratio} , al contrario que las células convencionales MJ. Por otro lado, también se observó que η disminuía a medida que la temperatura aumentaba, debido principalmente a la disminución de V_{OC} .

Por último, se calculó cómo variaban los coeficientes de temperatura de V_{OC} , FF y η con C_{ratio} . Para el coeficiente de temperatura de V_{OC} se encontró que disminuía linealmente en valor absoluto con el incremento logarítmico de C_{ratio} . Por otro lado, se encontró que el coeficiente de temperatura del FF tendía a decrecer, también en valor absoluto, con C_{ratio} hasta 2000 soles, pero para C_{ratio}

mayores aumentaba. Por último, se encontró que el coeficiente de temperatura de la η también tendía a disminuir, en valor absoluto, con C_{ratio} , mostrando un comportamiento parecido al de V_{OC} .

En este artículo se **concluye** que el SEM combinado con el método de Phang et al. [33] es apropiado para predecir y evaluar el funcionamiento de la célula VTJ, ya que este modelo nos da aproximadamente los mismos resultados para los puntos característicos de la curva IV que los obtenidos por TCAD Silvaco. Además, los errores calculados fueron menores al 1% para todos los casos. Respecto a los parámetros del SEM se ha obtenido que la I_{ph} , I_0 y m aumentan con C_{ratio} y la temperatura, mientras que R_s y R_{sh} disminuyen de forma exponencial al incrementar C_{ratio} , así como también decrecen con la temperatura. Por otro lado, dentro de los parámetros eléctricos más importantes de una célula solar, se encontró que la I_{SC} aumenta con C_{ratio} y la temperatura. Sin embargo, V_{OC} aumenta solamente con C_{ratio} , ya que al incrementar la temperatura su valor disminuye. En lo que respecta al FF, se encontró que crecía con C_{ratio} hasta un valor de 2000 soles y para valores de concentración mayores disminuía ligeramente debido a las pérdidas por R_s . Por otro lado, se observó que η no estaba limitada por las pérdidas de R_s y que además tendía a aumentar con C_{ratio} hasta un valor máximo de 32.30% a 10000 soles. Por último, se obtuvo que el coeficiente de temperatura para V_{OC} disminuía en valor absoluto con C_{ratio} . Sin embargo, el del FF sigue un comportamiento similar al del propio parámetro, y además es un orden de magnitud más pequeño que el coeficiente de temperatura de V_{OC} . Por otro lado, para el coeficiente de temperatura de η se obtiene que disminuye en valor absoluto con C_{ratio} .

5.2.4 Objetivo nº 4: Diseño y evaluación de nuevas estructuras de convertidores láser mediante herramientas TCAD para sistemas HPLT.

Artículo nº 3: “GaAs Vertical-Tunnel-Junction Converter for Ultra-High Laser Power Transfer”

El objetivo número 4, “Diseño y evaluación de nuevas estructuras de convertidores láser mediante herramientas TCAD para sistemas HPLT”, se llevó a cabo en el artículo 3 citado en la tabla anterior.

En el artículo 3 (“*GaAs Vertical-Tunnel-Junction converter for ultra-high laser power transfer*”) se hizo un análisis del estado del arte sobre los materiales y las estructuras para PCs en sistemas HPLT. Según el análisis realizado, se encontró que la mayor parte de PCs son de GaAs, aunque también los hay de Si. El uso de estos materiales está extendido debido a que son materiales que se han estudiado anteriormente en profundidad y por tanto se conocen bastante bien sus propiedades. Además de ello, tienen los récords de eficiencia de células fotovoltaicas de unión simple bajo diferentes condiciones de iluminación. Por otro lado, durante este análisis se encontró que principalmente los PCs están basados en estructuras horizontales, cuya limitación radica en que la η disminuye fuertemente a P_{in} altas bajo condiciones de operación reales. Esta limitación viene impuesta debido a las pérdidas por R_s , que son inevitables, y las altas densidades de corriente de estos diseños bajo UH P_{in} . Durante el análisis del estado del arte de PCs se encontró que para resolver estas limitaciones, York et al. [34] propusieron una estructura en la que se apilaban verticalmente varias uniones PN, que a su vez, estaban conectadas en serie. Esta estructura reducía las densidades de corriente y aumentaba el voltaje de operación, logrando así una η_{record} de 66% a una P_{in} de 64.4 W·cm⁻². Sin embargo, este diseño, al igual que los PCs convencionales, tiene los contactos eléctricos en la parte superior e inferior de la estructura, lo que implica una relación entre el sombreado en la parte superior de la estructura y la R_s , limitando así la eficiencia a UH P_{in} . Es en este punto donde se introduce la estructura basada en la célula solar VTJ previamente estudiada para UHCPV. De esta forma se disminuyen las pérdidas por R_s gracias a la reducción de la densidad de corriente colocando los contactos metálicos de forma perpendicular a la luz que incide en el dispositivo. Además, se obtienen PCs con altos niveles de voltaje debido a la conexión vertical de múltiples subcélulas.

Por otro lado, en este trabajo también se realizan las optimizaciones de los PCs basados en la estructura VTJ de célula solar. Para ello, se lleva a cabo una optimización de un PC a 10 W·cm⁻² (PC1) y otra a 3000 W·cm⁻² (PC2) con el objetivo de maximizar η . Para realizar las optimizaciones, se fijaron el ancho y dopado de las capas P⁺ y N⁺ de la estructura VTJ, y se optimizaron la longitud de onda del haz incidente, la anchura y dopado de las capas P y N, así como la altura del dispositivo. El proceso de optimización es un proceso iterativo en el que se varían los valores de las magnitudes que se quieren optimizar hasta que se encuentra el valor que maximiza η . Una vez encontrado el valor óptimo para una magnitud, ésta se fija mientras que las restantes siguen el procedimiento de optimización hasta que cada una de ellas encuentre su valor óptimo, maximizando siempre el valor de η . De las optimizaciones realizadas en este artículo se obtuvo una η_{max} de 69.5% y de 76.3% para el PC1 y PC2 respectivamente. Además de ello, se calcularon las curvas IV para el PC2 a diferentes P_{in} observando que tanto I_{sc} , como V_{oc} y P_{max} aumentaban con P_{in} .

Finalmente, en este artículo se realizó un pequeño análisis de cómo afecta la P_{in} al funcionamiento de las dos estructuras de convertidores de potencia VTJ propuestas. En primer lugar, lo que se hizo fue estudiar la tendencia que seguía η en función de P_{in} . Para el PC1 se observó que esta magnitud aumentaba con P_{in} hasta un valor de 100 W·cm⁻² alcanzando una η_{max} de 71.7%, y disminuyendo para valores mayores de P_{in} . Por otro lado, el PC2 sigue un aumento lineal de η con el logaritmo de P_{in} para el intervalo estudiado, llegando a alcanzar una η_{record} de 76.3% a 3000 W·cm⁻². Tanto el PC1 como el PC2 mejoran significativamente los valores de η de la literatura para todas las P_{in} estudiadas, de hecho, superan el récord actual, cuyo valor es de 66.0% a 64.4 W·cm⁻², en un 5.3% y un 4.6% para el PC1 y PC2 respectivamente a esa P_{in} . Estos valores tan altos de η se deben a la baja R_s que presenta la estructura VTJ, que es al menos dos o tres órdenes de magnitud inferior a las de la literatura. Las R_s obtenidas para el PC1 y PC2 son 4.1·10⁻⁵ Ω·cm² y 7.2·10⁻⁵ Ω·cm² respectivamente. Por otro lado, se estudió la dependencia de V_{oc} y el FF con la P_{in} para los dos PCs. Para el caso de

V_{oc} se observó que éste aumentaba linealmente con el logaritmo de P_{in} tanto para el PC1 como para el PC2 sin ningún tipo de degradación. Respecto al FF, en el caso del PC1, se obtiene que disminuye en todo el rango de P_{in} estudiado, debido a un bajo valor de R_{sh} ($2.5 \cdot 10^{-2} \Omega \cdot cm^2$ a $3000 W \cdot cm^{-2}$). La baja R_{sh} se debe a la gran contribución de la recombinación radiativa en esta estructura, que reduce η un 22.1% respecto al caso ideal, que es cuando ningún mecanismo de recombinación está activado. Sin embargo, el PC2 mantiene valores altos de FF en todo el rango estudiado de P_{in} debido a que las recombinaciones son muy pequeñas y solo reducen η un 3.3% respecto al caso ideal.

En este artículo se **concluye** la necesidad de introducir nuevas estructuras para los PCs que sean capaces de reducir las limitaciones de las arquitecturas convencionales como las pérdidas por R_s y el sombreado que producen los contactos metálicos situados en la parte superior de los dispositivos, y que por tanto se puedan alcanzar picos de η a UH P_{in} . Por otro lado, también es muy importante optimizar la estructura de los dispositivos para mejorar el funcionamiento para una P_{in} particular. Por último, se puede concluir que la estructura VTJ puede utilizarse como PC, ya que muestra eficiencias que aumentan con el valor de P_{in} , llegando a alcanzar valores del 76.3% a $3000 W \cdot cm^{-2}$. Este diseño mejora el récord actual de η (66.0% a $64.4 W \cdot cm^{-2}$) en más de un 10% para una P_{in} un orden de magnitud mayor. Esto permitiría una nueva generación de PCs capaces de obtener mayores η para niveles UH de P_{in} . Además, esta estructura reduce las R_s de las arquitecturas convencionales en al menos dos o tres órdenes de magnitud.

5.3 Otras publicaciones relacionadas con la Tesis

5.3.1 Publicaciones de congresos

En la siguiente tabla se muestra la relación de publicaciones de los diferentes congresos internacionales en los que se ha participado durante la Tesis:

Congreso	Título
CPV-15	"High – efficiency vertical –tunnel –junction (VTJ) solar cells up to 10000 suns"
CPV-16	"Impact of recombination effects in a high – efficiency vertical – tunnel – junction (VTJ) solar cells up to 10000 suns"
CPV-17	"Investigation of the Vertical – Tunnel – Junction (VTJ) GaAs Solar Cell by Using the Single Exponential Model (SEM)"
CPV-18	"GaAs Vertical – Tunnel – Junction Power Converter for Ultra – High Light Intensities"
CDE-19	"Simulation of high – efficiency GaAs vertical solar cells up to 20000 light concentration levels" "Study of GaAs vertical solar cells at high concentration levels" (Proceeding)
CDE-21	"Effects in a Vertical – Tunnel – Junction GaAs Solar Cell"
CIES-2022	"Mecanismos de recombinación en el convertidor de potencia Vertical – Tunnel – Junction (VTJ) de GaAs para ultra – altas intensidades de iluminación"

Durante el proceso de realización de esta Tesis se participó en diferentes congresos de carácter internacional como el *Conference on Concentrator Photovoltaic Systems* (CPV-X), el *Spanish Conference on Electron Devices* (CDE-X) o el Congreso Ibérico y Congreso Iberoamericano de Energía Solar (CIES-X).

Para el congreso *Conference on Concentrator Photovoltaic Systems* se presentaron trabajos en cuatro ediciones diferentes, siendo el primero en la edición CPV-15. En dicha ocasión, se presentó un trabajo titulado "*High-efficiency vertical-tunnel-junction (VTJ) solar cells up to 10000 suns*". En este estudio se introduce la célula VTJ junto con las ventajas de utilizar esta arquitectura respecto a las convencionales, así como los resultados obtenidos de las principales magnitudes que caracterizan la célula solar, alcanzando una η superior al 30%. En la edición posterior (CPV-16), se envió una contribución en forma de *abstract* titulada "*Impact of recombination effects in a high-efficiency vertical-tunnel-junction (VTJ) solar cells up to 10000 suns*". En este trabajo se presentaron las limitaciones que los efectos de recombinación (Auger, SRH y la recombinación radiativa) pueden introducir en la célula solar VTJ iluminada a 4000 soles de concentración. Para ello, se realizaron cortes a lo largo del ancho de la célula y a dos alturas diferentes (3 y 12 μm) respecto a la superficie a la que incide la luz solar. Los resultados de este trabajo mostraron que el mecanismo que domina es la recombinación radiativa mientras que Auger es la menos significativa. Además de ello, también se estudió como afectan las recombinaciones a η en función de C_{ratio} , mostrando que ésta aumenta con el logaritmo de C_{ratio} alcanzando valores superiores al 30% para 10000 soles. En la siguiente edición (CPV-17), se envió una contribución en forma de *abstract* y que posteriormente fue presentada como póster titulada "*Investigation of the Vertical-Tunnel-Junction (VTJ) GaAs Solar Cell by Using the Single Exponential Model (SEM)*". Este trabajo se centró en el estudio del SEM mediante el método de Phang et al. [33] aplicado a la célula solar VTJ. Para ello, se observó cómo varían los parámetros del SEM en función de C_{ratio} , encontrando que la I_{ph} e I_0 aumentan de forma lineal. Por otro lado, m aumenta de forma prácticamente lineal con C_{ratio} , mientras que R_s y R_{sh} disminuyen de forma exponencial. Otro resultado hallado es que las tendencias de los parámetros SEM con C_{ratio} para la VTJ son las mismas que las de las células solares MJ convencionales. Por último, en la siguiente edición (CPV-18), y última realizada hasta la fecha, se envió una contribución en forma de *abstract* que ha sido presentada como póster bajo el título de "*GaAs Vertical – Tunnel – Junction Power Converter for Ultra – High Light Intensities*". En este trabajo se presenta la célula solar VTJ como un PC para UHP_{in} . Para ello, se realizó una optimización del PC a $3000 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, obteniendo

una η de 76.3%. Por otro lado, también se llevó a cabo un estudio para observar la variación de η con P_{in} desde 1 hasta 3000 $W \cdot cm^{-2}$. Además, se compararon los resultados obtenidos con resultados simulados y teóricos disponibles en trabajos de la literatura. De este estudio se observó que la η del PC basado en VTJ aumentaba linealmente con el logaritmo de P_{in} . Además, esta arquitectura mejoraba el récord de η de la literatura (66.0% a 64.4 $W \cdot cm^{-2}$) en un 4.6% a pesar de no estar optimizado a esa P_{in} . Por otro lado, también se puede ver que a 3000 $W \cdot cm^{-2}$ se alcanzó un valor de η mucho mayor que el 48.5% que se obtuvo experimentalmente en la literatura. Estos resultados se deben a la baja R_s que tiene el PC basado en VTJ, ya que su valor es al menos dos o tres órdenes de magnitud menor en comparación con la R_s de los PCs de la literatura, resultados que también se muestran en la contribución al congreso.

Para el congreso *Spanish Conference on Electron Devices* se presentaron trabajos en dos ediciones diferentes, siendo la primera el CDE-19. En esta ocasión se contribuyó con un *abstract* titulado “*Simulation of high – efficiency GaAs vertical solar cells up to 20000 light concentration levels*”, que ha sido publicado en el libro de *abstracts* del mismo congreso. En este trabajo se introduce una célula vertical basada en GaAs, así como el estudio de las curvas características densidad de corriente – voltaje (JV) y la de potencia frente a voltaje para un C_{ratio} de 1 sol, obteniendo una potencia máxima de 7.3 $mW \cdot cm^{-2}$. Por otro lado, también se observó la tendencia que seguían V_{oc} y η al variar C_{ratio} desde 5000 a 20000 soles, encontrando que ambas aumentaban con el logaritmo de C_{ratio} y obteniendo un pico de η de 23.6% a 15000 soles. En esta edición, además de presentar el *abstract* anteriormente mencionado, también se ha realizado una contribución más extensa (*proceeding*) titulada “*Study of GaAs vertical solar cells at high concentration levels*” y que ha sido publicada en la *IEEE Digital Library*. En este trabajo se presenta la célula solar vertical de GaAs anteriormente mencionada y su posterior estudio. En primer lugar, se calculó la curva JV así como la curva de la potencia en función del voltaje. Se obtuvo una densidad de corriente de cortocircuito (J_{sc}) de 8.604 $mA \cdot cm^{-2}$, V_{oc} de 0.965 V y una P_{max} de 7.3 $mW \cdot cm^{-2}$. Por otro lado, también se observaron las tendencias de V_{oc} y η con C_{ratio} , hallando que ambas magnitudes aumentaban con el logaritmo de C_{ratio} , y llegando alcanzar una η_{max} de 23.247% a 10000 soles. La siguiente edición de este congreso en la que se presentó un trabajo fue el CDE-21, enviando un *abstract* que posteriormente fue aceptado y presentado como póster en el congreso, que se celebró de forma online, titulado “*Study of Recombination Effects in a Vertical – Tunnel - Junction GaAs Solar Cell*”. En este trabajo se realiza un estudio sobre los efectos de recombinación en la célula solar VTJ a 100 y 10000 soles, encontrando que a 100 soles el mecanismo dominante en las capas P es la recombinación radiativa, mientras que en las capas N es SRH. Para el caso a 10000 soles se halló que la recombinación radiativa domina tanto para las capas P como para las N. También se encontró que la influencia de la recombinación Auger era la menos importante a ambos C_{ratio} . Por otro lado, se calcularon las curvas IV para los casos de todas las recombinaciones activadas, ninguna recombinación activada (caso ideal) y para cada una de las recombinaciones a 100 y 10000 soles. Los resultados muestran que I_{sc} es prácticamente constante, independientemente del mecanismo de recombinación considerado, tanto para bajas como para UHC $_{ratio}$. Además, también se puede ver que Auger y SRH no afectan a la curva IV característica, mientras que la recombinación radiativa disminuye V_{oc} para las dos C_{ratio} estudiadas. Por otro lado, también se muestra que I_{sc} , V_{oc} y η aumentan con C_{ratio} , siendo η a 10000 soles un 3.3% mayor que a 100. Por último, se realizó una comparación de η a 100 y 10000 soles para los casos de todas las recombinaciones, ninguna recombinación y para cada una de ellas, concluyendo que en todos los escenarios aumenta al menos un 3% con C_{ratio} y que no está limitada por ninguno de los mecanismos considerados. Además, esta comparación también muestra que la recombinación radiativa es la que más afecta a η a UHC $_{ratio}$.

Por último, se envió al XVIII Congreso Ibérico y XIV Congreso Iberoamericano de Energía Solar (CIES-2022) un *abstract* titulado “*Mecanismos de recombinación en el convertidor de potencia Vertical – Tunnel – Junction (VTJ) de GaAs para ultra – altas intensidades de iluminación*”. En este trabajo se presentó un estudio de los efectos de recombinación en el PC de GaAs basado en VTJ. Para ello se consideraron las recombinaciones Auger, SRH y radiativa, así como también los casos donde ninguno de los mecanismos está activado y el caso en el que todos lo están. Los resultados mostraron que se obtiene una η de 76.3% a 3000 $W \cdot cm^{-2}$ cuando se tienen en cuenta todas las recombinaciones. Por otro lado, también se halló que la recombinación radiativa dominaba en todo el rango de P_{in} estudiado, reduciendo η un 2.9% a 3000 $W \cdot cm^{-2}$ respecto al caso en que no se considera ninguna recombinación.

6. Conclusiones y trabajo futuro

Esta Tesis Doctoral es una contribución al desarrollo de nuevas arquitecturas de células solares y de la energía de concentración fotovoltaica (CPV), más en concreto a la ultra-alta concentración fotovoltaica (UHCPV). En primer lugar, se analizó el estado actual de células solares verticales, materiales utilizados, fundamentos, su funcionamiento, ventajas y limitaciones a través del estudio de los parámetros característicos. Además, también se contribuye con una detallada y relevante información sobre el estado de la tecnología CPV y UHCPV y los beneficios que pueden aportar a ésta las nuevas arquitecturas desarrolladas. Complementariamente a las células verticales también se hizo un análisis de la tecnología CPV y UHCPV actual.

Por otro lado, en esta Tesis también se contribuye con importantes aportaciones al desarrollo de nuevas arquitecturas de convertidores de potencia (PCs) para ultra – altas potencias incidentes (UHP_{in}). En el desarrollo de la misma se proporciona información sobre el actual estado de los PCs, las estructuras y materiales utilizados hasta la actualidad, así como su funcionamiento, ventajas y limitaciones que se pueden obtener a partir de los parámetros característicos.

Las principales conclusiones obtenidas en relación con cada uno de los objetivos de la Tesis son las siguientes:

Conclusiones del objetivo 1:

- La célula solar Vertical-Tunnel-Junction (VTJ) de arseniuro de galio (GaAs) es la estructura más prometedora para ultra - alta concentración fotovoltaica (UHCPV). Esta célula consiste en la unión de dos subcélulas idénticas compuestas por cuatro capas mediante una unión túnel (TJ) y con los contactos eléctricos colocados en los laterales de la estructura.
- Para conocer todo su potencial es necesario estudiar la estructura en profundidad, proponiendo mejoras y observando su comportamiento a niveles UH de concentración solar.

Conclusiones del objetivo 2:

- Es importante realizar una optimización detallada de las estructuras VTJ para poder mejorar su funcionamiento y eficiencia (η).
- Se logró mejorar la η (~4%) de diseños previos basados en GaAs desarrollando una mejor optimización.

Conclusiones del objetivo 3:

- Se observó que la recombinación radiativa es el mecanismo dominante en el dispositivo para los tres puntos de la curva: V_{OC} , P_{max} e I_{sc} .
- Se halló que las tasas de recombinación disminuyen según nos alejamos de la superficie en la que está incidiendo la luz solar.
- Los resultados mostraron que ninguno de los parámetros clave de una célula solar están afectados por los mecanismos de recombinación.
- Se obtuvo que I_{sc} aumenta con C_{ratio} independientemente del mecanismo de recombinación considerado sin verse afectada por ninguno de ellos. V_{OC} también se incrementa linealmente con el logaritmo de C_{ratio} , resultando más afectado por los mecanismos de recombinación a bajas concentraciones que a altas. Por otro lado, se encontró que el Fill Factor (FF) aumentaba hasta el 88.53% a una concentración de 2000 soles y luego disminuía con el logaritmo de C_{ratio} para el caso en el que todas las recombinaciones están activadas.
- Los resultados muestran que η aumenta de forma lineal con C_{ratio} hasta un valor récord de 32.2% a 10000 soles, mejorando el actual récord de 29.3% a 50 soles para estructuras convencionales de GaAs y sin verse afectada por ninguno de los mecanismos de recombinación.

- Se validó la estructura VTJ mediante el modelo de una sola exponencial (Single Exponential Model (SEM)) combinado con el método de Phang et al., obteniendo que el SEM es apropiado para predecir y evaluar el funcionamiento de la VTJ con errores inferiores al 1%.
- El análisis de los parámetros SEM muestra que la corriente fotogenerada (I_{ph}), la de saturación (I_0) y el factor de idealidad del diodo (m) aumentan con C_{ratio} y la temperatura, mientras que la resistencia en serie (R_s) y la resistencia en paralelo (R_{sh}) disminuyen de forma exponencial con C_{ratio} y la temperatura.
- El estudio de los coeficientes de temperatura mostró que el coeficiente de V_{OC} disminuye en valor absoluto con C_{ratio} , mientras que el del FF aumenta en valor absoluto a partir de 2000 soles.
- Los resultados mostraron que η aumenta con C_{ratio} , alcanzando un valor máximo de 32.30% a 10000 soles sin estar limitada por las pérdidas de R_s . Por otro lado, se encontró que el coeficiente de temperatura de η disminuía en valor absoluto con C_{ratio} .

Conclusiones del objetivo 4:

- Se propone el uso de la célula VTJ de arseniuro de galio (GaAs) como convertidor de potencia (power converter (PC)) para ultra-altas potencias incidentes (UHP_{in}), reduciendo las limitaciones de las arquitecturas convencionales como las pérdidas por R_s y el sombreado de los contactos metálicos situados en la parte superior de los dispositivos, alcanzando así picos de η a UHP_{in} .
- Se observa la importancia de optimizar la estructura de los dispositivos para mejorar el funcionamiento para una P_{in} en particular.
- Se obtuvieron eficiencias que aumentan con P_{in} , alcanzando valores del 76.3% a $3000 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$, por lo que se demostró que la estructura VTJ puede usarse como PC. Se observó que el diseño VTJ para PC mejoraba la actual η_{record} de 66.0% a $64.4 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$ en más de un 10% para una P_{in} un orden de magnitud mayor. Lo que permite una nueva generación de PCs capaces de obtener η mayores para niveles de UHP_{in} ,
- Se encontró que la R_s de los PCs basados en VTJ es al menos dos o tres órdenes de magnitud menor que los de la literatura.

Los futuros trabajos que se podrían desarrollar como resultado de esta Tesis podrían ser los siguientes:

- La aplicación del SEM para investigar el funcionamiento de la célula solar VTJ bajo parámetros atmosféricos exteriores cambiantes con el tiempo, considerando diferentes tipos de óptica de concentración y estrategias de enfriamiento para diferentes localizaciones.
- La investigación de estructuras VTJ para UHCPV de materiales semiconductores distintos al GaAs, así como estructuras VTJ multibandgap, con el objetivo de lograr una mejor absorción del espectro.
- La posible fabricación de células solares VTJ reales y el estudio de su funcionamiento bajo condiciones reales de operación. También se pretende comparar los resultados experimentales con los obtenidos mediante herramientas de TCAD para estudiar la validez de esta herramienta.
- La realización de un estudio más profundo de los PCs basados en VTJ para estudiar el efecto de las distintas condiciones, tanto de concentración como de temperatura, a los parámetros eléctricos más importantes.
- La aplicación del SEM para una posible validación de este modelo a una estructura de PC basado en medidas experimentales.
- La realización de un estudio y búsqueda de distintos materiales a los encontrados en la literatura para el desarrollo de una arquitectura de PC capaz de obtener picos de η a UHP_{in} , evitando así la posible atenuación de algunos elementos que componen la atmósfera como el agua.

7. Referencias

- [1] World Health Organization. Occupational and Environmental Health Team, "WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: global update 2005: summary of risk assessment," 2006.
- [2] R. K. Pachouri and L. A. Meyer, "IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change," Geneva, Switzerland, 2014.
- [3] I. Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems, "Photovoltaics Report," Freiburg, 2022.
- [4] E. F. Fernández, D. L. Talavera, F. M. Almonacid, and G. P. Smestad, "Investigating the impact of weather variables on the energy yield and cost of energy of grid-connected solar concentrator systems," *Energy*, vol. 106, pp. 790–801, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.03.060.
- [5] E. F. Fernández, F. Almonacid, and A. J. Garcia-Loureiro, "Multi-junction solar cells electrical characterization by neuronal networks under different irradiance, spectrum and cell temperature," *Energy*, vol. 90, pp. 846–856, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.07.123.
- [6] H. G. Kamath, N. J. Ekins-Daukes, K. Araki, and S. K. Ramasesha, "The potential for concentrator photovoltaics: A feasibility study in India," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 27, no. 4, pp. 316–327, Apr. 2019, doi: 10.1002/pip.3099.
- [7] P. Pérez-higueras and E. F. F. Editors, *Concentrator Photovoltaics*, vol. 130. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007.
- [8] J. F. Geisz *et al.*, "Six-junction III–V solar cells with 47.1% conversion efficiency under 143 Suns concentration," *Nat. Energy*, vol. 5, no. 4, pp. 326–335, 2020, doi: 10.1038/s41560-020-0598-5.
- [9] M. Theristis and T. S. O'Donovan, "Electrical-thermal analysis of III–V triple-junction solar cells under variable spectra and ambient temperatures," *Sol. Energy*, vol. 118, pp. 533–546, Aug. 2015, doi: 10.1016/j.solener.2015.06.003.
- [10] H. Cotal *et al.*, "III–V multijunction solar cells for concentrating photovoltaics," *Energy Environ. Sci.*, vol. 2, no. 2, pp. 174–192, 2009, doi: 10.1039/B809257E.
- [11] P. Pérez-Higueras, J. P. Ferrer-Rodríguez, F. Almonacid, and E. F. Fernández, "Efficiency and acceptance angle of High Concentrator Photovoltaic modules: Current status and indoor measurements," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 94, no. May, pp. 143–153, 2018, doi: 10.1016/j.rser.2018.06.011.
- [12] S. A. Kalougirou, *McEvoy's Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications*, Third Edit. Elsevier, 2018.
- [13] M. A. Green, E. D. Dunlop, J. Hohl-Ebinger, M. Yoshita, N. Kopidakis, and X. Hao, "Solar cell efficiency tables (Version 58)," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 29, no. 7, pp. 657–667, Jul. 2021, doi: 10.1002/pip.3444.
- [14] A. Gover and P. Stella, "Vertical Multijunction Solar-Cell One-Dimensional Analysis," *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 21, no. 6, pp. 351–356, 1974, doi: 10.1109/T-ED.1974.17927.
- [15] R. Pozner, G. Segev, S. Rona, K. Abraham, and Y. Rosenwaks, "Vertical junction Si cells for concentrating photovoltaics," *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 20, pp. 197–208, 2012.
- [16] Y. Xing *et al.*, "Performance analysis of vertical multi-junction solar cell with front surface diffusion for high concentration," *Sol. Energy*, vol. 94, pp. 8–18, Aug. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2013.04.030.
- [17] G. Segev and A. Kribus, "Performance of CPV modules based on vertical multi-junction cells under non-uniform illumination," *Sol. Energy*, vol. 88, pp. 120–128, Feb. 2013, doi: 10.1016/j.solener.2012.11.020.
- [18] B. L. Sater and N. D. Sater, "High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities," in *Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2002, doi: 10.1109/pvsc.2002.1190778.
- [19] Y. Xing *et al.*, "A review of concentrator silicon solar cells," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, doi: 10.1016/j.rser.2015.07.035.
- [20] B. L. Sater and N. D. Sater, "High voltage silicon VMJ solar cells for up to 1000 suns intensities," *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.*, pp. 1019–1022, 2002, doi:

- 10.1109/pvsc.2002.1190778.
- [21] A. Braun, A. Vossier, E. A. Katz, N. J. Ekins-Daukes, and J. M. Gordon, "Multiple-bandgap vertical-junction architectures for ultra-efficient concentrator solar cells," *Energy Environ. Sci.*, vol. 5, no. 9, pp. 8523–8527, Sep. 2012, doi: 10.1039/c2ee22167e.
- [22] E. F. Fernandez, N. Seoane, F. Almonacid, and A. J. Garcia-Loureiro, "Vertical-tunnel-junction (VTJ) solar cell for ultra-high light concentrations (>2000 Suns)," *IEEE Electron Device Lett.*, vol. 40, no. 1, pp. 44–47, 2019, doi: 10.1109/LED.2018.2880240.
- [23] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless Charging Technologies: Fundamentals, Standards, and Network Applications," *IEEE Commun. Surv. Tutorials*, vol. 18, no. 2, pp. 1413–1452, 2016, doi: 10.1109/COMST.2015.2499783.
- [24] K. Jin and W. Zhou, "Wireless Laser Power Transmission: A Review of Recent Progress," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 34, no. 4, pp. 3842–3859, Apr. 2019, doi: 10.1109/TPEL.2018.2853156.
- [25] S. Y. R. Hui, W. Zhong, and C. K. Lee, "A Critical Review of Recent Progress in Mid-Range Wireless Power Transfer," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 29, no. 9, pp. 4500–4511, Sep. 2014, doi: 10.1109/TPEL.2013.2249670.
- [26] N. Kawashima, K. Takeda, H. Matsuoka, Y. Fujii, and M. Yamamoto, "Laser energy transmission of a wireless energy supply to robots," ISARC, 2005.
- [27] T. Blackwell, "Recent demonstrations of Laser power beaming at DFRC and MSFC," in *AIP Conference Proceedings*, 2005, vol. 766, pp. 73–85, doi: 10.1063/1.1925133.
- [28] F. V. B. de Nazare and M. M. Werneck, "Hybrid Optoelectronic Sensor for Current and Temperature Monitoring in Overhead Transmission Lines," *IEEE Sens. J.*, vol. 12, no. 5, pp. 1193–1194, May 2012, doi: 10.1109/JSEN.2011.2163709.
- [29] K. Worms *et al.*, "Reliable and lightning-safe monitoring of wind turbine rotor blades using optically powered sensors," *Wind Energy*, vol. 20, no. 2, pp. 345–360, Feb. 2017, doi: 10.1002/we.2009.
- [30] Dele Shi, Longlong Zhang, Haihong Ma, Zhen Wang, Yixian Wang, and Zhanguo Cui, "Research on Wireless Power transmission system between satellites," in *2016 IEEE Wireless Power Transfer Conference (WPTC)*, 2016, pp. 1–4, doi: 10.1109/WPT.2016.7498851.
- [31] A. N. Panchak, P. V. Pokrovskiy, D. A. Malevskiy, V. R. Larionov, and M. Z. Shvarts, "High-Efficiency Conversion of High-Power-Density Laser Radiation," *Tech. Phys. Lett.*, vol. 45, no. 1, pp. 24–26, 2019, doi: 10.1134/S1063785019010310.
- [32] Y. Zhao, Y. Sun, Y. He, S. Yu, and J. Dong, "Design and fabrication of six-volt vertically-stacked GaAs photovoltaic power converter," *Sci. Rep.*, vol. 6, no. November, pp. 1–9, 2016, doi: 10.1038/srep38044.
- [33] J. C. H. Phang, D. S. H. Chan, and J. R. Phillips, "Accurate analytical method for the extraction of solar cell model parameters," *Electron. Lett.*, 1984, doi: 10.1049/el:19840281.
- [34] M. C. A. York, A. Mailhot, A. Boucherif, R. Arès, V. Aimez, and S. Fafard, "Challenges and strategies for implementing the vertical epitaxial heterostructure architecture (VEHSA) design for concentrated photovoltaic applications," *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*, vol. 181, no. August 2017, pp. 46–52, 2018, doi: 10.1016/j.solmat.2017.11.034.

8. Copias de las publicaciones JCR

Referencia:

C. Outes, E. F. Fernández, N. Seoane, F. Almonacid, and A. J. García-Loureiro, "Numerical optimisation and recombination effects on the vertical-tunnel-junction (VTJ) GaAs solar cell up to 10,000 suns," *Sol. Energy*, vol. 203, pp. 136–144, Jun. 2020.

Resumen:

Ultra-high concentrator photovoltaic systems (UHCPV), usually referred to CPV systems exceeding 1000 suns, are signalled as one of the most promising research avenues to produce a new generation of high-efficiency and low-cost CPV systems. However, the structure of current concentrator solar cells prevents their development due to the unavoidable series resistance losses at such elevated concentration ratios. In this work, we investigate the performance of the so-called vertical-tunnel junction (VTJ), recently introduced by the authors, by using advance TCAD. In particular, we carry out an optimisation procedure of the key parameters that affect its performance and conduct a deep investigation of the impact of the main recombination mechanisms and of sun concentration up to 10,000 suns. The results indicate that the performance of the novel structure is not significantly affected by these two factors. A record efficiency of 32.2% at 10,000 suns has been found. This represents a promising way to obtain state-of-the-art efficiencies above 30% for single-band-gap cells, and offers a new route towards the development of competitive CPV systems operating at ultra-high concentration fluxes.

DOI:

10.1016/j.solener.2020.04.029

Referencia:

Outes, C., Fernández, E.F., Seoane, N., Almonacid, F., García-Loureiro, A.J.: Dependence of the vertical-tunnel-junction GaAs solar cell on concentration and temperature. *IET Renew. Power Gener.* 16, 1577– 1588 (2022).

Resumen:

Modelling the current–voltage (I–V) characteristics of photovoltaic (PV) devices is important for understanding their behaviour and potential. Typically, the single exponential model (SEM) is used because of its simplicity and accuracy. In this work, we validate the SEM for a gallium arsenide (GaAs) vertical-tunnel-junction (VTJ) using TCAD software. This cell is the key to overcoming the series resistance limitations of current concentrator solar cells, which can lead to the development of ultra-high concentrator photovoltaic systems (UHCPV) with concentrations (C_{ratio}) greater than 1000 suns. The results indicate that the SEM is a suitable tool to model the I–V characteristics of the VTJ cell with mean errors lower than 1%. Moreover, the solar cell did not show any limitations regarding the C_{ratio} and temperatures under investigation. In addition, the analysis of the temperature coefficients of the cell demonstrates that their dependency on temperature reduces as C_{ratio} increases. The results of this work suggest that VTJ is a promising solution to produce a new generation of high efficiency and low-cost UHCPV systems.

DOI:

10.1049/rpg2.12456

Referencia:

C. Outes, E. F. Fernández, N. Seoane, F. Almonacid and A. J. García-Loureiro, "GaAs Vertical-Tunnel-Junction Converter for Ultra-High Laser Power Transfer," in *IEEE Electron Device Letters*, vol. 42, no. 12, pp. 1882-1885, Dec. 2021.

Resumen:

High power laser transmission is being intensively researched as a potential solution to transfer power to remote systems, being the power converter (PC) one of the main limiting factor to improve the system efficiency (η). Current PCs are mostly horizontal structures in which the η heavily decreases at large input power. In this work, we propose a novel GaAs-based vertical-tunnel-junction (VTJ) PC suitable for ultra-high (UH) input power density (P_{in}). This structure does not suffer from η degradation at high P_{in} because it is designed to have low current density, high output voltage and reduced series resistance (~ 2 orders of magnitude lower than the state-of-the art PCs). We have demonstrated increasing η with P_{in} , reaching values higher than 76% at $3000 \text{ W}\cdot\text{cm}^{-2}$. This vertical-based architecture enables a new set of potential applications for wireless PC to power remote systems with η exceeding today's state of- the-art PC designs.

DOI:

10.1109/LED.2021.3121501