

Real-Time Solar Radiation Estimation Based on FPGA with Low-Cost Sensors

Estimación de Radiación Solar en tiempo real basada en FPGA con sensores de bajo costo

Rubén De Jesús Rivera-Medina¹, Oscar Osvaldo Ordaz-García*¹, Angel García Duran¹, Salvador Ibarra Delgado¹, Remberto Sandoval Aréchiga¹, José Ricardo Gómez Rodríguez¹, Víktor Iván Rodríguez Abdalá¹, and Cristian Eduardo Boyain y Goytia Luna¹

¹ Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ingeniería Eléctrica,

Posgrado en Ingeniería para la Innovación Tecnológica,

Jardín Juárez, 148, Col. Centro, Zacatecas, Zacatecas, México, CP.98000

{ruben.riveramedina , oscarordazg , angel.garcia.duran , sibarra , sandoval , jrgridri , abdala , cristian.boyain}@uaz.edu.mx

Abstract

In this work, a solar radiation sensing and measurement system implemented in an FPGA is developed to graphically display in a visual application the sensed parameters sensing solar radiation in real time. The system is described in VHDL using TSL2591 and INA260 sensors to capture solar radiation data. The sensors communicate with the FPGA using the I2 C protocol and the FPGA communicates with a Host using the RS232 serial protocol. The visual application controls and monitors the data captured by the sensors. The system measures solar irradiance and illuminance. In order to determine that the results are correct, they were compared with those obtained by two other different systems. One system is implemented in an “Arduino Uno” MCU, and the other belongs to “INIFAP”, presenting similar results in both cases. The INIFAP system uses a pyranometer with an energy transformation efficiency of 99% compared to 17% of the PV cell used in this work, calculating the efficiencies both systems are compared obtaining similar values with a difference of $\pm 0.5\%$. Achieving the development of a low cost sensing system.

Keywords— Solar radiation, FPGA, Solar irradiance, Illuminance

Resumen

En este trabajo se desarrolla un sistema de sensado y medida de radiación solar implementado en una FPGA para mostrar gráficamente en una aplicación visual los parámetros sensados de radiación solar en tiempo real. El sistema se describe en VHDL utilizando sensores TSL2591 e INA260 para capturar los datos de radiación solar. Los sensores se comunican con la FPGA utilizando el protocolo I2 C y la FPGA se comunica con un Host utilizando el protocolo serie RS232. La aplicación visual controla y monitoriza los datos capturados por los sensores. El sistema mide la irradiancia solar y la iluminancia. Para determinar que los resultados son correctos, se compararon con los obtenidos por otros dos sistemas diferentes. Un sistema está implementado en una MCU “Arduino Uno”, y el otro pertenece al “INIFAP”, presentando resultados similares en ambos casos. El sistema INIFAP utiliza un piranómetro con una eficiencia de transformación de energía del 99 % frente al 17 % de la célula fotovoltaica utilizada en este trabajo, calculando las eficiencias se comparan ambos sistemas obteniendo valores similares con una diferencia de $\pm 0,5\%$. Consiguiendo el desarrollo de un sistema sensor de bajo coste.

Palabras clave— Radiación solar, FPGA, Irradiancia solar, Iluminancia

I. Introducción

La medición de la radiación solar se puede realizar mediante la aplicación de diferentes tecnologías que miden la energía solar, las cuales son utilizadas para diferentes áreas de investigación como la salud humana y la meteorología, destacando como alternativa, en la generación de energía eléctrica y sistemas de calentamiento de agua [1]. Por ejemplo, los sensores de radiación solar se utilizan en aplicaciones de invernaderos solares, con la desventaja de que son muy costosos[2, 3, 4]. La medición de la irradiancia solar contribuye a maximizar la eficiencia en las centrales fotovoltaicas (FV). Los dispositivos de detección de la irradiancia solar, como los piranómetros, son difíciles de calibrar y extremadamente caros, y debido a estas limitaciones rara vez se utilizan en centrales fotovoltaicas [5]. Para intentar solucionar estos problemas, se han implementado métodos indirectos para maximizar la eficiencia, mediciones de la curva corriente-voltaje (I-V) de los módulos FV, y la estimación de la irradiancia solar mediante el método de Angstrom, entre otras variantes del método [6, 7].

Otra alternativa para el desarrollo de dispositivos que midan la irradiancia solar puede ser un Field Programmable Gate Array (FPGA). Estos dispositivos permiten su configuración Hardware (HW), incluso de forma dinámica, por lo que suelen utilizarse para realizar tareas de procesamiento de alta complejidad, que deben tener una respuesta adecuada en tiempo real[8]. Una FPGA permite implementar por HW cualquier circuito periférico o específico de una aplicación e incluso una o varias Unidades Centrales de Proceso (CPU), funcionando todas ellas en paralelo. Por lo tanto, es un dispositivo muy versátil, que permite implementar sistemas electrónicos digitales muy eficientes y a medida, en comparación con una CPU clásica [9]. Las ventajas de las FPGAs en términos de coste, tamaño y consumo de energía facilitan su uso en diferentes plataformas de sistemas embebidos[10, 11]. Su evolución las ha llevado a ser utilizadas para reducir tiempos y costes en el desarrollo de sistemas complejos, como es el caso de las comunicaciones para satélites y naves espaciales que utilizan protocolos de alta velocidad[12].

Una FPGA es un dispositivo HW compuesto por bloques lógicos programables (formados por elementos como flip-flops y tablas de consulta), además de bloques de E/S para la interacción con otros dispositivos. La FPGA dispone de interconexiones programables para conectar los bloques lógicos, bloques de memoria para el almacenamiento de datos, bloques específicos del

dispositivo diseñados para tareas concretas y bloques de E/S. Las FPGAs son reconfigurables y pueden realizar cualquier tarea lógica y/o digital, lo que las hace extremadamente versátiles, su diseño y programación se realiza utilizando lenguajes de descripción HW como VHDL o Verilog[13]. Además, las FPGAs permiten realizar el codiseño HW/SW de cualquier sistema, por ejemplo, se han utilizado como Computación de Alto Rendimiento (HPC)[14], glue logic [15] y desarrollos de interfaces[16, 17].

La irradiancia solar es un parámetro clave para el seguimiento del punto de máxima potencia (MPP) en las centrales fotovoltaicas. Esto se debe a que el punto de funcionamiento en el que un campo fotovoltaico proporciona su máxima potencia es función de la irradiancia solar y de la temperatura de la célula [5] calcular el MPP para obtener la máxima eficiencia, forzando al campo FV a operar en ese punto. El punto de funcionamiento del campo FV se regula ajustando el ciclo de trabajo del convertidor de potencia conectado a la salida del campo, para ello se han desarrollado diferentes algoritmos que realizan la función de seguimiento del punto de máxima potencia (MPPT), evitando una medida directa de la irradiancia solar[5]. Mancilla, et al. en [5] presentan un sensor de irradiancia solar basado en una Red Neuronal (NN) implementado en un sistema embebido de bajo coste controlado a través de un microcontrolador (MCU) PIC18F6627 de ocho bits y un sensor de temperatura DS18B20 enfocado al seguimiento de la irradiancia solar para el diseño de una planta fotovoltaica [5].

Hishikawa, et al. en [18] exponen un método de medición de la curva I-V exterior de módulos FV de silicio cristalino para monitorizar la irradiancia solar utilizando un sensor de irradiancia de módulos FV (PVMS,) con tiempos de detección de 0,2 – 0,5 seg. y filtrando los datos afectados por la uniformidad espacial de la irradiancia, corrigiendo por temperatura mediante la fórmula de traslación, que considera explícitamente la característica dependiente del voltaje de su coeficiente de temperatura; donde la reproducibilidad de la corriente del circuito (I_{sc}) / irradiancia G medida con un PVMS (GPVMS) y la potencia máxima (Pmax) / GPVMS se obtiene con una desviación estándar relativa σ de 0,21 – 0,23 % y 0,24 – 0,42 %, respectivamente, incluso en días parcialmente soleados y nublados cuando la irradiancia solar es inestable [18].

Achleitner, et al. en [19] predicen la irradiancia solar, utilizando una red inalámbrica de sensores, que consiste en un nodo Gateway Time-Synchronizer (GTS) y varias Solar Irradiance Motes (SIMs). El nodo GTS consiste en un Crossbow MICAz conectado al sensor en una placa Nemsic MTS420/400CC. El control lo

*Autor de correspondencia

proporciona la MCU ATmega128L de bajo consumo y la comunicación inalámbrica la proporciona la radio CC2420 de Texas Instruments. El MICAz se conecta a un módulo MTS420 / 400CC que contiene un receptor GPS y otros sensores a través del conector de expansión de 51 pines. También se conecta a un ordenador de sobremesa Raspberry Pi a través de una conexión serie. El nodo sensor dispone de un convertidor analógico-digital (ADC) de 8 canales y 12 bits. Los sensores de irradiancia solar se conectan a las entradas del ADC del nodo [19].

El objetivo de este trabajo es la implementación en HW de un sistema de sensado y medida de radiación solar implementado en una FPGA mediante un sensor de "Lux" y un sensor de "Potencia" donde este último obtiene su medida de una célula fotovoltaica de 3W con una eficiencia del 17% de transformación de energía, pudiendo medir en tiempo real la irradiancia solar y mostrando los datos en una aplicación visual para la representación de los datos mediante una gráfica. Este documento se estructura como sigue: La sección II hace hincapié en trabajos anteriores relacionados. La sección III describe los materiales y métodos de diseño. La **Sección 4** presenta los resultados experimentales de la implementación del Sistema de Medida y Detección de Radiación Solar en una FPGA y, finalmente, las conclusiones se presentan en la **Sección 5**.

II. Trabajos Relacionados

Una de las principales fuentes de energía no contaminante y gratuita es y seguirá siendo, durante muchos años, el Sol. Por ello, una piedra angular en la investigación es saber cómo aprovechar esta energía [20]. Para el control de la energía solar, es necesario disponer de sensores que determinen la irradiancia, éstos deben ser precisos y baratos [21]. La eficiencia de las células solares depende directamente de las características de su funcionamiento, por lo que estimar los parámetros de las células solares es una tarea crítica [22]. La innovación y evolución de la estimación de la radiación solar y la irradiancia se ha basado históricamente en costosos piranómetros [23]. La gran cantidad de inversión en investigación y desarrollo de la tecnología fotovoltaica intenta hacer que esta tecnología sea asequible y económicamente viable. La reducción del coste económico de los módulos fotovoltaicos ha globalizado su uso con el fin de desarrollar tecnologías sostenibles [24]. Hay fabricantes que han desarrollado sensores para medir la irradiancia en aplicaciones fotovoltaicas. Por supuesto, el coste de los sensores viene determinado por el diseño, el procedimiento de calibración y la caracterización realizada [7]. El sensor de irradiancia es el instrumento

que mide la energía solar incidente por unidad de superficie, normalmente expresada como W/m^2 , es esencial para conocer la energía solar incidente total en un lugar determinado y para analizar el rendimiento de los sistemas FV. En general, los sensores de irradiancia suelen ser ligeros, flexibles y requieren poca energía eléctrica para funcionar, por lo que pueden instalarse en cualquier condición [7].

En diferentes trabajos se han caracterizado sensores de irradiancia comerciales con el objetivo de determinar los rangos de precisión y las posibles desviaciones o errores en las lecturas. Por ejemplo, Driesse et al. en [25] caracterizan algunos sensores de irradiancia comerciales con el objetivo de determinar su sensibilidad, concluyendo que ésta influye en el error de lectura de forma sistemática. Además, afirman que las lecturas de las células fotovoltaicas de referencia pueden desviarse debido al desajuste en sus espectros de respuesta. Algo similar hicieron Vignola et al. en [26], comparando piranómetros y células FV de referencia, obteniendo aproximadamente $\pm 10\%$ de desviación. Determinaron que las células FV de referencia se comportaban mejor en condiciones de cielo despejado, con el inconveniente de que la desviación aumenta en condiciones de cielo nublado, todo ello en comparación con los piranómetros. De forma similar en tiempos recientes, Lorente et al. en [27] realizaron una evaluación de la precisión de instrumentos de medida de radiación solar de bajo coste instalados en varias estaciones meteorológicas. Además, desarrollaron un modelo de calibración basado en la temperatura del sensor, el ángulo cenital solar y el índice de cielo despejado, con el objetivo de aumentar la precisión.

También se ha intentado desarrollar funciones, arquitecturas, modelos o algoritmos que requieran un número mínimo de entradas de sensores y aumenten la precisión de la estimación [7]. Kohno et al. en [28] desarrollaron una arquitectura basada en un módulo fotovoltaico, que mide la tensión y la corriente de corriente continua (CC) en un inversor fotovoltaico, para intentar reducir los costes de implementación, operación y mantenimiento de las centrales fotovoltaicas. Scolari et al. en [29] propusieron calcular la potencia máxima de una planta FV a partir de la estimación indirecta de la irradiancia. El análisis se realizó a partir de medidas de tensión continua, corriente y temperatura, en la célula, para desarrollar un modelo del conjunto fotovoltaico, e intentar demostrar que un sencillo sistema de detección puede superar las estimaciones basadas en piranómetros. Cristaldi et al. en [30] utilizaron sensores de irradiancia solar de bajo coste y aplicaron ecuaciones algebraicas para determinar la relación I-V de una célula FV. Además,

utilizaron un pirómetro para obtener los parámetros necesarios para implementar un algoritmo MPPT. Tan et al. in [31] estiman la irradiancia solar con una precisión admisible midiendo la corriente de un módulo FV. Da Costa et al. en [20] estimaron la irradiancia midiendo la corriente y el voltaje de un módulo FV, mostrando los resultados mediante simulación y determinando que la predicción es apta.

En la estimación de la irradiancia también se utilizan diferentes MCUs y la ayuda de varios componentes electrónicos y sensores para implementaciones de PVs [21]. Por ejemplo, Mancilla et al. en [5] infieren la irradiancia mediante medidas en dispositivos electrónicos DC y un NN implementado en un MCU. Históricamente, la realización de medidas en tiempo real para estimar la generación fotovoltaica máxima es un factor clave que puede permitir la realización de sistemas de control robustos capaces de cumplir con la operación segura de redes de distribución eléctrica con plantas fotovoltaicas [32, 33]. Un factor trascendental en el desarrollo y evaluación de sistemas de energía solar es la obtención de medidas precisas de radiación. Una solución alternativa es el uso de sensores económicos frente a dispositivos muy caros como los piranómetros [21]. Li Vigni et al. en [34] realizan una estimación de la irradiancia en tiempo real mediante medidas en dispositivos electrónicos de corriente continua, con el problema de que el procedimiento requiere que los dispositivos conmuten entre tres fases diferentes (baja carga, cortocircuito y circuito abierto), este procedimiento no es habitual en los sistemas fotovoltaicos comerciales.

La estimación de la irradiancia solar permite una gestión óptima de la energía fotovoltaica. El problema es que los dispositivos actuales de estimación de la irradiancia son muy caros [35][35]. Por el contrario, existen FPGAs de bajo coste y bajo consumo, que tienen ventajas inherentes como la flexibilidad y la capacidad de ejecución en paralelo para el procesamiento en tiempo real y el Alto Rendimiento, que evita los cuellos de botella generados en la ejecución por Software (SW) [36]. Por ejemplo, Oliveri et al. en [35] presentaron dos sensores virtuales de irradiancia implementados en una FPGA, los resultados obtenidos fueron contrastados con los medidos por un costoso piranómetro comercial, obteniendo que son relativamente similares. La arquitectura implementada en la FPGA permitió estimar la irradiancia en tiempo real, obteniendo información de varios dispositivos electrónicos de bajo coste situados en los módulos fotovoltaicos. Los resultados se validaron comparándolos con los de un laboratorio de energías renovables [35]. En comparación con las publicaciones analizadas, este trabajo se centra en la descripción por Tabla de un sistema de estimación

de la radiación solar para su implementación en FPGAs de bajo coste y potencia utilizando sensores de bajo coste. El objetivo de este trabajo es la implementación en HW de un sistema de sensado y medida de radiación solar implementado en una FPGA mediante un sensor de “Lux” y un sensor de “Potencia” donde este último obtiene su medida de una célula fotovoltaica de 3W con una eficiencia de transformación de energía del 17 %, pudiendo medir en tiempo real la irradiancia solar y mostrando los datos en una aplicación visual para su representación mediante una gráfica.

III. Materiales y Métodos

El diseño del sistema para estimar la radiación solar en FPGA-Based, se realizó bajo el análisis y descripción de la Máquina de Estado Algorítmica (ASM) para cada sensor y la unidad de control. En la Fig. 1 se muestra el diagrama esquemático de bloques de la conexión entre los sensores, la FPGA y el Host. En la parte izquierda hay tres bloques que representan el sensor de “Lux” TSL2591, el sensor de “Potencia” INA260 y la célula fotovoltaica. En la parte central se encuentra el bloque FPGA, que describe e implementa las entidades necesarias para la comunicación con los sensores, el control general y la interfaz de comunicaciones Universal Asynchronous Receiver-Transmitter (UART) para facilitar la conexión con cualquier dispositivo y/o periférico. Finalmente, en la parte derecha se encuentra el bloque que identifica el Host que ejecuta la aplicación visual.

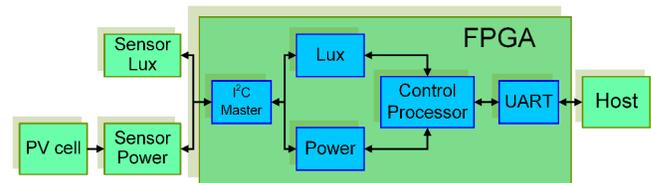


Figura 1: Esquema general del sistema de estimación de la radiación solar en FPGA-Based

III.1. Análisis

Para realizar la configuración y comunicación entre los sensores y la FPGA, se analizó el funcionamiento de los sensores revisando sus respectivas características. Se detectó que en ambos sensores la comunicación se realiza a través del protocolo de circuito integrado (I^2C), por lo que fue necesario desarrollar e implementar para cada sensor un ASM capaz de controlar dicha comunicación. La configuración de los sensores se realizó mediante registros. Los registros activan el encendido del sensor, controlan la velocidad y frecuencia de transferencia, la ganancia y otros parámetros. El sensor

TSL2591 tiene dos fotodiodos, “CH0” es el espectro amplio (visible más infrarrojo) y “CH1” es el espectro infrarrojo, que detectan utilizando una técnica llamada integración de luz para medir con precisión la cantidad de luz que incide en los dos fotodiodos durante un periodo de tiempo determinado. El sensor acumula la luz incidente y la convierte en una corriente proporcional. Además, también dispone de dos ADC, que transforman la intensidad luminosa en una salida digital con 16 bits de resolución, para convertir la corriente y representarla como irradiancia. Los registros “CH0 Data” y “CH1 Data” almacenan los valores procedentes de los ADCs para cada canal a través del registro de control (ALS Control). Los dos fotodiodos permiten extraer la luz visible, que se obtiene de la diferencia del espectro amplio entre el espectro infrarrojo, necesario para el funcionamiento de los paneles fotovoltaicos. El sensor INA260 dispone de los registros “Current Register” y “Voltage Register” utilizados para almacenar los valores de corriente y tensión procedentes del ADC de 16 bits que está conectado a estos registros. Además, dispone de un multiplicador interno que toma los valores de las salidas de los registros “Current Register” y “Voltage Register” para obtener la potencia, y el valor resultante se almacena en el registro “Power Register”. El sensor INA260 se conecta en serie con el circuito resistivo que mide la potencia. El INA260 utiliza un principio de medida basado en la tecnología de resistencia shunt integrada, que tiene un valor de $2m\Omega$ que junto con el ADC de alta resolución permite obtener medidas de $1.5mA$ por cada muestra de tensión que fluye a través de esta resistencia. Con el ADC y la resistencia shunt se obtiene el valor de la corriente. Las células fotovoltaicas se encargan de extraer la energía existente en la radiación solar y convertirla en energía eléctrica, esto es el resultado de la transferencia de electrones energizados (por la radiación solar que incide sobre ellos) de la banda de valencia a la banda de conducción, dejando un estado de energía libre (llamado hueco) en la banda de valencia [37]. En la Fig. 2 se observa la celda solar fotovoltaica utilizada en este trabajo, esta tiene dimensiones de $138 \times 160mm$, y está construida de un material monocristalino el cual tiene una alta eficiencia de transformación de energía solar es del 17%, proporcionando una potencia de $3Watts$, una corriente de $540mA$, un voltaje de $5.5V$ y un voltaje máximo de carga de $6.4V$ [38].

Tras determinar las características de los sensores y de la célula solar fotovoltaica, se diseñó el sistema de control, configuración y comunicación de los sensores describiendo las entidades necesarias para su implementación en la FPGA.

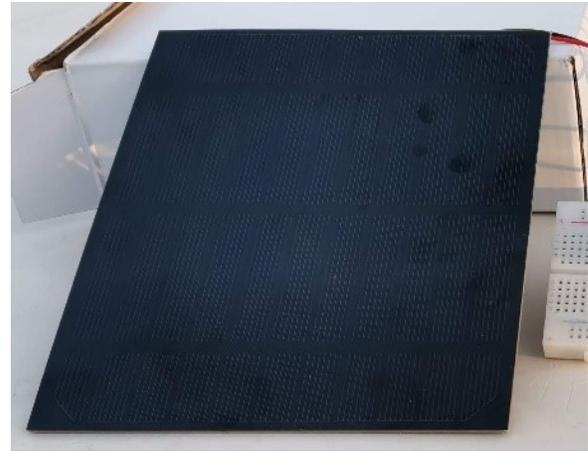


Figura 2: Célula fotovoltaica.

La comunicación de la FPGA con los sensores se realizó a través de la interfaz I²C, para lo cual se diseñó una entidad que realiza esta función como módulo “maestro”, teniendo a los sensores como módulo “esclavo”. En la Fig. 3 la entidad “I²C Master” basada en la IP publicada en [39] con las adaptaciones necesarias para utilizarla en este trabajo e implementarla en la FPGA.

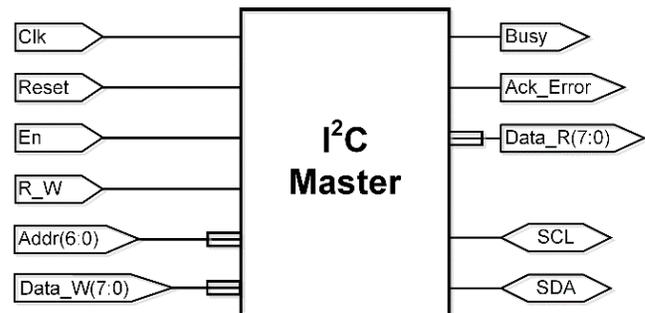


Figura 3: Entidad “I²C Master”

El búfer de tres estados es un componente esencial en una configuración de puerto bidireccional, que permite una utilización eficiente de un pin físico de entrada/salida (E/S). En esta configuración, la señal “dir” determina la dirección del flujo de señal en el pin bidireccional. Con la señal “dir” a ‘0’, el búfer de tres estados adopta un estado de alta impedancia, bloqueando así la señal de salida. En este caso, el pin se convierte en un puerto de entrada y canaliza la señal de entrada hacia la señal de salida. Por otro lado, cuando la señal “dir” es ‘1’, el pin se convierte en un puerto de salida, encaminando la señal de salida hacia un circuito externo. Es esencial tener en cuenta que, para conseguir este comportamiento bidireccional, el puerto debe estar configurado en modo “inout” [40].

Para el caso concreto del dispositivo Xilinx Spartan-3, éste sólo dispone de un búfer de tres estados en el bloque

de E/S (IOB) de un pin físico. Esto implica que sólo los puertos de E/S vinculados a los pines físicos de un dispositivo FPGA pueden utilizar el búfer de tres estados [40]. En la Tabla 1 se muestran los puertos de entrada de la entidad “I²C Master”, la Tabla 2 muestra los puertos de salida, y la Tabla 3 los puertos bidireccionales.

Tabla 1: Puertos de entrada de la entidad “I²C Master”

Puerto	Descripción
Clk	Señal de reloj que sincroniza la operación.
Reset	Se inicializa a un estado conocido (activo alto).
En	Señal que habilita la transmisión, cuando se pone a '1'.
R_W	Señal de control de lectura (1) o escritura (0).
Addr(6:0)	Dirección específica del esclavo.
Data_W(7:0)	Datos a transmitir cuando la señal R_W se pone a '0'.

Tabla 2: Puertos de salida de la entidad “I²C Master”

Puerto	Descripción
Busy	Señal que indica el estado de la transmisión. Si es '0' el último dato leído está disponible en la salida Data_R(7:0). Si es '1' hay un proceso de transmisión en curso.
Ack_Error	Es la señal de acuse de recibo que indica un error. Si es '0' no hay error. Si es '1' se ha producido al menos un error durante la transmisión. Ack_Error se borra al principio de cada transmisión.
Data_R(7:0)	Datos recibidos cuando R_W se pone a '1' (read).

Tabla 3: Puertos Bidireccionales de la entidad “I²C Master”

Puerto	Descripción
SCL	Serial clock bus I ² C
SDA	Serial data bus I ² C

En la Fig. 4 se muestra la entidad encargada de controlar y configurar el sensor TSL2591. La entidad “Lux” configura la ganancia de los fotodiodos y el tiempo de muestreo del sensor (llamado tiempo de integración), tiene tres entradas y cinco salidas.

En la Tabla 4 se muestran los puertos de entrada de la entidad “Lux”, y en la Tabla 5 se muestran los puertos de

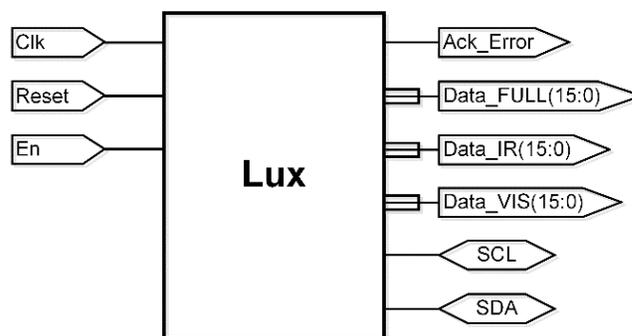


Figura 4: Entidad “Lux”

salida y Tabla 6 los puertos bidireccionales.

Tabla 4: Puertos de entrada de la entidad “Lux”.

Puerto	Descripción
Clk	Señal de reloj que sincroniza el funcionamiento.
Reset	Inicializa a un estado conocido (activo en alto).
En	Señal que habilita el proceso de la lectura, al ponerse en '1'.

Tabla 5: Puertos de salida de la entidad “Lux”

Puerto	Descripción
Ack_Error	Es la señal de acuse de recibo que indica un error. Si es '0' no existe error. Si es '1' se produjo al menos un error durante la transmisión. Ack_Error se borra al principio de cada transmisión.
Data_FULL(15:0)	Datos obtenidos por el sensor, para el dato FULL.
Data_IR(15:0)	Datos obtenidos por el sensor, para el dato IR.
Data_VIS(15:0)	Datos obtenidos por el sensor, para el dato VISIBLE.

Tabla 6: Puertos Bidireccionales de la entidad “Lux”.

Puerto	Descripción
SCL	Serial clock bus I ² C
SDA	Serial data bus I ² C

En la Fig. 5 e muestra la entidad que realiza la configuración y control del sensor INA260. La entidad "Potencia" configura el número de muestras a censar, con las que

genera una media para cada valor de corriente, tensión y potencia, además de configurar los tiempos de conversión ADC del sensor. La entidad tiene tres entradas y seis salidas.

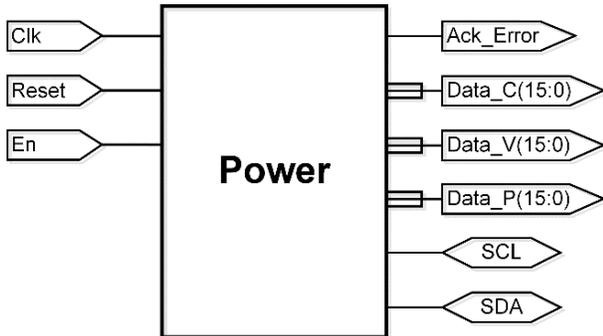


Figura 5: Entidad "Power"

En la Tabla 7 se muestran los puertos de entrada de la entidad "Power", y en la Tabla 8 e muestran los puertos de salida y la Tabla 9 los puertos bidireccionales.

Tabla 7: Puertos de entrada de la entidad "Power".

Puerto	Descripción
Clk	Señal de reloj que sincroniza la operación.
Reset	Se inicializa a un estado conocido (activo alto).
En	Señal que habilita el proceso de lectura, cuando se pone a '1'.

Tabla 8: Puertos de salida de la entidad "Power"

Puerto	Descripción
Ack_Error	Es la señal de acuse de recibo que indica un error. Si es '0' no hay error. Si es '1' se ha producido al menos un error durante la transmisión. Ack_Error se borra al principio de cada transmisión.
Data_C	Datos obtenidos del sensor para los datos actuales.
Data_V	Datos obtenidos por el sensor para los datos de voltaje.
Data_P	Datos obtenidos por el sensor de potencia.

En la Fig. 6 se muestra la entidad que realiza la comunicación entre el "Procesador de Control" el Host. La entidad "UART" tiene dos componentes, el Transmisor y el Receptor, basados en lo desarrollado por Ordaz et al. en [36].

Tabla 9: Puertos Bidireccionales de la entidad "Power".

Puerto	Descripción
SCL	Serial clock bus I^2C
SDA	Serial data bus I^2C

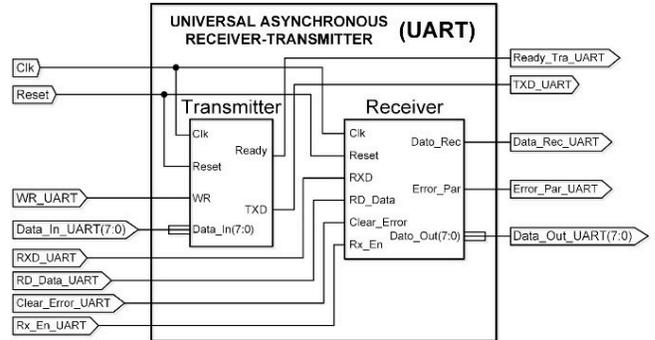


Figura 6: Entidad "UART"

En la Tabla 10 se muestra la descripción de los puertos de entrada de la entidad "UART", y en la Tabla 11 los puertos de salida.

Tabla 10: Puertos de entrada de la entidad "UART"

Puerto	Descripción
Clk	Señal de reloj que sincroniza el funcionamiento de todos los componentes.
Reset	Inicializa todos los componentes a un estado conocido (activo alto).
WR_UART	Señal de control de escritura que se activa para iniciar una transmisión.
Data_In_UART(7:0)	Bus en el que se colocan los datos que se van a transmitir.
RXD_UART	Señal a través de la cual se reciben los datos serie.
RD_Data_UART	Señal de control de lectura UART, debe ponerse a '1' para leer los datos recibidos.
Clear_Error_UART	Señal que borra el error de paridad.
Rx_En_UART	Señal que habilita el receptor, debe ponerse a '1' para permitir la recepción de datos.

Los sensores "Lux" y "Potencia" tienen cada uno tres valores a detectar. Los valores del sensor "Lux" son: Completo, IR y Visible. Los valores del sensor "Potencia" son: Corriente, Tensión y Potencia. Se ha desarrollado una aplicación visual para monitorizar estos valores. A continuación se describen las entidades necesarias para el sistema de estimación de la radiación solar. La entidad

Tabla 11: Puertos de salida de la entidad "UART"

Puerto	Descripción
Ready_Tra_UART	Indica el estado del transmisor. Si se pone a '1' se puede escribir un nuevo dato.
TXD_UART	Señal a través de la cual se envía la transmisión en serie.
Data_rec_UART	Señal de estado que cuando se pone a '1' indica que se ha recibido un dato.
Error_Par_UART	Se activa cuando se detecta un error de paridad al recibir un dato.
Data_Out_UART(7:0)	Bus de datos del receptor.

"I²C Master" realiza el protocolo de comunicación I2C necesario para la comunicación de los sensores. Las entidades "Lux" y "Power" configuran y controlan los sensores. La entidad "UART" comunica el Host con la FPGA. La entidad "Control Processor" controla todo el proceso de detección.

III.2. Descripción

En esta sección se presentan las descripciones de las entidades necesarias para el sistema de estimación de la radiación solar. La entidad "I²C Master" realiza el protocolo de comunicación I²C necesario para la comunicación de los sensores. Las entidades "Lux" y "Power" configuran y controlan los sensores. La entidad "UART" comunica el Host con la FPGA. La entidad "Control Processor" controla todo el proceso de detección.

III.2.1. "I²C Master"

El diagrama de la Máquina de Estado Algorítmica (ASM) del "I²C Master" se muestra en la Fig. 7. En el estado "listo" se espera la habilitación desde la aplicación visual (ena = 1). En el estado "start" se genera la condición de arranque. En el estado "comando", la dirección y el comando R/W se asignan al bus I²C. El estado "slv_ack1" captura y verifica el reconocimiento del módulo esclavo y, dependiendo de cuál sea el comando R/W, procede a escribir (estado "wr") o leer (estado "rd") datos en el módulo esclavo. Si el módulo maestro está escribiendo, al terminar, captura y verifica la respuesta proveniente del módulo esclavo ACK (estado "slv_ack2"). Si el módulo maestro está leyendo, genera un NACK (estado "mstr_ack"). Si al final de la lectura, la señal "ena" permanece alta, el módulo maestro continúa inmediatamente con otra lectura o escritura. Por otro lado, si la dirección del módulo esclavo es diferente, el módulo maestro emite un inicio de repetición (SR) de acuerdo con la especificación del protocolo I2 C. Una vez que el

módulo maestro finaliza una lectura o escritura, si la señal "ena" es igual a 0, entonces el módulo maestro genera la condición de parada (stop state) y vuelve al estado "ready".

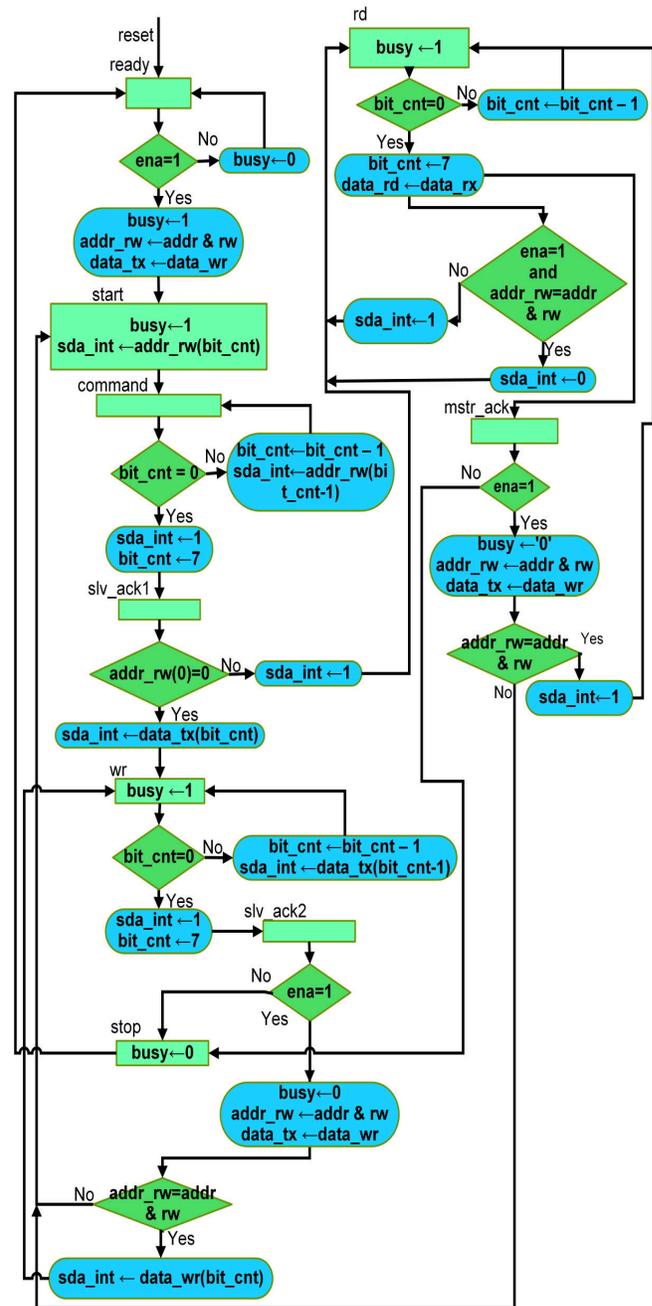


Figura 7: ASM "I²C Master"

III.2.2. "Lux"

En la Fig. 8 se muestra el diagrama ASM que configura y controla el sensor "Lux" TSL2591. En el estado

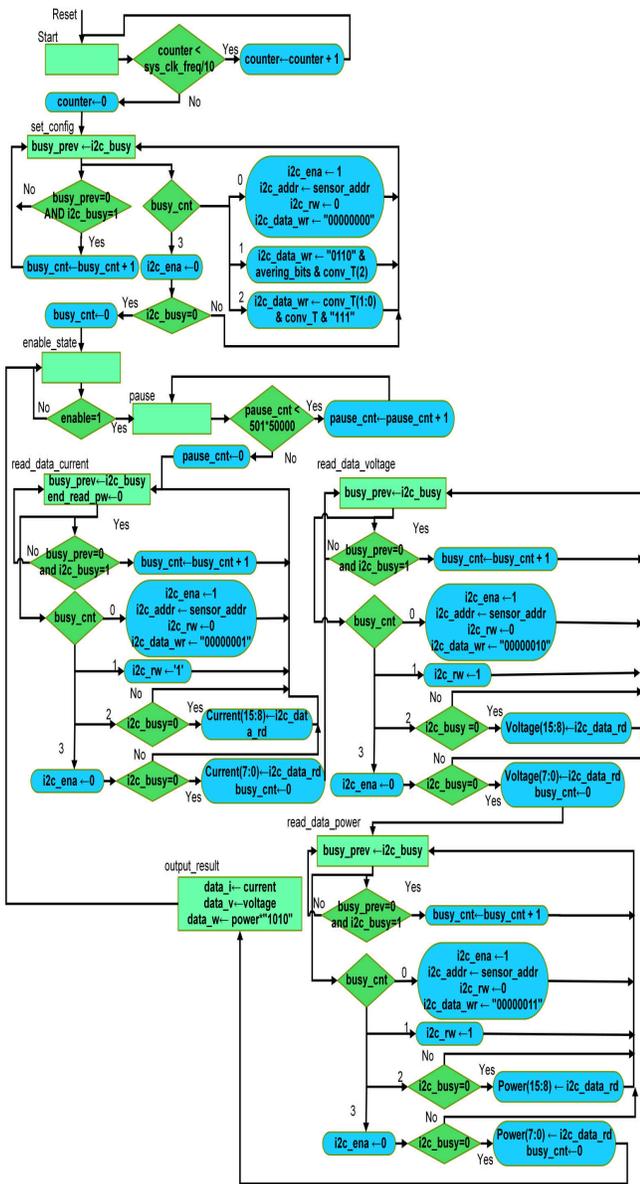


Figura 9: ASM "Power"



Figura 10: Formato del mensaje de transmisión asíncrona.

se activa para leer los datos, una vez capturados los datos, los sensores notifican con un flag al "Control Processor" el fin de la captura. En el estado "Ready_Up" se controla y sincroniza la comunicación con el Host, realizando las transiciones a los seis estados que permiten enviar a la UART los datos capturados por los sensores. La ejecución de estos seis estados se realiza en el sentido de las agujas del reloj. El estado "send_data_full" controla el envío de los datos Full. El estado "send_data_ir" controla el envío



Figura 11: Diagrama de estados simplificado del FSMD del "Control Processor".

de los datos IR. El estado "send_data_vis" controla el envío de los datos Vis. Estos tres del sensor "Lux" TSL2591. El estado "send_data_current" controla el envío de datos de corriente. El estado "send_data_voltage" controla el envío de datos de tensión. El estado "send_data_power" controla el envío de los datos de potencia. Estos son los otros tres estados del sensor "Power" INA260. Los seis estados de envío de datos a la UART dividen el valor de los datos detectados en dos tramas de 8 bits, ya que éstas tienen 16 bits de ancho. Una vez ejecutado uno de los seis estados para enviar los datos sensados, se vuelve al estado "Ready_Up" donde se realiza la sincronización y se procede a ejecutar el siguiente estado para enviar el siguiente dato (esto se realiza seis veces). La ejecución del estado "Read_Data" y de los seis estados de envío es continua, ya que el estado también reinicia el proceso de sensado.

IV. Resultados

En este apartado se presentan los resultados obtenidos en este trabajo, donde se utiliza una célula fotovoltaica que se conecta directamente al terminal positivo del sensor INA260, mientras que una resistencia de carga "ideal" se conecta al terminal negativo, que a su vez está conectado al sensor. Los sensores INA260 y TSL2591

están conectados a la FPGA y se comunican a través del protocolo I^2C . Por otro lado, la FPGA está conectada al Host y se comunica mediante el protocolo RS232 a través de la UART.

IV.1. Sistema de monitoreo

La aplicación visual mostrada en Fig. 12 fue desarrollada en el software “Visual Studio 2019”. La ventana gráfica de la aplicación visual denominada Windows Form contiene campos para la visualización de los datos sensados por el sistema. La aplicación visual realiza y muestra las conversiones a lux's (lx) y W/m^2 . Para enviar y recibir los comandos y los datos sensados por el sistema, se utiliza el puerto serie, que permite conectar el sistema al Host a través de un cable USB a DB9 para la comunicación. La aplicación visual consta de cinco secciones: la barra de menús, la sección “Configuración del puerto Com”, la sección “Transmisión de control”, la sección “Terminal de visualización de datos” y la sección “Visualización de gráficos”. La barra de menú tiene cuatro menús desplegables “Archivo”, “Control COM”, “Trazado de datos” y “Acerca de”. El menú “Archivo” contiene la opción “Guardar Archivo” que permite guardar en un archivo “.csv” los datos sensados por el sistema, la opción “Borrar Archivo” borra el búfer donde se almacenan los datos sensados y la opción “Salir” sirve para salir de la aplicación. El menú “Control COM” tiene las opciones “ABRIR” y “CERRAR” que abren y cierran el puerto COM respectivamente. El menú “Data Plot” tiene las opciones para seleccionar Lux o W/m^2 que son los datos que se grafican en la sección “Plot Viewer”. El menú “Acerca de” contiene información sobre la aplicación. La sección “Configuración del puerto COM” contiene los campos tipo lista para seleccionar el PUERTO COM, la TASA DE BAUDOS y una barra de progreso que indica si el puerto está abierto (al 100 %) o cerrado (al 0 %). La sección “Transmisión de control” contiene dos botones para iniciar o detener la captura de los datos detectados. La sección “Data Viewer Terminal” tiene dos secciones, una se llama “Light Sensor Values” donde se muestran los datos correspondientes al sensor de Luz (Full, IR y Visible), los datos calculados en Lux y la conversión de Lux a W/m^2 y la otra se llama “Power Sensor Values” donde se muestran los datos correspondientes al sensor de Potencia (Current, Voltage y Power), los datos calculados en W/m^2 y la conversión de W/m^2 a Lux. Por último, en la sección “Plot Viewer” se representa el tipo de datos seleccionado en el menú “Data Plot”.

El funcionamiento de la aplicación visual comienza con la selección de “Com Port Settings”, donde se selecciona el puerto de conexión y la velocidad de transferencia (que en este sistema se configuró a 9.600 baudios). A continuación, en el menú “COM Control”, se abre el puerto

COM para realizar la conexión con la FPGA, seleccionando la opción “OPEN”. Si el puerto seleccionado está libre, la barra de progreso situada en el área “Com Port Settings” se rellena al 100 %, indicando que la conexión se ha realizado correctamente, en caso contrario se recibirá un mensaje de error. Una vez realizada la conexión, se inicia la captura de datos del sistema sensor pulsando el botón “Start” de la sección “Control Transmission”, que permite acceder a la transferencia de datos, visualizarlos y generar la gráfica Lux o W/m^2 . La captura de datos se finaliza pulsando el botón “Stop” de la sección “Control Transmisión”, y a continuación en el menú “COM Control” se puede cerrar el puerto COM con la opción “Close”. Se puede utilizar la opción “Guardar archivo” para guardar la captura de datos, o la opción “Borrar archivo” para borrar los datos, ambas situadas en el menú “File”.

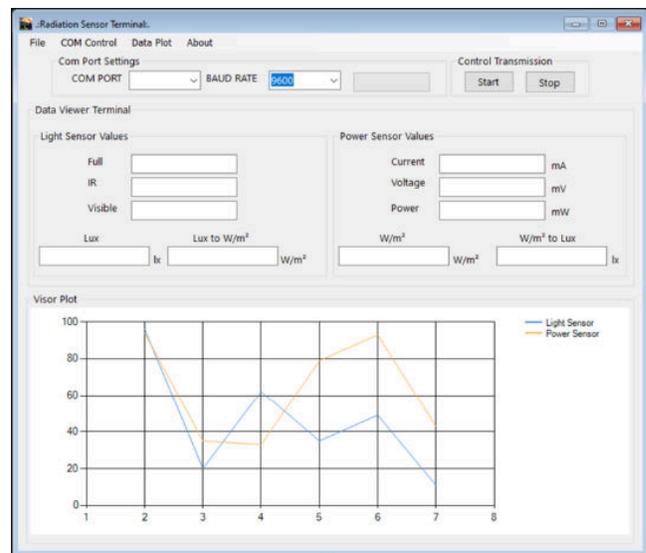


Figura 12: Aplicación Visual

IV.2. Calibración de la Celda PV

La célula solar obtiene un máximo de 3 vatios de potencia máxima, tiene un área de $220,8\text{cm}^2$ y una eficiencia del 17 % en la transformación de energía. Para obtener la resistencia “ideal” y extraer la máxima potencia que proporciona la célula, se probaron diferentes valores de resistencia de carga. En la Fig. 13 se muestran los resultados de las pruebas para obtener la resistencia de carga “ideal”. Donde se pueden observar los valores de corriente, tensión y potencia para cada valor de resistencia ensayado, obteniendo el punto de máxima potencia con un valor de resistencia de carga de $9,4\Omega$, consiguiendo una calibración de la célula con unos valores de corriente (532mA) y tensión ($5,1\text{V}$) muy próximos a los valores (540mA y $5,5\text{V}$) establecidos por el fabricante.

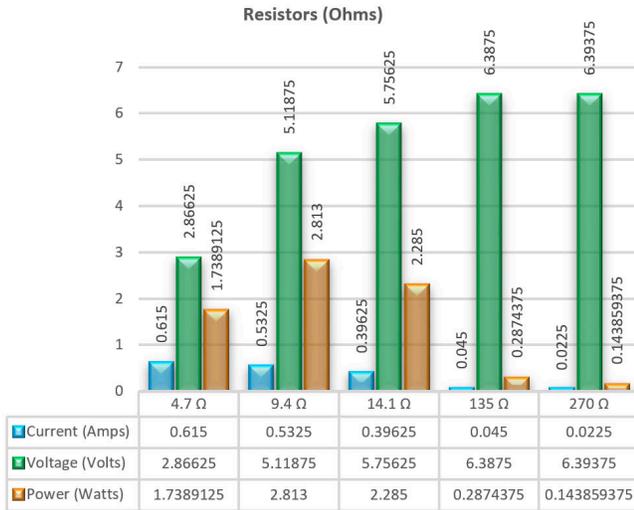


Figura 13: Pruebas de la resistencia de carga.

IV.3. Captura de los valores sensados

En la Fig. 14 se muestran los sensores, la célula FV, la FPGA y el Host. Los sensores y la célula fotovoltaica se colocaron con una inclinación de 23 grados hacia el sur, determinada por el cálculo de inclinación que debe tener un panel fotovoltaico para un rendimiento óptimo [41] basándose en la estación del año y la latitud del lugar donde se capturan las muestras.



Figura 14: Sistema de sensado y medición de radiación solar basado en la FPGA.

En cuanto a la velocidad de muestreo de los datos, el sistema captura una muestra cada 3 segundos, teniendo en cuenta que una muestra consiste en el sensado de seis valores, los tres valores obtenidos por el sensor TSL2591 y los tres valores obtenidos por el sensor INA260. Esta velocidad es óptima para preservar la integridad de los datos y realizar correctamente la comunicación con el Host. Para el cálculo del Lux, se utiliza la Ecuación (1) a partir de los valores captados por el sensor TSL2591. La ecuación (1) viene determinada por el fabricante del sensor [37]. La conversión de Lux a W/m^2 se realizó utilizando un factor de conversión único para la banda de $555nm$ basado en la Ecuación (2).

$$Lux = \frac{(Full - Ir) \times \left(1.0 - \frac{Ir}{Full}\right)}{\left[\frac{(time \times gain)}{480}\right]} \quad (1)$$

$$1W/cm^2 = 6830000lux$$

$$1lux = 1.46412884333821 \times 10^{-07}1W/cm^2 \quad (2)$$

Valor capturado por la Cell "3000mW"

$$3000mW/220.8cm^2 = 0.01358695652W/cm^2$$

$$0.01358695652W/cm^2 \times 10,000 =$$

$$135.8695652W/m^2 \quad (3)$$

El cálculo de W/m^2 se realizó mediante la Ecuación (3), a partir de los datos captados por el sensor INA260, multiplicando 10.000 por el resultado de la división del valor de potencia por el área de la célula fotovoltaica. La conversión de W/m^2 a Lux se realizó a partir de la Ecuación (2). La ejecución de las tres ecuaciones necesarias para el cálculo de Lux, la conversión de Lux a W/m^2 y el cálculo de W/m^2 , se realizan en tiempo de ejecución del programa de aplicación visual, después del sensado.

IV.4. Interpretación de resultados

La interpretación de los valores capturados es de suma importancia, por lo que se realizó de dos formas diferentes. La primera forma de interpretar los datos se muestra en la Fig. 15 donde la aplicación visual muestra los seis valores capturados, así como los respectivos valores calculados, y un gráfico generado en tiempo real con estos datos. En el gráfico, el eje X representa el número de muestras captadas y el eje Y los valores Lux.

La segunda forma de interpretar los datos es utilizando los valores almacenados en el archivo ".csv" generado por la aplicación visual, para así realizar la gráfica correspondiente a los datos capturados. Teniendo en cuenta que el eje X representa el instante de tiempo en el que se capturaron las muestras, y dependiendo del parámetro a graficar, el eje Y representa los W/m^2 del sensor INA260 o la conversión de Lux a W/m^2 del sensor "Lux" TSL2591.

En la Fig. 16 se muestra el comportamiento de la radiación solar a lo largo del día. Teniendo en cuenta los parámetros del sensor de "Lux"(color morado) y del sensor de "Potencia"(color azul).

Respecto al sensor "Lux", se percibió con mayor precisión la radiación solar directa en los periodos de baja radiación solar como el amanecer y el atardecer, ya que se

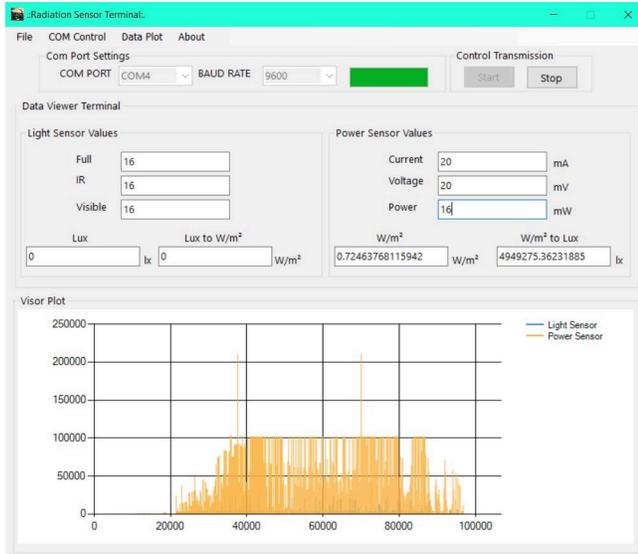


Figura 15: Resultados en la aplicación visual del sistema de sentido basado en la FPGA

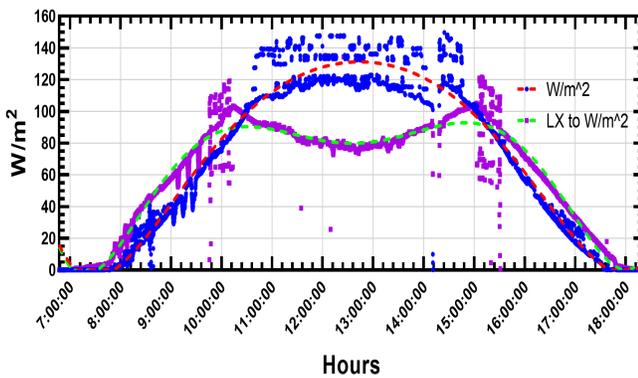


Figura 16: Interpolación en W/m^2 , estimada a partir del FPGA.

aprovechó la alta resolución que ofrece el sensor TSL2591 en condiciones de baja luminosidad, gracias al sentido de los fotones incidentes en los fotodiodos del sensor. En relación a la potencia, se observó que, al llegar al periodo más energético del día, el sensor INA260 y la célula fotovoltaica en su conjunto, perciben con mayor precisión la radiación solar global en virtud del área de la celda fotovoltaica.

Con los datos captados por estos sensores, se generó un gráfico para tener una mayor resolución, obteniendo fiabilidad y precisión, en contraste con los sistemas propietarios de detección de radiación global que tienen un coste muy elevado.

IV.5. Interpolación de estimaciones basada en FPGA comparada con un sistema implementado en Arduino

La estimación de la radiación solar obtenida en tiempo real basada en la FPGA, se comparó con la estimación obtenida con otro sistema desarrollado e implementado en una plataforma que contiene una MCU “Arduino Uno”, en ambos casos se utilizaron los mismos parámetros de configuración, el mismo instante de tiempo y las mismas condiciones en las medidas.

En la Fig. 17 se observa el comportamiento de la radiación solar respecto al sensor “Lux” implementado en el sistema basado en FPGA, y en la Fig. 18 se observa el comportamiento de la radiación solar con los valores de Lux ahora capturados por el sistema implementado en la plataforma “Arduino”. Como se puede observar, las estimaciones son muy similares, lo que nos ha permitido comprobar el correcto funcionamiento de ambos sistemas. El sistema basado en FPGA ofrece las ventajas de una mayor sensibilidad, realizando un muestreo en tiempo real, por lo que se perciben cambios mínimos en la radiación solar a lo largo del día, así como cualquier perturbación en el entorno, proporcionando una mayor fidelidad.

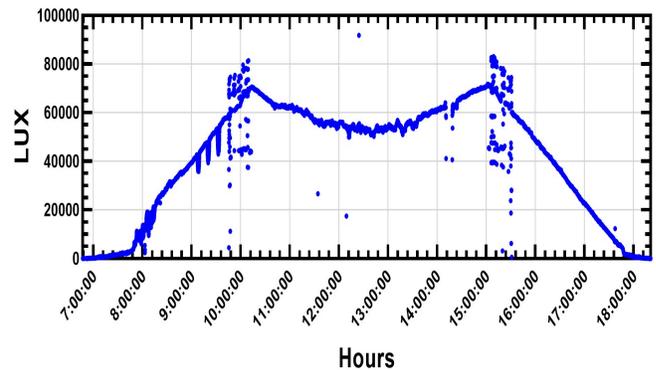


Figura 17: Datos capturados en base a la FPGA.

IV.6. Interpolación de la estimación basada en FPGA comparada con “INIFAP”

La estimación del sistema basado en FPGA se comparó con la medición de una estación meteorológica que mide la radiación solar, perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) en el estado de Zacatecas. La estación “INIFAP” se localiza en la longitud -102.5108234 , latitud 22.7572833 y altitud $2,290.6913548$ *msnm*. En contraste, la estimación obtenida por el sistema basado en FPGA fue capturada en longitud -102.4747504 , latitud 22.729409 y altitud $2,216.310519$ *msnm* [42]. Entre las dos localizaciones

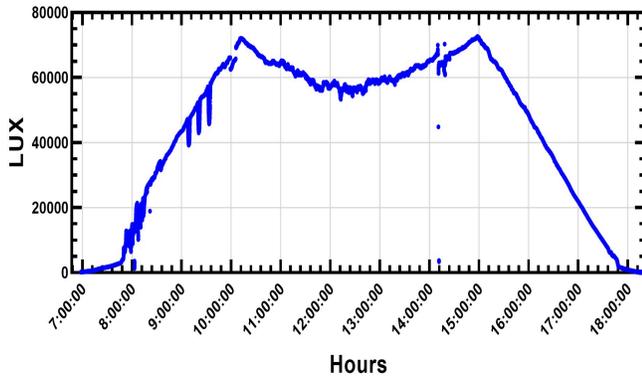


Figura 18: Datos capturados en base al "Arduino".

donde se capturaron los resultados hay una distancia aproximada de 4,8 kilómetros [42] como puede verse en la Fig. 19.

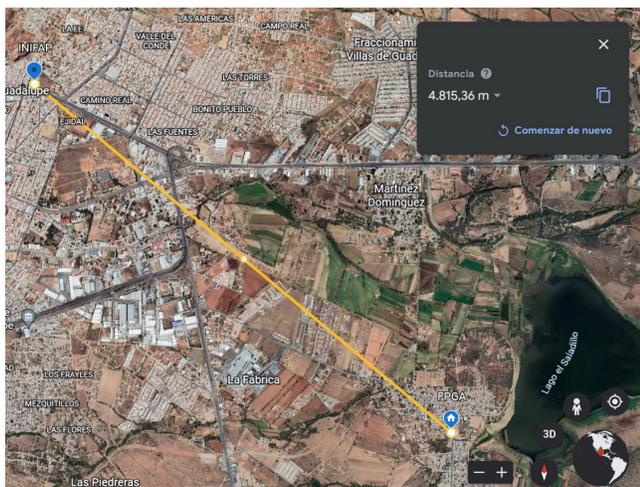


Figura 19: Distancia entre los sitios de captura [42].

El sistema "INIFAP" de medición de la radiación solar utiliza un piranómetro con una resolución del 99% en relación con la eficacia de la transformación de la energía en radiación solar. El objetivo principal del sistema es medir la radiación que existe en un metro cuadrado. Por ejemplo, si hubiera 1.000 W de potencia en un metro cuadrado, el piranómetro registraría un valor de 990 W/m². En contraste, la celda fotovoltaica utilizada en este sistema tiene una eficiencia del 17%, por lo que para realizar la comparación entre los datos obtenidos por el sistema basado en FPGA y los del "INIFAP", se multiplicaron los datos de este último por un factor de 0.17, siendo esta la eficiencia de transformación de energía de la celda fotovoltaica utilizada. En la Fig. 20 se muestra una captura de pantalla del sitio web oficial del "INIFAP". Es importante mencionar que la eficiencia máxima de las células fotovoltaicas comerciales fabricadas con silicio monocristalino es del 17%, como la utilizada en este sistema. Aunque

existen células fotovoltaicas con eficiencias de hasta el 33%, éstas se utilizan exclusivamente en satélites muy pequeños debido a sus elevados costes de producción.



Figura 20: Sitio Web del "INIFAP".

En la Fig. 21 e muestran los datos en W/m² obtenidos de la estación meteorológica "INIFAP", y en la Fig. 22 los capturados por el sistema basado en FPGA. Como se puede observar, existe una clara similitud entre ambos, sin embargo, la diferencia en la escala también es notoria, ya que el sistema "INIFAP" captura con un tiempo de muestreo de 15 minutos, y presenta el pico de radiación solar (también llamado Zenit) a las 11:45 am con un valor de 810.1 W/m². El sistema basado en FPGA obtuvo un valor de 139.1092052 W/m² a las 11:44:32 am, siendo el punto más cercano comparado con el del "INIFAP".

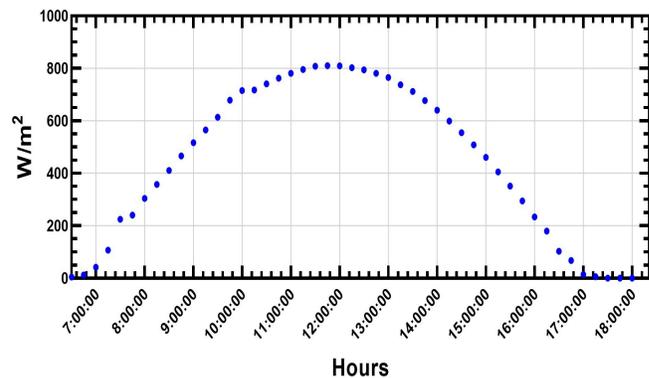


Figura 21: Radiación solar medida por "INIFAP".

La similitud entre los valores de ambos sistemas se presenta debido a que, si el valor del piranómetro del "INIFAP" fuera el 100% de la radiación solar existente en un metro cuadrado, entonces al multiplicarlo por el valor de la eficiencia de la celda fotovoltaica utilizada en el

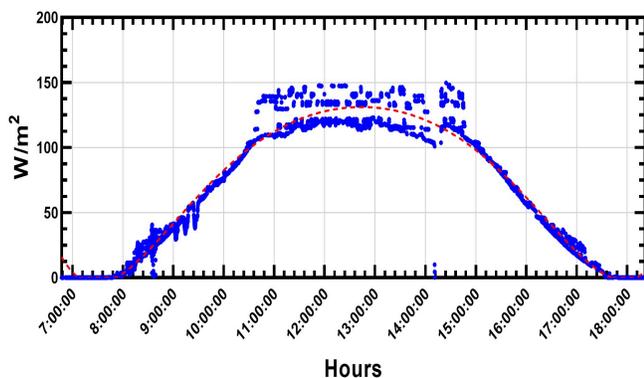


Figura 22: Radiación solar medida por el sistema basado en FPGA.

sistema basado en la FPGA, se observa una clara similitud entre el valor obtenido por el sistema basado en la FPGA ($139.1092052 \text{ W/m}^2$) y el valor obtenido del “INIFAP” al multiplicarlo por el factor de eficiencia de la celda fotovoltaica (137.717 W/m^2). La diferencia porcentual entre ambos sistemas es de $1,01917461\%$, la cual fue calculada con la Ecuación (4), donde se determina que el “valor real” es el obtenido por el “INIFAP” y el “valor medido” es el capturado por el sistema basado en FPGA.

$$E_r = \frac{|\text{valor real} - \text{valor medido}|}{\text{valor real}} \times 100 \quad (4)$$

Ecuación de error relativo porcentual

V. Conclusiones

El sistema consiste en la descripción e implementación del sensado y medida de la radiación solar, embebido en HW, concretamente en una FPGA, que permitió conocer de forma eficaz y eficiente los parámetros de Lux y Potencia en tiempo real utilizando sensores de bajo coste y consumo.

En el desarrollo del sistema basado en FPGA, se encontró que la radiación solar útil para los paneles fotovoltaicos, la cual se encuentra en la banda visible perteneciente al llamado espectro solar, lo que permitió determinar que los parámetros a medir fueran la iluminancia y la irradiancia, cuyas unidades SI son Lux (lumen/metro^2) y W/m^2 respectivamente. Con base en lo anterior, se diseñó y describió en lenguaje descriptivo HW un sistema de sensado y captura de datos que estima la irradiancia solar mediante sensores de “Lux” y “Potencia”.

También se desarrolló una aplicación visual con el objetivo de monitorizar e interpretar los datos sensados, así como visualizarlos y graficarlos, y realizar la comunicación entre el sistema basado en FPGA y el Host,

permitiendo el control de la captura de datos. Teniendo en cuenta que la comunicación se realiza mediante un cable serie. El sistema de detección y medida de la radiación solar implementado en la FPGA puede permitir a los expertos en sistemas de generación de energía fotovoltaica estimar los niveles de radiación solar en una determinada localización geográfica. Por tanto, calcular la eficiencia y rendimiento en sistemas de generación de energía FV, facilitando la planificación y diseño de los mismos, lo que puede ayudar al medio ambiente combatiendo el calentamiento global, a partir del uso de energías limpias como la energía solar. Finalmente, la estimación obtenida por el sistema de sensado implementado en la FPGA es idéntica en comparación con la obtenida por un sistema donde se utiliza un piranómetro para el sensado de la radiación solar.

En conclusión, el sistema de detección y medida de la radiación solar basado en la FPGA, además de tener una alta resolución, también tiene un bajo coste, si se compara con el coste del sistema de detección basado en el piranómetro, ya que el piranómetro por sí solo cuesta aproximadamente 3.000 dólares, mientras que el coste de los sensores y la célula fotovoltaica utilizados en el sistema basado en la FPGA es de sólo 230 dólares aproximadamente. Aunque el sistema basado en FPGA es eficaz, por supuesto la eficiencia de las células fotovoltaicas actuales limita el alcance del sistema. Es importante comentar que, al sistema actual basado en FPGA, se le pueden añadir otras funciones, como el control y la monitorización remotos mediante la implementación de un módulo de radiofrecuencia o Wifi para enviar y recibir datos a un servidor y los datos se pueden mostrar en un sitio web, una aplicación móvil o la aplicación visual creada para este sistema.

También existe la posibilidad de añadir una opción que permita al sistema tomar muestras cada cierto tiempo.

Referencias

- [1] Marina Sparvoli et al. «Indium Oxynitride (InNO) Radiation Sensors Calibration». En: *IEEE Sensors Journal* 17 (8 2017). ISSN: 1530-437X. DOI: 10.1109/jsen.2017.2670080.
- [2] Jieming Ma et al. «OL-SVR based soft-sensor for real-time estimation of solar irradiance». En: *2016 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, APCCAS 2016*. 2017. DOI: 10.1109/APCCAS.2016.7803999.
- [3] Oscar López-Lapeña y Ramon Pallas-Areny. «Solar energy radiation measurement with a low-power solar energy harvester». En: *Computers and Electronics in Agriculture* 151 (2018). ISSN: 01681699. DOI: 10.1016/j.compag.2018.06.011.

- [4] J. G. Pieters y J. M. Deltour. «Modelling solar energy input in greenhouses». En: *Solar Energy* 67 (1-3 1999). ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/S0038-092X(00)00054-2.
- [5] Fernando Mancilla-David et al. «A neural network-based low-cost solar irradiance sensor». En: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 63 (3 2014). ISSN: 00189456. DOI: 10.1109/TIM.2013.2282005.
- [6] Haya Aljaghoub et al. «Prediction of Weather Patterns Using Linear Angstrom Model». En: *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences, ASET 2022*. 2022. DOI: 10.1109/ASET53988.2022.9734942.
- [7] Sameep Karki et al. «Performance Evaluation of Silicon-Based Irradiance Sensors Versus Thermopile Pyranometer». En: *IEEE Journal of Photovoltaics* 11 (1 2021). ISSN: 21563403. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2020.3038342.
- [8] Stylianos I. Venieris, Alexandros Kouris y Christos Savvas Bouganis. *Toolflows for mapping convolutional neural networks on FPGAs: A survey and future directions*. 2018. DOI: 10.1145/3186332.
- [9] Fabio Leccese. «Remote-control system of high efficiency and intelligent street lighting using a zig bee network of devices and sensors». En: *IEEE Transactions on Power Delivery* 28 (1 2013). ISSN: 08858977. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2212215.
- [10] Ye Sheng Kuo et al. «Reconfiguring the software radio to improve power, price, and portability». En: *SenSys 2012 - Proceedings of the 10th ACM Conference on Embedded Networked Sensor Systems*. 2012. DOI: 10.1145/2426656.2426683.
- [11] Sandor Szilvasi et al. «Marmote SDR: Experimental platform for low-powerwireless protocol stack research». En: *Journal of Sensor and Actuator Networks* 2 (3 2013). ISSN: 22242708. DOI: 10.3390/jsan2030631.
- [12] Luca Dello Sterpaio et al. «A complete egse solution for the spacewire and spacefibre protocol based on the pxi industry standard». En: *Sensors (Switzerland)* 19 (22 2019). ISSN: 14248220. DOI: 10.3390/s19225013.
- [13] Bekkay Hajji, Adel Mellit y Loubna Bouselham. «Introduction to Field Programmable Gate Arrays (FPGA)». En: *A Practical Guide for Simulation and FPGA Implementation of Digital Design*. Singapore: Springer Singapore, 2022, págs. 3-18. ISBN: 978-981-19-0615-2. DOI: 10.1007/978-981-19-0615-2_1. URL: https://doi.org/10.1007/978-981-19-0615-2_1.
- [14] Harshali Zodpe y Ashok Sapkal. «FPGA-Based High-Performance Computing Platform for Cryptanalysis of AES Algorithm». En: *Advances in Intelligent Systems and Computing*. Vol. 1025. 2020. DOI: 10.1007/978-981-32-9515-5_60.
- [15] Manuel Hernández Calviño, Sergio Rubén Geninatti y José Ignacio Benavides Benítez. «Developing an MMX extension for the MicroBlaze soft processor». En: *Proceedings - 2008 International Conference on Reconfigurable Computing and FPGAs, ReConFig 2008*. 2008. DOI: 10.1109/ReConFig.2008.9.
- [16] Ying Li et al. «An FPGA based Network Interface Card with Query Filter for Storage Nodes of Big Data Systems». En: *Proceedings of the Asia and South Pacific Design Automation Conference, ASP-DAC*. Vol. 2020-January. 2020. DOI: 10.1109/ASP-DAC47756.2020.9045372.
- [17] Haozhe Chen y Zhibin Zeng. «Design and Implementation of TSIP Interface Driver Based on FPGA». En: *Proceedings of 2020 IEEE 4th Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference, ITNEC 2020*. 2020. DOI: 10.1109/ITNEC48623.2020.9085040.
- [18] Yoshihiro Hishikawa et al. «Improved precision of the outdoor performance measurements of photovoltaic modules by using the photovoltaic irradiance sensor». En: *Solar Energy* 211 (2020). ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2020.09.002.
- [19] Stefan Achleitner et al. «SIPS: Solar irradiance prediction system». En: *IPSN 2014 - Proceedings of the 13th International Symposium on Information Processing in Sensor Networks (Part of CPS Week)*. 2014. DOI: 10.1109/IPSN.2014.6846755.
- [20] Wagner Teixeira da Costa et al. «Estimation of irradiance and temperature using photovoltaic modules». En: *Solar Energy* 110 (2014). ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2014.08.040.
- [21] Jieming Ma et al. «Novel Field-Support Vector Regression-Based Soft Sensor for Accurate Estimation of Solar Irradiance». En: *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers* 64 (12 2017). ISSN: 15580806. DOI: 10.1109/TCSI.2017.2746091.
- [22] Omar Avalos et al. «A comparative study of evolutionary computation techniques for solar cells parameter estimation». En: *Computacion y Sistemas* 23 (1 2019). ISSN: 20079737. DOI: 10.13053/CyS-23-1-2881.

- [23] Maheswaran Gunasekaran et al. «An adaptive resistance perturbation based MPPT algorithm for photovoltaic applications». En: *IEEE Access* 8 (2020). ISSN: 21693536. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3034283.
- [24] Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems. *Photovoltaics Report*. Inf. téc. Fraunhofer ISE, 2019, pág. 490.
- [25] A. Driesse et al. «Indoor and outdoor evaluation of global irradiance sensors». En: *Proceedings of the 31st European Photovoltaic Solar Energy Conference*. Hamburg, Germany, 2015, págs. 14-18.
- [26] F. Vignola et al. «Comparison of pyranometers and reference cells on fixed and one-axis tracking surfaces». En: *Proceedings of ASES National Solar Conference Proceedings*. 2017. DOI: 10.18086/solar.2017.07.01.
- [27] Javier López Lorente, Xueqin Liu y David John Morrow. «Worldwide evaluation and correction of irradiance measurements from personal weather stations under all-sky conditions». En: *Solar Energy* 207 (2020). ISSN: 0038092X. DOI: 10.1016/j.solener.2020.06.073.
- [28] Tohru Kohno et al. «Fault-Diagnosis Architecture for Large-Scale Photovoltaic Power Plants That Does Not Require Additional Sensors». En: *IEEE Journal of Photovoltaics* 9 (3 2019). ISSN: 21563403. DOI: 10.1109/JPHOTOV.2019.2903870.
- [29] Enrica Scolari, Fabrizio Sossan y Mario Paolone. «Photovoltaic-model-based solar irradiance estimators: Performance comparison and application to maximum power forecasting». En: *IEEE Transactions on Sustainable Energy* 9 (1 2018). ISSN: 19493029. DOI: 10.1109/TSTE.2017.2714690.
- [30] Loredana Cristaldi et al. «An improved model-based maximum power point tracker for photovoltaic panels». En: *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 63 (1 2014). ISSN: 00189456. DOI: 10.1109/TIM.2013.2277579.
- [31] R.H. Tan, P.L. Tai y V. Mok. «Solar irradiance estimation based on photovoltaic module short circuit current measurement». En: *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (ICSIMA)*. 2014, págs. 1-4. DOI: 10.1109/ICSIMA.2013.6717943.
- [32] Y. Liu et al. «Distribution system voltage performance analysis for high-penetration PV». En: *2008 IEEE Energy 2030 Conference, ENERGY 2008*. 2008. DOI: 10.1109/ENERGY.2008.4781069.
- [33] Andrey Bernstein et al. «A composable method for real-time control of active distribution networks with explicit power setpoints. Part I: Framework». En: *Electric Power Systems Research* 125 (2015). ISSN: 03787796. DOI: 10.1016/j.epsr.2015.03.023.
- [34] Vincenzo Li Vigni et al. «Proof of concept of an irradiance estimation system for reconfigurable photovoltaic arrays». En: *Energies* 8 (7 2015). ISSN: 19961073. DOI: 10.3390/en8076641.
- [35] Alberto Oliveri et al. «Two FPGA-Oriented High-Speed Irradiance Virtual Sensors for Photovoltaic Plants». En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 13 (1 2017). ISSN: 15513203. DOI: 10.1109/TII.2015.2462293.
- [36] Oscar Osvaldo Ordaz-García et al. «Dali bridge FPGA-based implementation in a wireless sensor node for IoT street lighting applications». En: *Electronics (Switzerland)* 9 (11 2020). ISSN: 20799292. DOI: 10.3390/electronics9111803.
- [37] ams-OSRAM International GmbH. *TSL2591: High Sensitivity Digital Light Sensor*. Accessed: Jan. 15, 2023. ams-OSRAM International GmbH. 2018. URL: <https://look.ams-osram.com/m/c901de8e97608f8/original/TSL2591-DS000338.pdf>.
- [38] Texas Instruments. *INA260: Precision Digital Current and Power Monitor with Low-Drift, Precision Integrated Shunt*. Accessed: Jan. 4, 2023. Texas Instruments. 2021. URL: <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ina260.pdf>.
- [39] Clara Calderón et al. «LAS CELDAS SOLARES COMO ALTERNATIVA PEDAGÓGICA EN LA ENSEÑANZA DE LA ELECTRICIDAD». En: *MOMENTO* (55 jul. de 2017), pág. 44. ISSN: 2500-8013. DOI: 10.15446/mo.n55.66145. URL: <http://revistas.unal.edu.co/index.php/momento/article/view/66145>.
- [40] Pong P. Chu. *FPGA Prototyping by VHDL Examples: Xilinx Spartan-3 Version*. John Wiley & Sons, 2011. DOI: 10.1002/9780470231630.
- [41] Zhejiang Dongshuo New Energy Co., Ltd. *Cómo calcular el ángulo correcto para paneles solares en sistemas de energía solar*. Conocimiento - DS New Energy. Accessed: Jan. 23, 2023. 2019. URL: <https://www.dsisolar.com/info/how-to-figure-the-correct-angle-for-solar-panels-37641121.html>.
- [42] Google Inc. *Google Earth*. <https://earth.google.com/>. Accessed: Jan. 15, 2023.