



INAOE

# Instrumentación de un arreglo de microbolómetros de 120x160

por

**Julisa Verdejo Palacios**

Tesis presentada en cumplimiento parcial de los requisitos para  
el grado de:

Maestría en Ciencias en la Especialidad de Electrónica

en

Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica (INAOE)

Agosto, 2024

Santa María Tonantzintla, Puebla

Asesor:

**Dr. Mario Moreno Moreno**  
Departamento de Electrónica INAOE

©INAOE 2024

Todos los derechos reservados

El autor otorga al INAOE el permiso para reproducir y  
distribuir copia de esta tesis en su totalidad o en partes  
mencionando la fuente.





---

# Agradecimientos

---

- Esto es un ejemplo de agradecimiento.
- Este es otro agradecimiento.



---

# Índice general

---

Agradecimientos	I
Índice general	IV
Índice de figuras	V
Índice de tablas	VII
Índice de códigos	IX
Resumen	XI
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Radiación Electromagnética . . . . .	1
1.2. Radiación Infrarroja . . . . .	3
1.3. Detectores Infrarrojos . . . . .	5
1.3.1. Detectores de fotones . . . . .	6
1.3.2. Detectores térmicos . . . . .	6
1.3.2.1. Celda de Golay . . . . .	6
1.3.2.2. Bolómetros y Microbolómetros . . . . .	6
1.3.2.3. Termopares y Termopilas . . . . .	7
1.3.2.4. Detectores piroeléctricos y ferroeléctricos . . . . .	7
1.4. Objetivos . . . . .	7
1.4.1. Objetivo general . . . . .	7
1.4.2. Objetivos específicos . . . . .	7
<b>2. Microbolómetros y descripción de especificaciones</b>	<b>9</b>
<b>3. Sistema de adquisición de datos DAQ</b>	<b>11</b>
3.1. Protocolos de comunicación . . . . .	11
3.2. Tipos de ADC . . . . .	11
3.3. Tipos de DAC . . . . .	11

3.4. PCBs . . . . .	11
3.5. Ruido . . . . .	11
<b>4. Diseño de firmware</b>	<b>13</b>
<b>5. Mediciones y resultados</b>	<b>15</b>
<b>6. Conclusiones</b>	<b>17</b>
<b>A. Códigos</b>	<b>19</b>
A.1. Códigos de Verilog . . . . .	19
A.2. Códigos de Verilog . . . . .	19
<b>Bibliografía</b>	<b>21</b>

---

# Índice de figuras

---

1.1. Espectro electromagnético. . . . .	1
1.2. Emitancia espectral de un cuerpo negro. . . . .	3
1.3. Transmisión de la atmósfera. . . . .	5
2.1. Jitter del reloj. . . . .	9
2.2. FSM template. . . . .	10





---

# Índice de tablas

---

1.1. División de la radiación infrarroja . . . . .	4
2.1. Parámetros recomendados para el conjunto de pruebas del NIST. . . .	10



---

# Índice de códigos

---

A.1. Comunicación RS232 . . . . .	19
A.2. Máquina de estados ejemplo. . . . .	19



---

# Resumen

---



# Capítulo 1

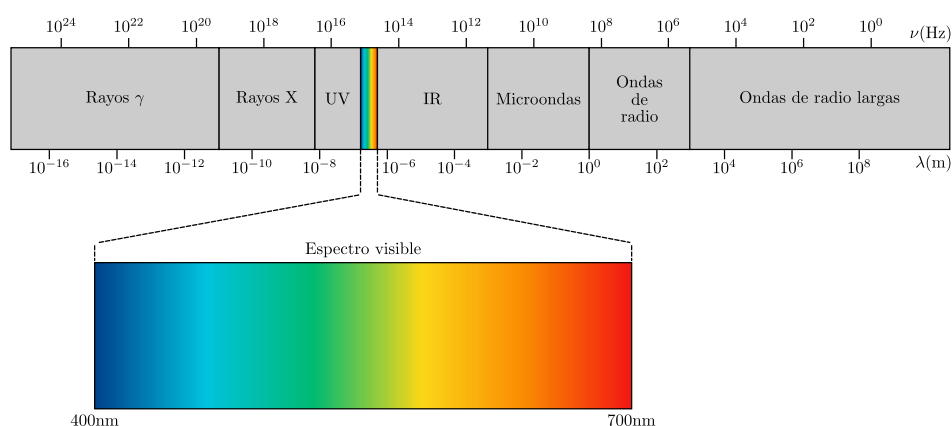
## Introducción

Los microbolomeetros son bonitos y

Porque los sistemas de adquisición de datos son tan importantes en la ciencia Cuales son las dificultades de realizar uno (depende de las especificaciones, el tiempo y el capital humano) Historia de los sistemas de adquisición de datos Ejemplos de sistemas de adquisición de datos Aplicaciones de sistemas de adquisición de datos Puedes enfocarlo al microbolometro o en general

### 1.1. Radiación Electromagnética

La radiación electromagnética es la emisión y transmisión de energía en forma de ondas electromagnéticas. El espectro electromagnético es una representación de los diversos tipos de radiación existentes, en él se definen los intervalos de longitudes de onda o frecuencia que cada una de ellas abarca [2].



**Figura 1.1:** Espectro electromagnético.

Estas radiaciones obedecen las mismas leyes, la diferencia entre ellas radica en su longitud de onda o frecuencia, así como en la manera en que interactúan con los materiales ópticos, incluida la atmósfera [3].

Todos los cuerpos emiten radiación e.m y debido al movimiento de sus átomos y moléculas se genera una temperatura en ellos. Los cuerpos con una temperatura mayor a 0K emiten radiación térmica por medio de ondas e.m. La radiación térmica es la radiación que emite un cuerpo por su temperatura [4].

La capacidad que tiene un cuerpo para emitir radiación está fuertemente relacionada con su capacidad de absorberla [5].

Una superficie ideal que absorbe toda la radiación que incide sobre él se denomina *cuerpo negro* y el espectro de radiación que emite se llama *radiación de cuerpo negro* [6].

A pesar de que en la naturaleza no existe un objeto físico que pueda absorber toda la radiación incidente [7], este puede representarse como un objeto hueco con una pequeña apertura donde cualquier radiación que incida en ella ingresa a la cavidad donde queda atrapada hasta que es absorbida [5], [7]. En equilibrio térmico la radiación emitida por el cuerpo será exactamente igual a la absorbida.

El cuerpo negro fue creado como una herramienta auxiliar para entender como los objetos emiten y absorben radiación. Hacia finales del siglo XIX la radiación de cuerpo negro ya había sido estudiada y dos leyes importantes sintetizaron los descubrimientos experimentales sobre este tema: La *Ley de Stefan-Boltzmann* y la *Ley de desplazamiento de Wien* [7].

La *Ley de Stefan-Boltzmann* plantea que la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro depende de su temperatura. La intensidad es proporcional a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo:

$$I = \sigma T^4 \quad (1.1)$$

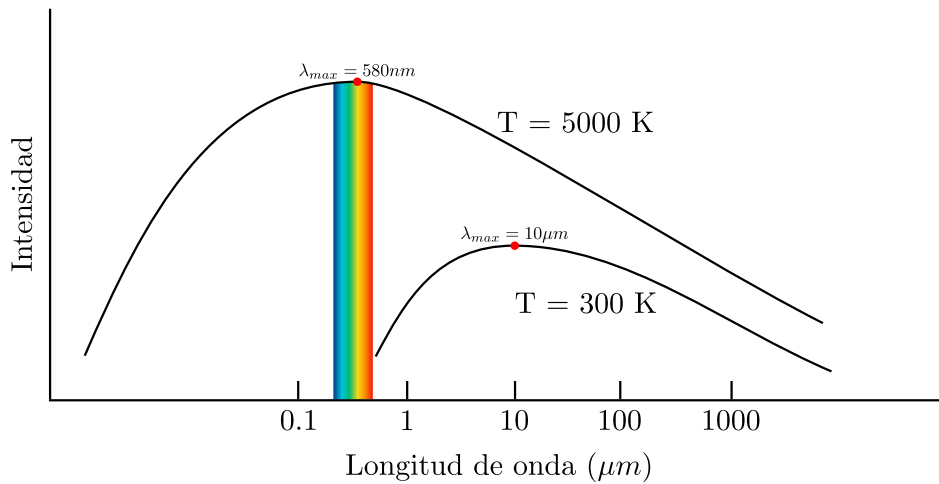
Donde:

$T$  es la temperatura del cuerpo negro en K.

$\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann,  $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

La intensidad de la radiación no se distribuye uniformemente a lo largo de todas las longitudes de onda. En cambio, su distribución puede medirse y describirse utilizando la intensidad por intervalo de longitud de onda,  $I(\lambda)d\lambda$ .





**Figura 1.2:** Emitancia espectral de un cuerpo negro.

La Figura 1.2 muestra las intensidades registradas a dos temperaturas diferentes. En cada caso hay una longitud de onda específica  $\lambda_m$  en la que la intensidad de la radiación emitida es máxima.

La *Ley de desplazamiento de Wien* indica que cuando la temperatura de un cuerpo negro aumenta, la longitud de onda en la que se emite la radiación máxima se desplaza hacia valores más cortos:

$$\lambda_m = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ mK}}{T} \quad (1.2)$$

Donde:

$\lambda_m$  es la longitud de onda en la que un cuerpo negro emite la mayor cantidad de radiación a una determinada temperatura [6], [7].

De las leyes anteriores y la Figura 1.2 se puede deducir que la radiación UV, los rayos X y Gamma, son radiaciones más cálidas (radiaciones de alta energía), mientras que la radiación infrarroja está asociada a fenómenos con temperaturas cercanas a la temperatura ambiente [2], [8].

## 1.2. Radiación Infrarroja

La radiación infrarroja es un tipo de radiación electromagnética que cuenta con longitudes de onda mayores que las del rango visible. Se encuentra en el rango de  $0.77\mu\text{m} - 1\text{mm}$  [8], y a su vez se divide en varias regiones las cuales se muestran en la Tabla 1.1 [1].

**Tabla 1.1:** División de la radiación infrarroja

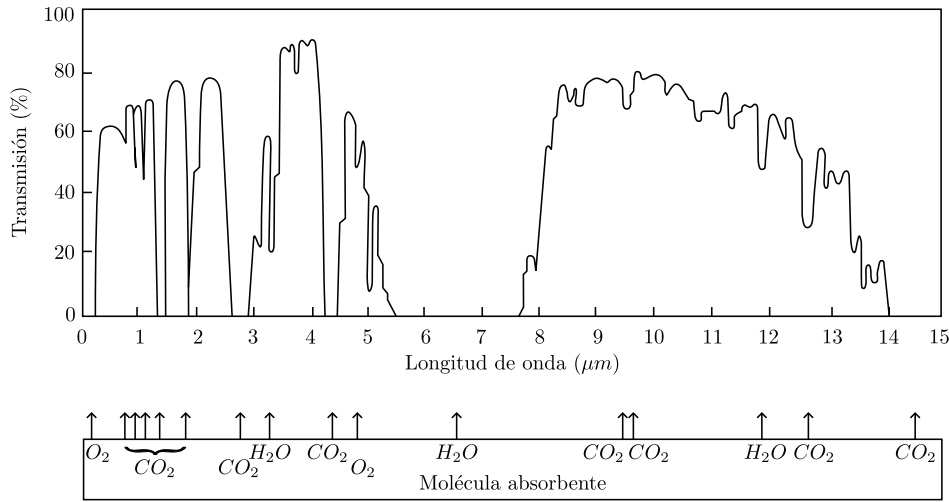
Region	Rango de frecuencia ( $\mu m$ )
Near infrared (NIR)	0.78 - 1
Short wavelength IR (SWIR)	1 - 3
Medium wavelength IR (MWIR)	3 - 6
Long wavelength IR (LWIR)	6 - 15
Very long wavelength IR (VLWIR)	15 - 30
Far infrared (FIR)	30 - 100
Submillimeter (SubMM)	100 - 1000

Algunas de las aplicaciones de la radiación infrarroja son:

- **Visión nocturna:** Las cámaras de visión nocturna trabajan en el espectro infrarrojo para permitir la visión en la oscuridad, estas capturan la radiación térmica emitida por objetos y seres vivos.
- **Medicina:** Es utilizada para hallar cáncer y diabetes en el cuerpo humano.
- **Industria:** Inspección del estado de equipos eléctricos y mecánicos.
- **Conservación de energía:** Con escáneres IR se detectan pérdidas y fugas de calor en casas o industrias.
- **Ambientales:** Medición de la concentración de diversos gases contaminantes en la atmósfera.
- **Agricultura:** Monitoreo del estado de los cultivos y la salud de las plantas, la humedad del suelo y la presencia de plagas o enfermedades.
- **Astronomía:** Los telescopios infrarrojos permiten estudiar regiones del espacio donde se están formando estrellas.
- **Espectroscopía:** Usada en química y biología para identificar y analizar estructuras moleculares de sustancias.

[1], [8].

La mayoría de las aplicaciones en detección de radiación infrarroja requieren que esta se transmita a través del aire [9]. La atmósfera terrestre se compone de ozono ( $O_3$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y vapor de agua ( $H_2O$ ). Estas moléculas bloquean algunas regiones del espectro infrarrojo, impidiendo la transmisión de la radiación IR a la atmósfera. Las longitudes de onda que no son afectadas por estas moléculas reciben el nombre de ventanas atmosféricas [1], [10]. En la Figura 1.3 podemos observarlas.



**Figura 1.3:** Transmisión de la atmósfera.

Despejando la temperatura de la ecuación 1.2 [8]:

$$T_{max} = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ mK}}{8 \mu m} = 362.5 K \quad (1.3)$$

$$T_{min} = \frac{2.90 \times 10^{-3} \text{ mK}}{14 \mu m} = 207.14 K \quad (1.4)$$

podemos deducir que los detectores infrarrojos que operan en la ventana de 8 - 14  $\mu m$  tienen mayor sensibilidad a la temperatura ambiente [1].

El material de fabricación y longitud de onda de operación de los detectores infrarrojos cambian de acuerdo a la aplicación en la que se desee trabajar [1].

### 1.3. Detectores Infrarrojos

Un detector infrarrojo es un dispositivo capaz de absorber parte de la energía infrarroja radiada hacia él, provocando una variación en alguna de sus propiedades eléctricas [8]. Podemos pensar en un detector infrarrojo como un transductor, el cual convierte un tipo de señal en otra; el detector infrarrojo convierte la radiación infrarroja incidente en una señal eléctrica [3].

Dependiendo de la aplicación, el rango del espectro electromagnético y la temperatura en los que se desee trabajar, se debe diseñar o utilizar un detector específico que cumpla con los requerimientos, ya que cada aplicación requiere características diferentes a las demás [1], [8].

Los detectores infrarrojos se pueden clasificar en dos categorías: *Detectores de fotones* y *detectores térmicos*.

### 1.3.1. Detectores de fotones

En los detectores de fotones, la formación de pares electrón-hueco es consecuencia de la detección de radiación absorbida [8]. En estos dispositivos, el fotón que incide sobre la superficie del material puede ser absorbido, lo que resulta en la remoción de un electrón desde la banda de valencia o desde un estado localizado dentro de la banda prohibida hasta la banda de conducción.

Generalmente, los detectores de fotones que operan a longitudes de onda de aproximadamente  $3\mu m$  requieren de un sistema de enfriamiento. Esto es necesario para prevenir la generación térmica de portadores de carga, la cual es su principal desventaja, ya que aumenta su costo y complejidad de operación. No obstante, su resolución y desempeño son bastante buenos [3], [8].

### 1.3.2. Detectores térmicos

El funcionamiento de los detectores térmicos se basa en la generación de una salida eléctrica medible como resistencia o diferencia de potencial debido al cambio de temperatura del material causado por la radiación incidente. Estos detectores pueden funcionar a temperatura ambiente, son económicos, compactos, de bajo consumo energético y tienen una larga vida útil, pero su capacidad de detección es baja [1], [8]. Algunos de los principales detectores térmicos infrarrojos son explicados a continuación.

#### 1.3.2.1. Celda de Golay

La celda de Golay es un detector térmico principalmente utilizado en espectroscopía infrarroja, la celda consiste en una cámara herméticamente cerrada llena de gas y un espejo flexible. A medida que la radiación infrarroja incide, el gas se calienta y se expande, provocando que el espejo flexible se mueva. El movimiento del espejo desvía un haz de luz que incide sobre otro detector generando un cambio en su irradiancia, después esa señal es procesada [3], [8].

#### 1.3.2.2. Bolómetros y Microbolómetros

Los bolómetros y microbolómetros son dispositivos que detectan la radiación infrarroja mediante el cambio en la resistencia eléctrica de un material al variar su temperatura. Conforme la resistencia absorbe calor, su temperatura aumenta y su resistencia se modifica. Este tipo de sensores deben polarizarse con corriente o voltaje para que puedan funcionar. Si son polarizados con corriente, el cambio de la resistencia se puede detectar y medir como un cambio de tensión, pero si se polariza con voltaje entonces se detectará como un cambio de corriente [1], [3].

### 1.3.2.3. Termopares y Termopilas

Los termopares y las termopilas están formados por la unión de dos conductores diferentes unidos por un extremo. Cuando la temperatura aumenta en esa unión, se genera una diferencia de potencial. Al conectar en serie varias uniones de conductores, se produce una tensión más elevada y, por lo tanto, medible [1], [3].

### 1.3.2.4. Detectores piroeléctricos y ferroeléctricos

Estos detectores pueden visualizarse como un capacitor con dos electrodos metálicos colocados perpendicularmente. Cuando un detector piroeléctrico absorbe radiación, su temperatura cambia, lo que genera una carga en el capacitor y una corriente que depende del cambio de temperatura. Si la temperatura permanece constante, la corriente será nula.

Los detectores ferroeléctricos operan bajo el mismo principio que los piroeléctricos, pero con la diferencia de que el efecto se produce mediante un campo eléctrico [1], [8].

## 1.4. Objetivos

### 1.4.1. Objetivo general

- Diseño de un sistema de adquisición de datos basado en FPGA para la medición de una matriz de píxeles de un microbolómetro.

### 1.4.2. Objetivos específicos

- Obtención de especificaciones para el sistema de adquisición de datos.
- Selección de ADC y DAC y protocolo de comunicación a partir de las especificaciones.
- Diseño de un firmware en el lenguaje de descripción de hardware (HDL) Verilog para el protocolo de comunicación SPI reconfigurable y robusto.
- Implementación de protocolo SPI para control de un ADC y un DAC de 12 bits.
- Pruebas experimentales y de estrés para verificación de robustez del diseño y mejora.
- Adquisición de los datos utilizando una terminal de usuario basada en UART.



## Capítulo 2

---

# Microbolómetros y descripción de especificaciones

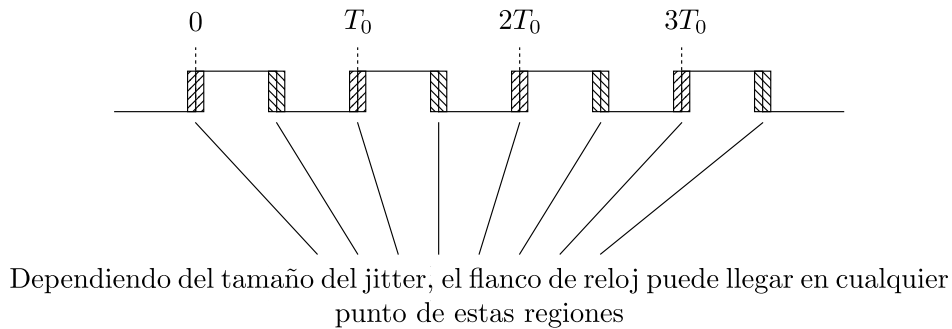
---

En este capítulo se presentan los conceptos necesarios para comprender cómo funcionan las diferentes clases de generadores de números aleatorios, sus fuentes de aleatoriedad, sus principales características y cuales son factibles para implementación en FPGA.

El jitter del reloj en un sistema digital es una desviación del flanco de reloj real con respecto a un flanco de reloj ideal. Una señal de reloj ideal se define mediante la ecuación (2.1), donde  $t(n)$  representa el tiempo del periodo  $n$ -ésimo de una señal de reloj y  $T$  es el periodo de una señal de reloj.

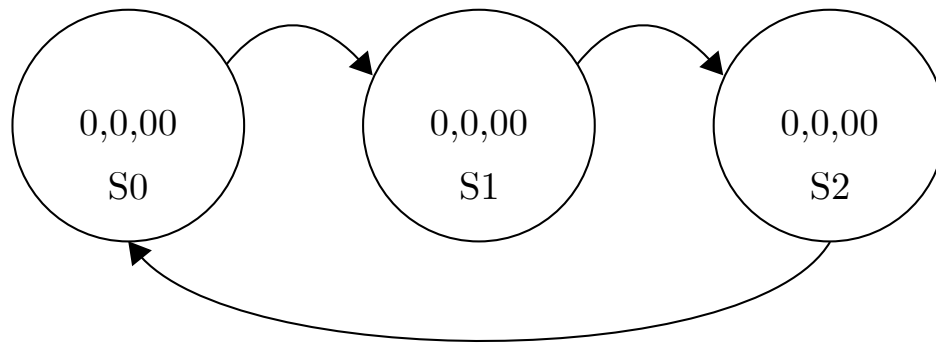
$$t(n) = n \cdot T \quad (2.1)$$

En la práctica, una señal de reloj real no alcanza siempre múltiplos enteros de su periodo ideal, sino que sus flancos fluctúan alrededor de este valor debido al jitter. Esta variación es causada por diversos fenómenos físicos, como el ruido térmico, el ruido de la fuente de alimentación y el ruido electromagnético ambiental, entre otros. La Figura 2.1 muestra cómo se ve una señal de reloj afectada por el jitter.



**Figura 2.1:** Jitter del reloj.

Inputs: START, OPC  
 Outputs: EOF, FLAGt



**Figura 2.2:** FSM template.

Los parámetros recomendados para configurar las pruebas NIST se muestran en la Tabla 2.1:

**Tabla 2.1:** Parámetros recomendados para el conjunto de pruebas del NIST.

Test	Configuration item	Setting
All tests	Bits per sequence	1000000
All test	Number of sequences (sample size)	1073
Frequency test within a block	Block length	20000
Non-overlapping template test	Template length	10
Overlapping template	Block length	10
Mauler's Universal Statistical test	Test block length L	7
Mauler's Universal Statistical test	Initialization steps	1280
Approximate entropy test	Block length	8
Linear complexity test	Block length	1000
Serial test	Block length	16



## Capítulo 3

---

# Sistema de adquisición de datos DAQ

---

### 3.1. Protocolos de comunicación

### 3.2. Tipos de ADC

### 3.3. Tipos de DAC

### 3.4. PCBs

### 3.5. Ruido

En este capítulo se estudiarán los mapas caóticos utilizando como ejemplo el mapa logístico para entender cómo produce el caos y las diferentes técnicas para ver de manera cualitativa este fenómeno.



## Capítulo 4

---

### Diseño de firmware

---



## Capítulo 5

---

### Mediciones y resultados

---



# Capítulo 6

---

## Conclusiones

---

- Parrafo.
- Parrafo.
- Parrafo.





# Apéndice A

---

## Códigos

---

### A.1. Códigos de Verilog

**Código A.1:** Comunicación RS232

```
%% prog04_graficas_multiples
clear; close all; clc;
x = 0:0.1:2*pi;
y1 = sin(x); y2 = cos(x);

subplot(2,1,1);
plot(x,y1,'-sr','DisplayName','f(x) = sin(x)');
axis([min(x) max(x) min(y1)*1.1 max(y1)*1.1]);
grid on; grid minor;
legend('Location','northeast','FontSize',12);
title('f(x) = sin(x)'); xlabel('x'); ylabel('f(x)');

subplot(2,1,2);
plot(x,y2,'-sk','DisplayName','f(x) = cos(x)');
axis([min(x) max(x) min(y2)*1.1 max(y2)*1.1]);
grid on; grid minor;
legend('Location','southeast','FontSize',12);
title('f(x) = cos(x)'); xlabel('x'); ylabel('f(x)');
```

### A.2. Códigos de Verilog

**Código A.2:** Máquina de estados ejemplo.

```
module counter #(
    parameter Width = 8
) (
    input        clk_i,
    input        rst_i,
    output       max_tick_i,
    output [Width-1:0] q_o
);

    reg [Width-1:0] reg_q;
    wire [Width-1:0] sum_d;

    assign sum_d = reg_q + 1;
    assign max_tick_i = (reg_q == 2**Width-1) ? 1'b1 : 1'b0;

    always @(posedge clk_i, posedge rst_i) begin
        if (rst_i)
            reg_q <= 0;
        else
            reg_q <= sum_d;
        end

    assign q_o = reg_q;
endmodule
```



---

# Bibliografía

---

- [1] A. Rogalski, *Infrared Detectors*. CRC Press, 2nd ed., 2011.
- [2] R. Chang, *Chemestry*. McGraw-Hill, 11th ed., 2013.
- [3] J. Vincent, *Fundamentals of Infrared and Visible Detector Operation and Testing*. Wiley, 2nd ed., 2016.
- [4] T. Hollands, *Thermal Radiation Fundamentals*. Begell House, 2004.
- [5] A. Beiser, *Concepts of Modern Physics*. McGraw-Hill, 6th ed., 2003.
- [6] F. Sears, *Física Universitaria con Física Moderna Volumen 2*. Addison-Wesley, 12th ed., 2009.
- [7] S. Ling, *Física Universitaria Volumen 3*. Rice University, 2021.
- [8] D. A. B. Mora, “Diseño de circuitos integrados de lectura paramicrobolómetros,” Master’s thesis, INAOE, 2013.
- [9] R. Jiménez-Zavala, “Desarrollo de micro-bolómetrosno enfriados basados en silicio ygermanio polimorfo,” Master’s thesis, INAOE, 2013.
- [10] M. Ghimire, “Remote sensing and image analysis and in environmental and studies,” Abril 2021.