

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO
FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**



TESIS

**“DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIA
PARA EL REACTOR NUCLEAR RP-10 MEDIANTE EL EFECTO
CHERENKOV”**

PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO ELECTRÓNICO

AUTOR:

Bach. PRESILLO EISENK BENANCIO VÁSQUEZ

ASESOR:

MSc. Ing. Nicanor Raúl Benites Saravia

Callao, 2018

PERÚ

FACULTAD DE INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA
ACTA PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO PROFESIONAL POR LA MODALIDAD DE TESIS SIN
CICLO DE TESIS

A los 17 días del mes de MAYO del 2018 siendo las 12:00 horas se reunió el Jurado Examinador de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica conformado por los siguientes Docentes Ordinarios de la Universidad Nacional del Callao, (Res. N° 163-2018-DFEE)

| | | |
|------|--|------------|
| Ing. | <u>WILBERT CHAVEZ IRAZABAL</u> | Presidente |
| Ing. | <u>LUIS ERNESTO CRUZADO MONTAÑEZ</u> | Secretario |
| Ing. | <u>RICARDO RAÚL RODRÍGUEZ BUSTINZA</u> | Vocal |
| Ing. | <u>ABILIO BERNARDINO CUZCANO RIVAS</u> | Suplente |

Con el fin de dar inicio a la exposición de Tesis del Señor Bachiller en Ingeniería ELECTRÓNICA....., quien habiendo cumplido con los requisitos establecidos en la normativa sustentará la Tesis titulada: DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIA PARA EL REACTOR NUCLEAR RP-10 MEDIANTE EL EFECTO CHERENKOV?

con el quórum reglamentario de ley, se dio inicio a la exposición, considerando lo establecido en el Reglamento de Grados y Títulos, correspondiente al otorgamiento del Título Profesional por la Modalidad de Tesis Sin Ciclo de Tesis, efectuadas las deliberaciones pertinentes se acordó:

Dar por APROBADO Calificativo Muy Buena nota: 17 al expositor Señor Bachiller... BENANCIO YASQUEZ PRESILLO EISENK....., con lo cual se dio por concluida la sesión, siendo las 13:00 horas del día del mes y año en curso.

Es copia fiel del folio N° 116 Del libro de Actas de Sustentación de Tesis de la Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica – UNAC.

.....
 PRESIDENTE
 Ing. WILBERT CHAVEZ IRAZABAL

.....
 SECRETARIO
 Ing. LUIS ERNESTO CRUZADO MONTAÑEZ

.....
 VOCAL
 Ing. Abilio B. Cuzcano Rivas

.....
 SUPLENTE
 Ing.

HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN

PRESIDENTE : MSc. Ing. Wilbert Chávez Irazábal
SECRETARIO : Mg. Ing. Luis Ernesto Cruzado Montañez
VOCAL : MSc. Ing. Ricardo Raúl Rodríguez Bustinza

ASESOR : MSc. Ing. Nicanor Raúl Benites Saravia

DEDICATORIA

A mis hermanos por la confianza
brindada y en especial a mi
querida madre,

AGRADECIMIENTO

Mediante la presente Tesis agradezco al Dr. Msc. Ing. Raúl Benites Saravia por su invaluable apoyo y su asesoría para la realización de este trabajo de investigación.

A mi madre, que con demostración de madre ejemplar me enseñó a no desfallecer ni rendirme ante nada y ser perseverante a través de sus sabios consejos.

Mi agradecimiento al Instituto Peruano de Energía Nuclear por haberme brindado todas las facilidades para poder desarrollar satisfactoriamente esta investigación.

Al ingeniero Emilio Veramendi Leyva, jefe del área de instrumentación y Control del Reactor Nuclear RP-10 por su apoyo brindado con sus amplios conocimientos sobre Ingeniería Nuclear.

Al jefe del Reactor Nuclear RP-10, los físicos y todos los operadores por su apoyo y las facilidades brindadas para poder realizar la experiencia y completar este trabajo de investigación.

A mi amigo, el ingeniero Francisco Quiñones Usaqui, por su apoyo brindado con sus amplios conocimientos en programación y Python.

Gracias a todas las personas que contribuyeron directa e indirectamente en la realización de este proyecto.

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| CARÁTULA | |
| DEDICATORIA | |
| AGRADECIMIENTO | |
| ÍNDICE | 1 |
| TABLA DE CONTENIDOS | 3 |
| RESUMEN | 5 |
| ABSTRACT | 6 |
| INTRODUCCIÓN | 7 |
| PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 9 |
| 1.1 Determinación del problema..... | 9 |
| 1.2 Formulación del problema | 12 |
| 1.2.1 Problema General | 12 |
| 1.2.2 Problema Específico | 12 |
| 1.3 Objetivo de la Investigación | 13 |
| 1.3.1 Objetivo General..... | 13 |
| 1.3.2 Objetivos Específico..... | 13 |
| 1.4 Justificación | 13 |
| 1.4.1 Por su naturaleza..... | 14 |
| 1.4.2 Por su magnitud | 14 |
| 1.4.3 Por su trascendencia | 15 |
| 1.4.4 Por su vulnerabilidad | 15 |
| 1.4.5 Por su aporte | 16 |
| MARCO TEÓRICO | 17 |
| 2.1 Antecedentes de estudio | 17 |
| 2.2 Marco Conceptual..... | 18 |
| 2.2.1 Reactor Nuclear | 18 |
| 2.2.2 Reactor Nuclear RP-10 | 29 |
| 2.2.3 Efecto Cherenkov | 36 |
| 2.2.4 Tratamiento de imágenes..... | 43 |
| 2.2.5 Software para tratamiento de imágenes..... | 45 |
| 2.2.6 Hardware para tratamiento de imágenes..... | 47 |
| 2.3 Definición de términos básicos..... | 49 |

| | |
|--|----|
| VARIABLE E HIPÓTESIS | 53 |
| 3.1 Variable de investigación | 53 |
| 3.2 Operacionalización de variables | 53 |
| 3.2.1 Variables independientes | 53 |
| 3.2.2 Variables dependientes | 53 |
| 3.3 Hipótesis general e hipótesis específica | 54 |
| 3.3.1 Hipótesis general | 54 |
| 3.3.2 Hipótesis específicas..... | 54 |
| METODOLOGÍA | 55 |
| 4.1 Tipo de investigación..... | 55 |
| 4.2 Diseño de investigación..... | 55 |
| 4.3 Población y muestra..... | 68 |
| 4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos | 69 |
| 4.4.1 Técnicas de recolección de datos..... | 69 |
| 4.4.2 Instrumentos de recolección de datos | 69 |
| 4.5 Plan de análisis estadístico de datos | 70 |
| 4.6 Etapa de experimentación y revisión documental | 70 |
| RESULTADOS..... | 72 |
| 5.1 Resultados parciales..... | 72 |
| 5.2 Resultados finales | 79 |
| DISCUSIÓN DE RESULTADOS | 81 |
| 5.1 Contrastación de la hipótesis con los resultados..... | 81 |
| 5.2 Contrastación de la hipótesis con estudios similares | 84 |
| CONCLUSIONES | 85 |
| RECOMENDACIONES | 87 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 88 |
| ANEXOS | 92 |
| • Matriz de consistencia..... | 93 |
| • Programa en Matlab | 94 |
| • Programa en Python para Windows..... | 95 |
| • Programa en Python para Raspberry Pi 3 | 97 |

TABLA DE CONTENIDOS

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 2.1 Datos más relevantes del RP-10..... | 33 |
| Tabla 3.1 Operacionalización de variables – Variable dependiente | 53 |
| Tabla 3.2 Operacionalización de variables – Variable independiente | 53 |
| Tabla 5.1 Sistemas de medición de potencia actuales | 72 |
| Tabla 5.2 Datos obtenidos de la experiencia | 75 |
| Tabla 5.3 Análisis de la escala de Cherenkov | 76 |
| Tabla 5.4 Sistemas de medición de potencia | 77 |
| Tabla 5.5 Potencia por Cherenkov | 80 |

ÍNDICE DE GRÁFICOS

| | |
|---|----|
| Gráfico 5.1 Sistema de medición de potencia del RP-10, Nitrógeno 16 vs Potencia térmica | 73 |
| Gráfico 5.2 Sistema de medición de potencia del RP-10, Nitrógeno 16 vs Corriente de marcha 4 | 73 |
| Gráfico 5.3 Sistema de medición de potencia del RP-10, Corriente de marcha 4 vs Potencia térmica | 74 |
| Gráfico 5.4 Escala de Cherenkov y Potencia por Nitrógeno 16 | 78 |
| Gráfico 5.5 Escala de Cherenkov y Potencia térmica | 78 |
| Gráfico 5.6 Escala de Cherenkov y Corriente de marcha 4 | 79 |
| Gráfico 5.7 Resultados del sistema de medición de potencia mediante el Efecto Cherenkov respecto de la potencia por Nitrógeno 16 y Potencia térmica. | 81 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Una reacción de fisión | 18 |
| Figura 2.2 Inestabilidad del fragmento de fisión | 21 |
| Figura 2.3 Producción de productos de fisión de uranio 235..... | 22 |

| | |
|--|----|
| Figura 2.4 Reactor Nuclear de investigación | 27 |
| Figura 2.5 Reactor nuclear RP-10 | 31 |
| Figura 2.6 Núcleo de reactor nuclear RP-10 | 32 |
| Figura 2.7 Efecto Cherenkov en el Reactor nuclear RP-10..... | 37 |
| Figura 2.8 El Efecto Cherenkov | 38 |
| Figura 2.9 Espectro electromagnético | 40 |
| Figura 2.10 Analogía para el efecto Cherenkov..... | 41 |
| Figura 2.11 Adquisición y digitalización | 44 |
| Figura 2.12 Raspberry pi 3 Modelo B..... | 48 |
| Figura 4.1 Diagrama de bloques para el software..... | 58 |
| Figura 4.2 Monitoreo en subida de potencia del reactor nuclear RP-10 | 59 |
| Figura 4.3 Desarrollo del software en Matlab..... | 60 |
| Figura 4.4 Efecto Cherenkov en el RP-10 | 61 |
| Figura 4.5 Imágenes de prueba | 62 |
| Figura 4.6 Resultados en matlab | 63 |
| Figura 4.7 Resultados en Python para Windows | 63 |
| Figura 4.8 Resultados en Python para Linux (Raspberry Pi 3)..... | 64 |
| Figura 4.9 Visualización del programa terminado | 65 |
| Figura 4.10 Diagrama general del proyecto | 66 |
| Figura 4.11 Instalación de la cámara de video | 67 |
| Figura 4.12 Pantalla de 9 pulgadas en la instalación | 68 |

RESUMEN

El cálculo de la potencia en un reactor y el monitoreo de su comportamiento en función del tiempo es fundamental para hallar el tiempo en que una muestra debería ser irradiado con neutrones para obtener un radioisótopo a una cierta actividad radioactiva. La potencia en el Reactor Nuclear RP-10 se calcula mediante el isótopo nitrógeno 16, mediante la corriente del canal de marcha 4 y calculando la potencia térmica.

Se sabe por la teoría de la Relatividad que nada puede moverse más rápido que la luz en el vacío. En el agua la velocidad de la luz es las tres cuartas partes de la velocidad de la luz en el vacío, es allí, en reactores nucleares como el RP10 que se producen partículas beta de muy alta energía capaces de superar la velocidad de la luz en el agua produciéndose como efecto una radiación de tipo electromagnética que emite un resplandor azul de longitudes de onda entre el rango de 350nm hasta los 500nm conocidos como el Efecto Cherenkov, donde su intensidad de luz azul aumenta a medida que aumenta la potencia del reactor. En el desarrollo de esta investigación se va medir la potencia del reactor mediante tratamiento de imágenes con Python utilizando una cámara de 1080 pixeles y una Raspberry Pi 3, midiendo la intensidad de esa luz azul producido a causa de la radiación de Cherenkov.

ABSTRACT

The calculation of the power in a reactor and the monitoring of its behavior as a function of time is essential to find the time in which a sample should be irradiated with neutrons to obtain a radioisotope at a certain radioactive activity. The power in the RP-10 Nuclear Reactor is calculated by means of the isotope nitrogen 16, by means of the current of the running channel 4 and calculating the thermal power.

It is known from the theory of Relativity that nothing can move faster than light in a vacuum. In water the speed of light is three quarters of the speed of light in vacuum, it is there, in nuclear reactors like the RP10 that very high energy beta particles are produced capable of exceeding the speed of light in the water producing electromagnetic radiation as an effect that emits a blue glow of wavelengths between the range of 350 nm to 500 nm known as the Cherenkov Effect, where its intensity of blue light increases as the power of the reactor increases. In the development of this research we will measure the power of the reactor by treating images with Python using a 1080-pixel camera and a Raspberry Pi 3, measuring the intensity of that blue light produced by Cherenkov radiation.

INTRODUCCIÓN

El Centro Nuclear Óscar Miró Quesada de la Guerra (RACSO) se inauguró el 19 de diciembre de 1988 y cuenta con un reactor nuclear de investigación [10], denominado RP-10 (Reactor Peruano de 10 MW de potencia) [14].

El reactor nuclear RP-10, es un reactor tipo pileta abierta [10], lleno de agua desmineralizada que cumple la función de refrigerante, moderador y blindaje. Su principal función es producir neutrones generados de la fisión del Uranio-235 para irradiar muestras y producir a escala comercial radioisótopos, o para estudiar el comportamiento de diversos materiales para temas de investigación básica y aplicaciones tecnológicas [16] [19].

En un reactor nuclear, no existen los límites para los niveles de potencia que un reactor puede alcanzar, y las condiciones de operación vienen determinadas más por limitaciones tecnológicas que por factores propiamente nucleares [10]. Para garantizar la seguridad nuclear se deben tener sistemas adecuados para medir la potencia, en lo posible ser diversos y redundantes [15].

La potencia en un reactor nuclear es proporcional a la cantidad de fisiones nucleares [10] [29], y este va ser determinado por el flujo de neutrones [10]. Es por eso que el control de operación, puesta en marcha, funcionamiento a cualquier nivel de potencia o parada se determina variando el flujo neutrónico desde las barras de control que capturan neutrones con facilidad.

Conocer la potencia de operación no solamente es vital para la operatividad del reactor nuclear, sino también por la seguridad nuclear, radiológica y técnica, ya que permite fijar límites a los parámetros de seguridad, los niveles de alarma y el tiempo a la que van a estar expuestas las muestras a irradiar [15] [20].

En la operación del reactor, debido a la emisión de partículas beta [10], de muy alta energía producto de la fisión, se produce en torno al núcleo del reactor un resplandor azul, siempre y cuando su velocidad sea mayor a la velocidad de la luz en dicho medio [5] [7] [13]. Este efecto conocido como efecto Cherenkov, también observado en el reactor nuclear RP-10, es una radiación electromagnética de luz visible de color azul, el cual aumenta de intensidad a medida que aumenta la potencia del Reactor.

Se desarrolla esta tesis, para: “**Medir la potencia del Reactor Nuclear RP-10 mediante el Efecto Cherenkov**”, para el cual se va utilizar como sensor o detector del efecto Cherenkov una cámara de video instalada en el tanque principal del reactor nuclear. Por tratamiento de imágenes en su composición de color RGB, cuantificar la intensidad del efecto Cherenkov en la escala de azules, y mediante un algoritmo por comparación con los otros sistemas de medición de potencia, medir la potencia del reactor nuclear RP-10 mediante el efecto Cherenkov.

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Determinación del problema

En un reactor nuclear como en el RP-10, no existen los límites para los niveles de potencia que un reactor puede alcanzar [10]. Las condiciones de límites para una correcta operación, y para la seguridad nuclear vienen determinadas por parámetros relacionados a los sistemas de medición de potencia como el flujo de neutrones, la cantidad de fisiones y la cantidad de neutrones generados en el núcleo del reactor [15] [16] [20].

La potencia también determina el tiempo en que se va irradiar una muestra. Conociendo la cantidad de la muestra y la actividad radioactiva de la muestra que se quiere obtener, se irradia a un determinado tiempo y a una determinada potencia [20].

Uno de los requerimientos del diseño del Reactor Nuclear “RP-10” como provisión de los sistemas de seguridad es la “Redundancia” a fin de aumentar la fiabilidad de la función de seguridad. Otro de los requerimientos es la “Diversidad” para obtener distintos principios de funcionamiento [15]. Debido a estos requerimientos son necesarios varios sistemas de medición de potencia, con distintos principios de funcionamiento, y así obtener una diversidad de lecturas de la potencia. En el reactor nuclear “RP-10” actualmente la potencia se mide y monitorea principalmente de tres formas: potencia neutrónica, potencia térmica y potencia por ^{16}N (nitrógeno-16).

La potencia neutrónica o potencia por flujo neutrónico se mide por comparación con la corriente de salida de un detector de neutrones tipo cámara de ionización compensada instalada cerca del núcleo del reactor nuclear. La información que nos proporciona estos detectores presenta variaciones debido a fluctuaciones locales del flujo de neutrones térmicos, y al desplazamiento de las barras de control durante la operación [4] [21].

La potencia térmica es la potencia más determinante, es la potencia que se usa como referencia para calibrar los otros sistemas de medición de potencia. Su medición se realiza por cálculos mediante las leyes de la termodinámica aplicadas al núcleo relacionando el caudal del refrigerante con el incremento de temperatura usado para controlar las potencias altas (cercas a 2 MW) debido a la sensibilidad de los medidores de variación de temperatura en el núcleo [4] [17].

La potencia por ^{16}N (nitrógeno-16) monitorea la radiación γ que se genera cuando el oxígeno, que es componente del refrigerante (H_2O) del reactor, al pasar por el núcleo del reactor, sufre la reacción $\text{O}^{16}(\text{n},\gamma)\text{N}^{16}$. Este sistema de medición de potencia utiliza el principio empleado por Spracklen Howard que sirve para medir la radiación γ en su proceso de decaimiento que es de 7.14 segundos. Se puede medir potencias que no se puede medir por sistema de potencia térmica, pero según su diseño no podría soportar potencias muy elevadas [4] [26] [34].

Uno de los fenómenos observables en reactores nucleares tipo pileta, y también en el núcleo del reactor nuclear “RP– 10” es el efecto Cherenkov, una radiación de tipo electromagnética dentro del rango de la luz visible, caracterizado por un resplandor azul en torno al núcleo del reactor nuclear. El efecto Cherenkov es generado debido a las fisiones que emiten partículas beta de muy alta energía que alcanzan velocidades superiores al de la luz en el agua (mas no en el vacío) [5] [7] [8].

Cuando el reactor nuclear de investigación RP – 10 se encuentra en operación, lo que se puede observar del efecto Cherenkov es que es que la luminosidad azul aumenta conforme la potencia del reactor nuclear va aumentando.

No hay un medidor del efecto Cherenkov, solo se conoce que es una onda electromagnética dentro del espectro de la luz visible y de la radiación ultravioleta. Lo que se requiere es cuantificar la intensidad del efecto Cherenkov sobre una variable, por tratamiento de imágenes en su composición de colores RGB, midiendo solo la escala de azules.

Si ya se tuviera cuantificada la intensidad de la luminosidad del efecto Cherenkov mediante una variable, por comparación con los otros sistemas de medición de potencia, se podría hallar un algoritmo para el programa que permita medir la potencia del reactor nuclear RP–10 mediante el efecto Cherenkov.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema general

Debido a los requerimientos de diseño del Reactor Nuclear RP-10, y a la modernización de sus sistemas para aumentar su tiempo de vida. Se deben tener sistemas de medición de potencia del reactor, que sean adecuados, redundantes y diversos a fin de mantener la operatividad del reactor y garantizar la seguridad nuclear, radiológica y técnica.

¿Se puede desarrollar un nuevo sistema de medición de potencia para el Reactor Nuclear de investigación “RP-10” mediante el efecto Cherenkov?

1.2.2 Problemas específicos

- ❖ ¿Se puede cuantificar sobre una variable la intensidad del resplandor azul del efecto Cherenkov mediante tratamiento de imágenes, que nos va permitir calcular el algoritmo para medir la potencia del reactor nuclear RP-10?
- ❖ ¿Cómo mejorará la seguridad nuclear, radiológica y técnica al tener el sistema de medición de potencia del Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov?
- ❖ ¿Cuáles son los límites máximos y mínimos de potencia que puede medir el sistema de medición de potencia del Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov?

1.3 Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Tener sistemas de medición de potencia en el reactor nuclear de investigación RP-10 con diversos principios, diseñando un nuevo sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov.

1.3.2 Objetivos específicos

- ❖ Cuantificar sobre una variable la intensidad del resplandor azul del efecto Cherenkov mediante tratamiento de imágenes, que nos va permitir calcular el algoritmo para medir la potencia del reactor nuclear RP-10.

- ❖ Analizar en qué medida habrá mejoras en la seguridad nuclear, radiológica y técnica el tener un nuevo sistema de medición de potencia en el Reactor Nuclear de investigación RP-10 mediante el efecto Cherenkov.

- ❖ Encontrar los límites de potencias máximas y mínimas que puede mostrar el sistema de medición de potencia en el Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov.

1.4 Justificación del problema

Las razones que justifican el proyecto propuesto son:

1.4.1 Por su naturaleza

La importancia en el presente proyecto de investigación es mostrar que el efecto Cherenkov, un fenómeno físico producto de la interacción de partículas beta de muy alta energía a velocidades superiores a la luz en el agua, es un efecto que depende de los productos de fisión y por tanto se puede cuantificar para aprovechar como parámetro de medición para la instrumentación nuclear y para la lógica de seguridad de reactores nucleares como la medición de la potencia en el Reactor Nuclear RP10.

1.4.2 Por su magnitud

El Reactor Nuclear de investigación RP-10 fue construido en conjunto por la Comisión Nacional De Energía Atómica Argentina (CNEA) y el Instituto Peruano De Energía Nuclear (IPEN) en virtud de un convenio entre las dos partes para una vida útil de 30 años y fue puesto en crítico por primera vez el 30 de noviembre de 1988 a una potencia de 4.7 MW.

El reactor nuclear RP-10, está cerca a cumplir 30 años de vida útil. Desde su puesta en crítico por primera vez, la medición de la potencia se ha realizado por potencia neutrónica y potencia térmica. Recién el 2011 se implementó el sistema de medición de potencia por ^{16}N (nitrógeno-16).

La tecnología ha cambiado mucho desde la puesta en crítico del reactor nuclear RP-10, ahora existen herramientas más eficientes, para poder

interpretar mejor los fenómenos físicos, a nivel nuclear. Por eso implementar el diseño del sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov, por tratamiento de imágenes va formar parte de la modernización de la instrumentación, para poder ampliar la vida útil del reactor nuclear RP-10.

1.4.3 Por su trascendencia

Hasta el día de hoy se depende mucho de tecnología extranjera, sobre todo en lo que se trata de la instrumentación nuclear. Y sobre todo de tecnología argentina, a pesar de la transferencia tecnológica hace 30 años,

Mejorar la seguridad nuclear, radiológica y técnica del Reactor Nuclear RP-10 diseñando un nuevo sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov, implica una solución de carácter nacional, desarrollando un sistema con tecnología moderna que está a nuestro alcance de acuerdo a las necesidades que se tiene.

1.4.4 Por su vulnerabilidad

Este proyecto justifica su vulnerabilidad, por ser un proyecto de interés para el Reactor Nuclear RP-10, cuenta con financiamiento del Instituto Peruano de Energía Nuclear para realizar la investigación, el desarrollo y posteriormente la implementación del nuevo sistema de medición de potencia mediante el Efecto Cherenkov.

Cabe señalar que el investigador cuenta con la experiencia que el caso amerita, y también con autorización de acceso a las instalaciones del tanque principal del Reactor Nuclear RP-10 en el que se va desarrollar la parte experimental y las pruebas necesarias.

1.4.5 Por su aporte

- **Científico**

Con el desarrollo de esta tesis, podemos adquirir mayores conocimientos al cuantificar el efecto Cherenkov bajo un parámetro medible. Se podrá analizar su comportamiento con respecto a los parámetros que intervienen en la instrumentación nuclear y la seguridad del reactor nuclear, y sobre todo obtener la medición de potencia del Reactor Nuclear RP-10 que es el principal objetivo de esta investigación.

- **Tecnológico**

Esta tesis busca innovar en el sector de la ingeniería nuclear, desarrollando un nuevo sistema de medición de potencia mediante el Efecto Cherenkov, por tratamiento de imágenes, que es posible hoy en día debido a los avances tecnológicos, en comparación con la tecnología de los años 80 con el que cuenta la instrumentación nuclear del Reactor Nuclear RP10 basado principalmente en instrumentación analógica y tecnología CMOS.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de estudio

Cuando Pavel Alekseyevich Cherenkov, físico de origen Soviético estudiaba su doctorado en Física Pyotr Lebedev en Moscú, llamó la atención de su supervisor Vavilov por la observación de un resplandor azul que no podía explicar. Vavilov supuso que era imposible que nadie hubiese observado este fenómeno antes, le aseguró a Pavel que los Curie deberían haberlo notado, pero curiosamente nadie lo había estudiado a fondo. Allí fue cuando Vavilov tuvo uno de sus momentos que lo identificaban: le pidió a su estudiante determinar todas las propiedades de esta luz azul asegurándole que esa radiación era algo más que simple luminiscencia. Esta investigación le permitió obtener el premio Nobel de Física en el año 1958.

Desde finales de los 90, se ha venido estudiando e investigando la posibilidad de implementar un nuevo sistema de medición de potencia en el Reactor Nuclear RP-10, es ahí que se comienza a diseñar el sistema de medición por nitrógeno-16, que recién se termina de instalar el año 2014.

Al igual que a Pavel, la primera impresión que se tiene al ver el núcleo del reactor nuclear RP-10, cuando este se encuentra en operación, es el resplandor azul conocido como efecto Cherenkov, donde su intensidad de luminosidad azulada aumenta conforme el reactor aumenta de potencia, disminuye cuando el reactor baja de potencia.

2.2 Marco conceptual

2.2.1 Reactor Nuclear

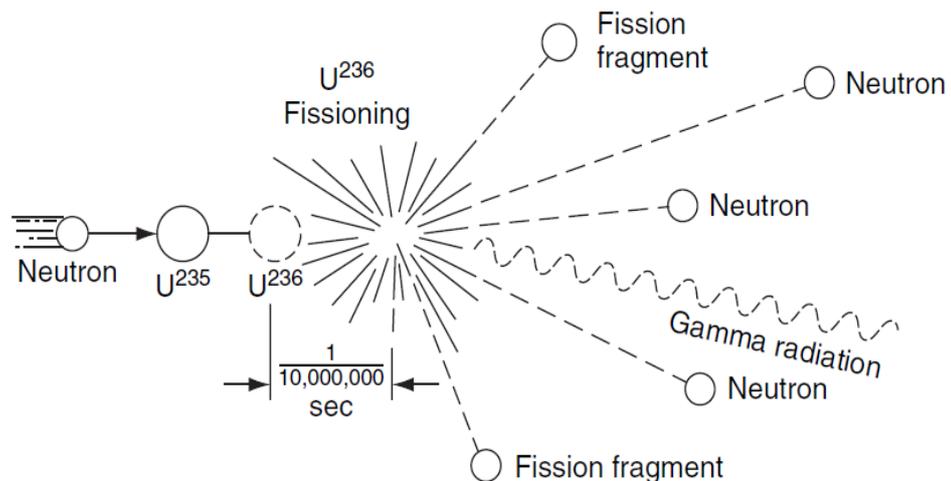
a. Fisión Nuclear

En el proceso de fisión, el núcleo compuesto excitado, que se forma tras la absorción de un neutrón, se escinde en dos núcleos más ligeros denominados fragmentos de fisión [3] [10] [27].

Solamente tres núclidos (U^{233} , U^{235} , Pu^{239}), con estabilidad suficiente para que puedan ser almacenados durante largo tiempo, son fisionables, por neutrones de todas las energías. Y solamente el U^{235} existe en la naturaleza, mientras los otros dos se producen artificialmente [10].

FIGURA N° 2.1.

UNA REACCIÓN DE FISIÓN.



FUENTE: LEWIS Elmer E. **Fundamentals of Nuclear Reactor Physics.** Academic Press. USA. 18th January 2008.

Considerando una reacción de fisión para el U^{235} (Véase la figura 2.1. en la página 16). De la reacción se generan aproximadamente 200MeV de energía, 2 o tres neutrones con 2MeV, dos fragmentos de fisión, y una serie de rayos gamma y neutrinos [27].

Los fragmentos de fisión sufren decaimiento radioactivo produciendo productos de fisión adicionales. La energía producida por la fisión, los neutrones y los productos de fisión desempeñan papeles críticos en la física de los reactores nucleares [10] [25] [27].

De una fisión nuclear aparecen como energía cinética de los fragmentos de fisión, neutrones y rayos gamma. Los productos de fisión al sufrir decaimiento radioactivo generan partículas beta, rayos gamma y neutrinos [27].

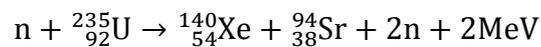
Estas energías cinéticas que aparecen tienen aproximadamente 200MeV de energía liberada, y se disipa al calor casi instantáneamente a medida que los productos de reacción interactúan con el entorno medio de comunicación [27].

Los dos o tres neutrones nacidos con cada fisión sufren una serie de colisiones de dispersión con núcleos antes de terminar sus vidas en colisiones de absorción, lo que en muchos casos hace que el núcleo

absorbente se vuelva radiactivo. Si el neutrón se absorbe para producir más fisiones, con frecuencia hará que el núcleo de la fisión produzca los neutrones de la próxima generación. Dado que este proceso puede repetirse para crear sucesivas generaciones de neutrones, se dice que existe una reacción en cadena de neutrones [29] [27].

Productos de Fisión

Por la fisión nuclear se generan muchos pares diferentes de fragmentos de fisión. En la mayoría de los casos, uno tiene una masa sustancialmente más pesada que la otra, aproximadamente en relación de 3 a 2 [10] [27]. Por ejemplo, una reacción de fisión típica es:



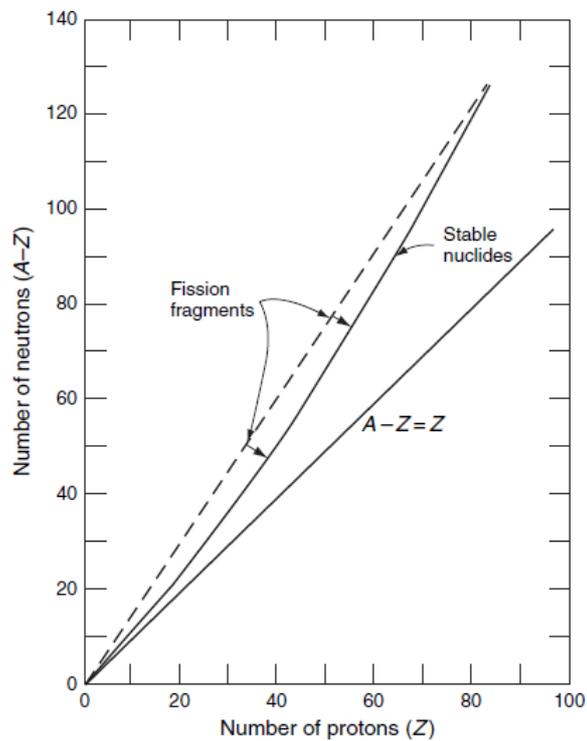
Los fragmentos de fisión son inestables porque tienen relaciones de neutrones a protones demasiado grandes. La Figura 2.2, que muestra neutrones versus protones, indica una curvatura hacia arriba en la línea de núcleos estables, indicando que la proporción de neutrones a protones aumenta por encima de 1: 1 a medida que el número atómico se hace más grande.

Cada uno de estos decaimientos tiene una semivida característica. Con algunas notables excepciones, las semividas más tempranas en la cadena de desintegración tienden a ser más cortas que las que ocurren más tarde.

Los fragmentos de fisión tomados junto con sus productos de descomposición se clasifican como productos de fisión [27].

FIGURA N° 2.2.

INESTABILIDAD DEL FRAGMENTO DE FISIÓN.



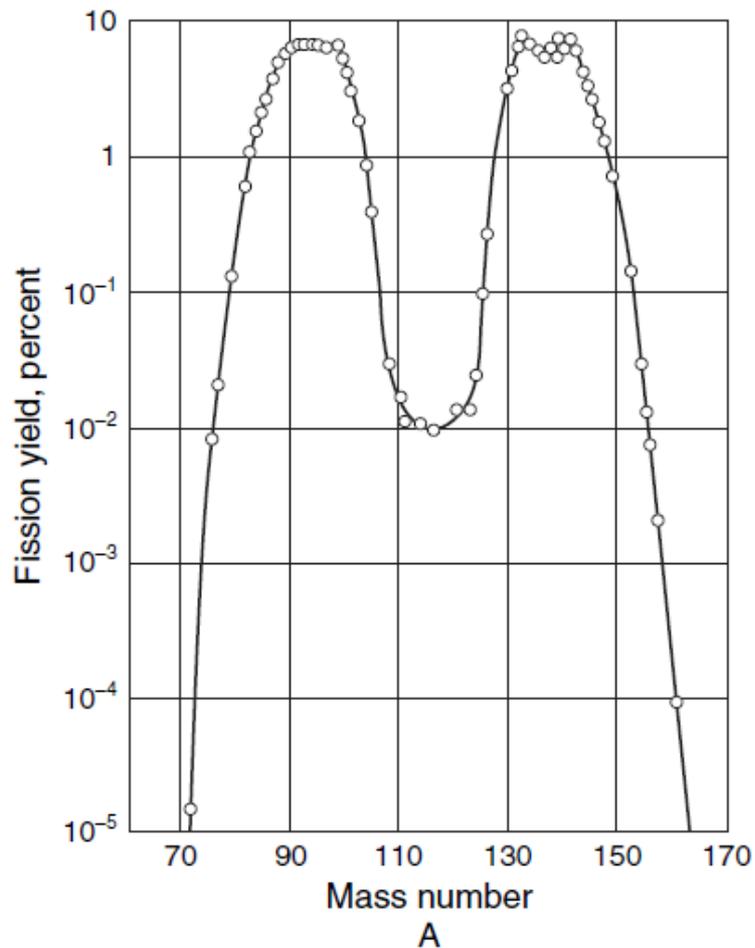
FUENTE: LEWIS Elmer E. **Fundamentals of Nuclear Reactor Physics.** Academic Press. USA. 18th January 2008.

La Figura 2.3. muestra la distribución de frecuencias de masa para el uranio 235, que es típica para otros materiales fisionables, siempre que los neutrones que causan la fisión tengan energías de unos pocos eV o menos. Casi todos los productos de fisión se dividen en dos grandes grupos [27].

El grupo ligero tiene números de masa entre 80 y 110, mientras que el grupo pesado tiene números de masa entre 125 y 155. La probabilidad de que las fisiones produzcan productos de igual masa aumenta con la energía del neutrón incidente y el valle en la curva casi desaparece para Fisiones causadas por neutrones con energías en las decenas de MeV.

FIGURA N° 2.3.

PRODUCCIÓN DE PRODUCTOS DE FISIÓN DE URANIO-235



FUENTE: LEWIS Elmer E. **Fundamentals of Nuclear Reactor Physics.** Academic Press. USA. 18th January 2008.

b. Definición de un Reactor Nuclear

Es una instalación física donde se puede producir, mantener y controlar reacciones nucleares de fisión en cadena. Se utiliza un combustible adecuado, un refrigerante, elementos de control y moderadores en el caso de reactores térmicos. Algunos reactores pueden disipar su energía, otros sin embargo utilizan el calor para producir energía eléctrica [10] [25] [29].

c. Componentes de un Reactor Nuclear

Las reacciones ocurren en el núcleo del reactor. El objetivo principal es aumentar su potencia, de modo que los componentes cumplen un rol importante por la necesidad de poder controlar la generación de energía. A continuación, sus componentes [3] [8] [10] [16].

El combustible

Es un material fisiónable en cantidades específicas, de acuerdo al tipo de reactor, dispuestas en forma tal, que se alcance la masa crítica [10], y colocado de tal forma que sea posible extraer con rapidez y facilidad la energía generada.

Los combustibles en un reactor se encuentran en forma sólida, siendo el más utilizado el uranio bajo su forma isotópica de U-235, por lo general en composiciones químicas como óxido de uranio (U_3O_8) y actualmente siliciuro de uranio (U_3Si_2).

Barras de Control

Los reactores poseen un sistema de control que permite iniciar o detener las fisiones nucleares en cadena, permiten efectuar cambios rápidos de potencia y su parada eventual en caso de emergencias. Están fabricadas con elementos que tienen sección eficaz grande, y por tanto son absorbentes de neutrones.

Generalmente las barras de control se fabrican de carburo de boro o aleación de plata, indio y cadmio. La captura neutrónica se realiza subiendo o bajando las barras de control, el cual hace que aumente o disminuya la reactividad.

Moderador

Los neutrones producidos en la fisión se denominan neutrones rápidos y poseen una elevada energía (2Mev). A esta energía la probabilidad de que ocurran más fisiones es muy baja, por tanto, es conveniente disminuir su velocidad de modo que aumente la probabilidad de que fisiones otros átomos y no se detenga la reacción en cadena.

Para disminuir su velocidad y obtener neutrones térmicos (0.25ev) es necesario que pierda su energía mediante choques con átomos de otro material denominado moderador. Entre los moderadores más utilizados están el agua pesada, el agua ligera, el grafito y la parafina.

Refrigerante

El calor generado por las fisiones se debe absorber y extraer del núcleo del reactor. Para lograr este proceso, el núcleo debe estar sumergido en el material refrigerante para que absorba y transporte dicho calor. El refrigerante debe ser anticorrosivo, tener una gran capacidad de absorción calorífica y tener pocas impurezas. Los refrigerantes más usuales son gases, como el anhídrido carbónico y el helio, y líquidos como el agua ligera y el agua pesada.

Reflector

En una reacción nuclear, debido a que los neutrones se generan en distintas direcciones, hay cierto número de neutrones que tiende a escapar de la región donde ésta se produce. Esta fuga neutrónica puede minimizarse con la existencia de un medio reflector que rodea al núcleo y lo canalice hacia la región donde se producen las reacciones nucleares.

El reflector también debe tener una baja sección eficaz de captura para no reducir el número de neutrones y que se reflejen el mayor número posible de ellos. La elección del material depende del tipo de reactor. Si tenemos un reactor térmico, el reflector puede ser el moderador, pero si tenemos un reactor rápido el material del reflector debe tener una masa atómica grande para que los neutrones (por dispersión elástica), se reflejen, en este caso el reflector podría ser el berilio.

Materiales Estructurales

A los materiales que se encuentran como parte o alrededor del núcleo del reactor. Estos materiales que tienen que ser resistentes a la oxidación, a las radiaciones nucleares de altas dosis, o tengas periodos cortos de semidesintegración se denominan estructurales como el aluminio, el acero inoxidable, el circonio y el magnesio.

Blindaje

Cuando el reactor está en operación, se generan gran cantidad de todo tipo de radiación, en todas las direcciones. Por seguridad radiológica para protección de los trabajadores de las instalaciones de las radiaciones generadas por los productos de fisión, se colocan blindajes biológicos, que rodean el reactor. Los materiales más utilizados en la construcción de blindajes para reactores nucleares son el hormigón, el agua y el plomo.

d. Clasificación de Reactores Nucleares

Existen dos tipos de reactores [10] [29]:

- **Reactores de Investigación**

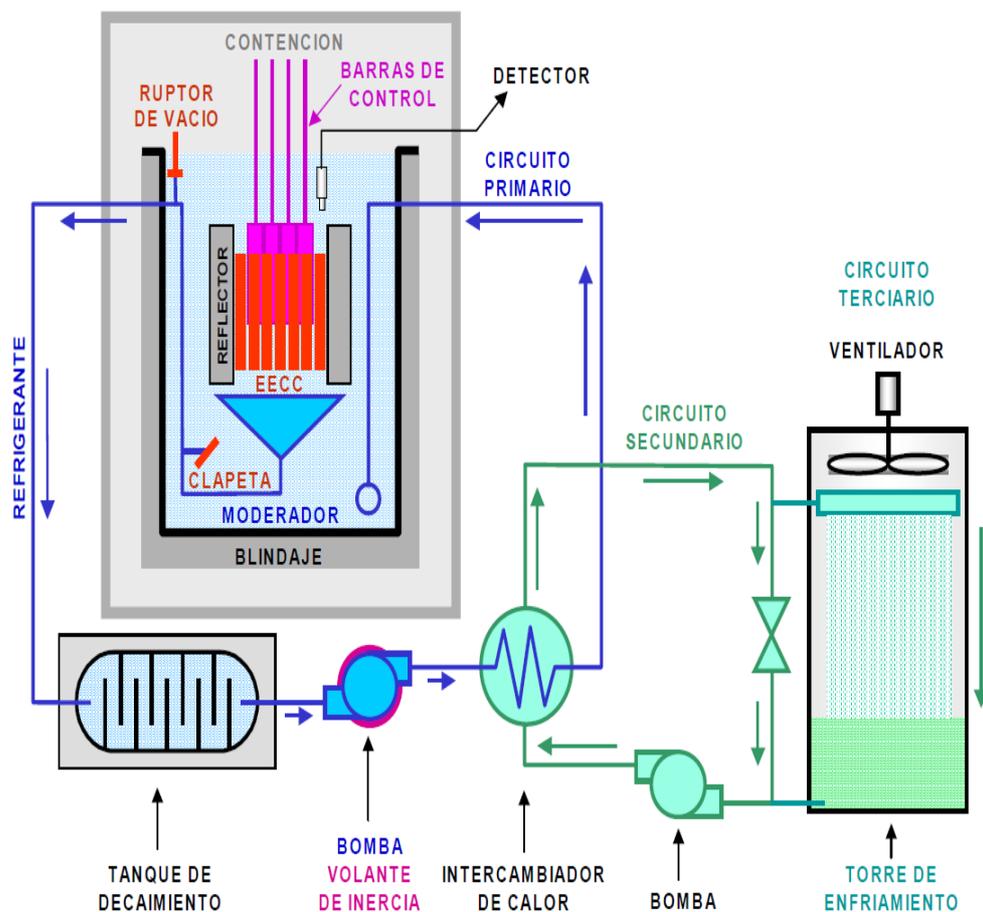
Utilizan el reactor como fuente de neutrones generados de la fisión para producir radioisótopos, o para estudiar el comportamiento de diversos materiales para temas de investigación básica y aplicaciones tecnológicas.

- **Reactores de Potencia**

Estos reactores en general generan gran cantidad de calor por los productos de fisión para generar energía eléctrica, desalinización de agua de mar, calefacción, o bien para sistemas de propulsión de naves espaciales.

FIGURA N° 2.4.

REACTOR NUCLEAR DE INVESTIGACIÓN



FUENTE: AGUIRRE ANCIETA Álvaro. **Fundamentos de la ingeniería y de la seguridad de los reactores.** IPEN. PERÚ. 11 de setiembre de 2017.

Existen otros criterios para clasificar diversos tipos de reactores [3]:

- **Según la velocidad que inducen la fisión**

- Reactores Rápidos
- Reactores Intermedios
- Reactores Lentos

- **Según el combustible utilizado**

- Reactores de Uranio natural.
- Reactores de bajo enriquecimiento (1 al 5% U^{235})
- Reactores de mediano enriquecimiento (2 al 40% U^{235})
- Reactores de alto enriquecimiento (mayor a 40% U^{235})

- **Según su geometría.**

- Reactores cilíndricos
- Reactores esféricos.
- Reactores paralelepípedos
- Otras geometrías.

- **Según su potencia**

- Reactores de bajo flujo (10^6 neutrones/cm².s), baja potencia.
- Reactores de mediano flujo (10^{12} neutrones/cm².s), baja potencia.
- Reactores de alto flujo (10^{14} neutrones/cm².s), mediana potencia.
- Reactores de alto flujo (10^{15} neutrones/cm².s), alta potencia.

- **Según su utilización**

- Reactores de investigación.
- Reactores de producción de radioisótopos.
- Reactores de capacitación.
- Reactores de prueba de materiales.

2.2.2 Reactor Nuclear RP10

a. Historia del Reactor Nuclear RP-10

El 25 de mayo de 1968 se firma en Lima el Acuerdo sobre cooperación en el campo de los usos pacíficos de la energía nuclear entre los gobiernos de la Argentina y del Perú. El 15 de noviembre de 1977 se firma el contrato entre la Comisión de Energía Nuclear (CNEA) y el Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN) para la provisión del Centro de Investigaciones Nucleares del Perú, que incluía un reactor de investigación y producción de radioisótopos denominado “RP-10”, una planta de producción de radioisótopos y el Centro de Protección Radiológica y Seguridad Nuclear [14].

La denominación “RP-10” es debida a las iniciales de Reactor Peruano (RP) y el “10” es porque se trataba del décimo emprendimiento realizado por los argentinos luego de “RA-1”, “RA-2” y “RA-9” y también debido a que alcanza una potencia nominal de 10 mega watts de potencia térmica [14].

El “RP-10” llegó a la primera puesta en crítico el día 30 de noviembre del año 1988, a las 19:45 horas, a una potencia estimada de 4.7 MW. La inauguración formal del Centro de Investigaciones Nucleares del Perú (CNIP) hoy denominado “RACSO” se realizó el día 19 de diciembre de 1988 [14].

b. Descripción del Reactor Nuclear RP-10

Es un reactor del tipo piscina (tanque abierto), con elementos combustibles tipo MTR (Material Testing Reactor) que utiliza combustible enriquecido al 19.75% en U^{235} en forma de óxido de uranio (U_3O_8), es moderado y refrigerado con agua liviana, utiliza como reflectores se utilizan elementos de grafito y berilo. La potencia nominal es 10 MW térmicos [16].

Su finalidad es la producción de radioisótopos para aplicaciones médicas e industriales, activación neutrónica, radio neurografía, difracción de neutrones, aplicaciones basada en haces de neutrones y estudios de diversos materiales para temas de investigación y aplicaciones tecnológicas [14] [19].

También el mismo “RP-10” es un instrumento utilizado en experiencias de seguridad y capacitación del personal en diversas aplicaciones pacíficas de la energía nuclear.

FIGURA N° 2.5.
REACTOR NUCLEAR RP-10



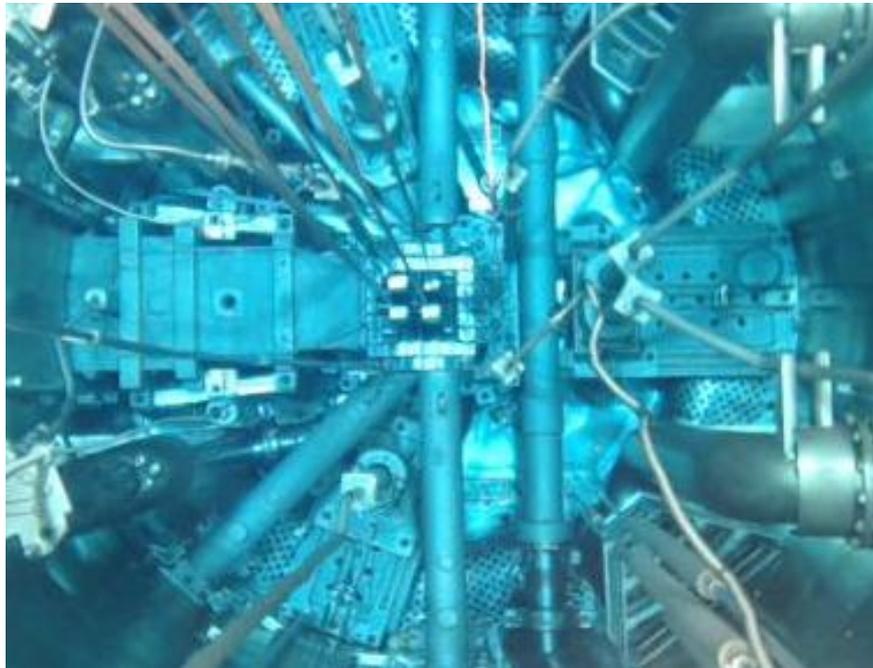
FUENTE: Fotografías tomadas el 15 de mayo del 2017.

c. Núcleo del Reactor

Se encuentra constituido por 24 elementos combustibles normales, 5 elementos combustibles de control y una caja central de irradiación. Esta configuración se complementa con los reflectores de grafito (28) y Berilo (10) entre las cuales se insertan cajas denominadas posiciones de irradiación externa, también entre estos elementos se encuentra el elemento que aloja la barra de control fino [16].

FIGURA N° 2.6.

NÚCLEO DEL REACTOR NUCLEAR RP-10



FUENTE: Fotografía tomada el 7 de noviembre del 2016.

Cada placa de un elemento combustible consiste de una dispersión de aluminio en U308 la densidad de uranio es de 2.296 g/cm. La carga para cada placa es de 17.5 g U235. El enriquecimiento es de 19.75 (LEU) porcentaje en peso de U235.

Un elemento combustible normal tiene 16 placas, mientras que uno de control solo tiene 12 para permitir la introducción de las barras de control conformadas por una aleación de plata, indio y cadmio. El núcleo puede adoptar distintas configuraciones de sus elementos combustibles hasta llegar a la configuración de trabajo [16].

d. Características más relevantes del Reactor Nuclear RP-10

TABLA N° 2.1

DATOS MÁS RELEVANTES DEL RP-10.

| DATOS GENERALES | |
|--|--|
| 1. Tipo de reactor | Tanque abierto (piscina) con combustible de Uranio enriquecido al 19.75% y tipo MTR. Moderado y refrigerado con agua liviana, reflejado con grafito y berilio. |
| 2. Potencia nominal | 10 MW |
| 3. Reflector | Grafito, agua liviana y berilio |
| 4. Blindaje | Laterales: Agua + Hormigón. Parte superior: Agua Base: Agua + Hormigón |
| 5. Moderador | Agua desmineralizada. |
| 6. Flujo neutrónico (núcleo 21, según cálculo) | $\approx 7.5 \times 10^{13}$ n/cm ² seg. (térmico medio del núcleo a 10 MW) |
| 7. Potencia específica | 1.29 MW/Kg U235 |
| 8. Recipiente | 11 m (altura) x 4 m (diámetro) |
| 9. Forma y Dimensiones | El núcleo puede adoptar distintas configuraciones |
| 10. N° de cajas combustibles | Mínimo: 21 cajas (normales y de control) Máximo: 36 cajas (normales y de control) |
| 11. Masa Crítica | ≈ 4.0 Kg. de U235 |

FUENTE: Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP-10.

CAPITULO 5: EL REACTOR (Informe interno)

e. **Sistemas de medición de Potencia**

En el reactor nuclear “RP-10” actualmente la potencia se mide y monitorea principalmente de tres formas: potencia neutrónica, potencia térmica y potencia por ^{16}N (nitrógeno-16).

Potencia Neutrónica

Mediante un amplificador se procesa la corriente entregada por un detector de neutrones tipo cámara de ionización, entregando a su salida tres tipos de información:

- Señal proporcional al flujo neutrónico.
- Señal proporcional al logaritmo del flujo neutrónico.
- Señal proporcional a la derivada del logaritmo del flujo neutrónico.

La corriente de entrada proveniente de la cámara varía entre 10^{-11} y 10^{-4} Amper. En el panel frontal del equipo se encuentran los instrumentos que exhiben las respectivas salidas, y en uno de ellos se muestra la potencia que es proporcional al amplificador lineal de la cadena de marcha 4.

El medidor de potencia es una señal analógica proporcional al flujo neutrónico en la última década de potencia. Con entrada nula, su salida es de +0.5, y con el 150% de plena potencia, su salida corresponde a +5.0 voltios.

Potencia Térmica

El calor generado es únicamente producido en el núcleo del reactor como consecuencia de las reacciones nucleares que ahí se producen, toda esta energía es transferida al refrigerante, produciéndose un estado estacionario que determina el equilibrio de la operación del reactor.

La potencia térmica es proporcional al caudal, densidad del agua, calor específico del agua y la variación de la temperatura en el núcleo.

La potencia térmica se evalúa por [17]:

$$P_n = Q_t \cdot \rho \cdot C_p \cdot \Delta T_n$$

Dónde:

P_n : Potencia térmica [MW]

\dot{m} : Flujo másico [Kg/h]

C_p : Calor específico del agua [4.18 kJ/kg.°C]

ΔT_n : Variación de temperatura en el núcleo [°C]

Q_t : Caudal de refrigerante [m³/h]

ρ : Densidad del agua [1000 kg/m³]

La densidad del agua y su calor específico son constantes, por lo que la potencia térmica del reactor está definida solamente en función de la variación de la temperatura del refrigerante en el núcleo y el caudal total del sistema primario de refrigeración [17].

Potencia por ^{16}N (nitrógeno-16)

El principio de funcionamiento se basa en que el oxígeno que es componente del refrigerante (H_2O) del reactor, al pasar por el núcleo, sufre la reacción $\text{O}^{16}(\text{n},\gamma)\text{N}^{16}$.

El N^{16} es un emisor de γ con periodo de decaimiento de 7,14 segundos, será detectado por una cámara de ionización gamma, el que está ubicado a la salida del refrigerante del núcleo del reactor, y polarizado por una fuente de alta tensión de 500 voltios. Su tensión de salida se amplifica y se muestra en un display.

Las condiciones para que el sistema nos proporcione información de potencia del reactor se dan solo cuando se enciende por lo menos una bomba del sistema primario de refrigeración.

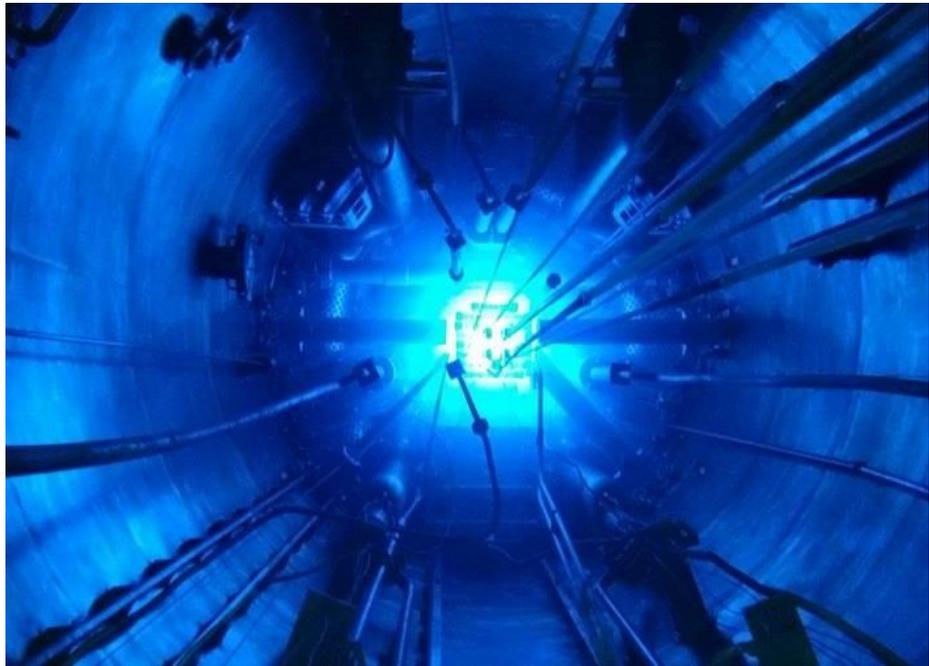
2.2.3 Efecto Cherenkov

a. Generación del Efecto Cherenkov

En los reactores de investigación “tipo pileta”, cuando el reactor opera a potencias superiores a 100 KW [5], o en las piscinas de almacenen subacuáticos de elementos combustibles gastados de reactores de potencia, se observa en el agua un resplandor azul [10], característico en los reactores nucleares en torno a su núcleo, que se conoce como radiación de Cherenkov o Cerenkov.

FIGURA N° 2.7.

EFEECTO CHERENKOV EN REACTOR NUCLEAR RP-10



FUENTE: Fotografía tomada el 5 de enero del 2017 a 4,7 MW de potencia

Esta radiación recibe el nombre del físico soviético Pavel Alekseyevich Cherenkov por haber descubierto junto al físico Sergéi Ivánovich, cuando observaba la emisión de luz azul de una botella de agua sometida a un bombardeo radiactivo de un reactor en 1934, el cual le valió el premio Nobel de Física en 1958 [11].

De uno de los dos postulados de la teoría de la relatividad de Einstein, se conoce que la velocidad de la luz en el vacío es un límite cósmico, es decir que la velocidad de la luz desempeña el papel de una velocidad límite que no puede alcanzar ni sobrepasar ningún cuerpo real [13] [31].

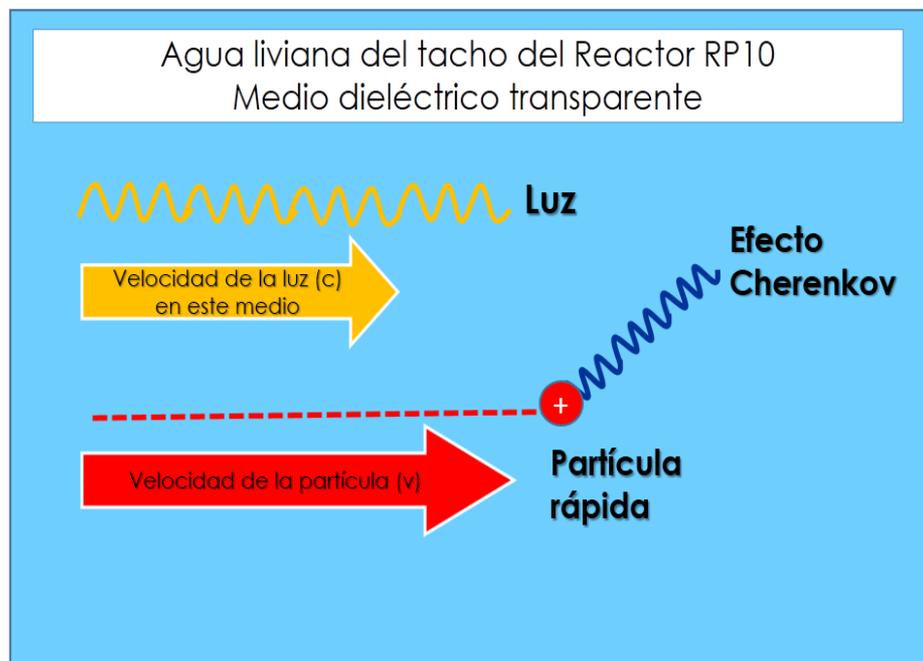
La velocidad de la luz en materiales transparentes como el agua o vidrio no es la misma que en el vacío, su velocidad es menor debido al índice de refracción del material. La velocidad en un material se calcula [6]:

$$v_m = \frac{c}{n}$$

De donde c es la velocidad de la luz y n es el índice de refracción del material. Para el agua que tiene índice de refracción 1.33 a 20 °C [6], la velocidad de la luz viene a ser 225 000 km/s.

FIGURA N° 2.8.

EL EFECTO CHERENKOV



FUENTE: Elaboración propia

Es ahí que la radiación de Cherenkov ocurre, cuando las partículas como las partículas beta de muy alta energía, emitidas debido a los productos de fisión [7] [10], se propaga en un medio transparente como el agua con una velocidad superior a la velocidad de la luz en dicho medio (aunque menor al vacío). tal como muestra la figura n° 2.8.

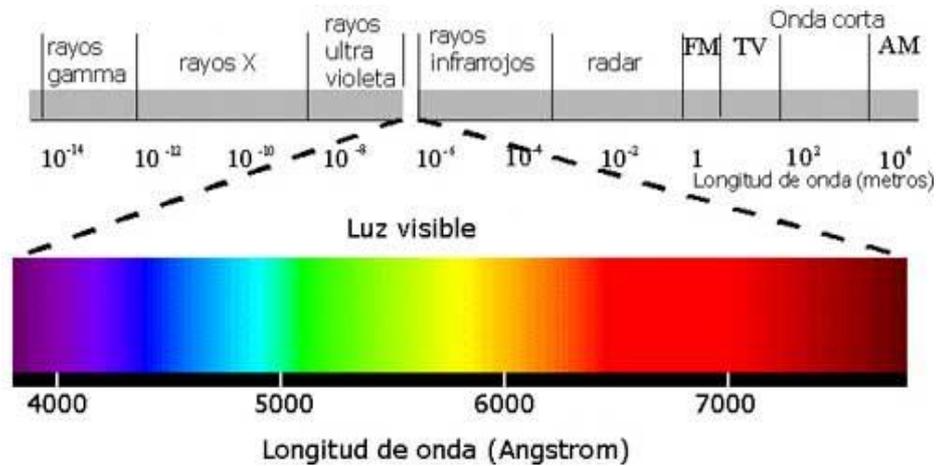
La explicación en este caso es el siguiente: cuando una partícula beta se mueve al interior del agua a velocidades menores a 225 000 km/s, modifica su campo eléctrico al rededor. Es decir, los electrones más externos de los átomos cercanos son repelidos y se alejan, y cuando ya hayan pasado, regresan a su posición inicial debido a la atracción del átomo creando un movimiento vaivén en los electrones circundantes.

Ahora cuando la velocidad de la partícula beta es más que 225 000 km/s, la velocidad de la partícula está superando la velocidad de la luz en el agua, por lo que las ondas electromagnéticas no tienen tiempo de alejarse antes que se genere la siguiente onda electromagnética, comenzando a superponerse uno encima del otro, generando el Efecto Cherenkov [5].

Entonces la radiación de Cherenkov, son radiaciones electromagnéticas de distintas frecuencias fundamentalmente ultravioleta, pero también tiene frecuencias suficientes para ser radiación visible, por lo que resplandor es observable a simple vista con nuestros ojos.

FIGURA N° 2.9.

ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO



FUENTE: Espectro electromagnético disponible en <https://sobrecuriosidades.com/wp-content/uploads/2014/02/Espectro-electromagn%C3%A9tico.jpg>

La radiación Cherenkov tienen unas frecuencias de entre 350 a 500 nanómetros de longitud de onda, por lo que el efecto no solo abarca el espectro de luz visible sino también los rayos ultravioletas, es debido a eso que la radiación característica del Cherenkov sea de color azulado [5] [7] [31].

Cuando un electrón o cualquier otra partícula cargada se mueve por el interior de un aislante, modifica el campo eléctrico a su alrededor. Es decir, según pasa el electrón, los electrones más externos de los átomos cercanos son repelidos por él, de modo que se alejan del átomo. Pero cuando ya ha pasado, vuelven a su posición inicial, pues el átomo los

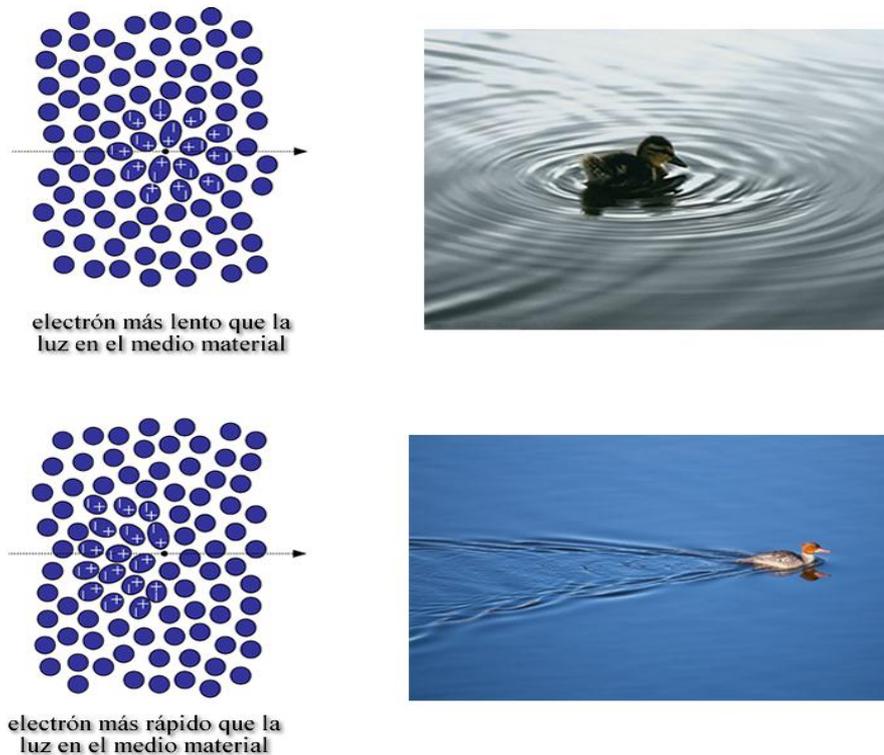
sigue atrayendo igual que antes. Cuando pasa la partícula cargada, se crea un movimiento de vaivén en los electrones circundantes [5].

Pero ¿qué sucede si el electrón va más rápido que la luz en el agua? Entonces estas ondas electromagnéticas no tienen tiempo de alejarse antes de que se genere la siguiente, y se “suben unas encima de otras” [5].

b. Comparación con otros fenómenos

FIGURA N° 2.10.

ANALOGÍA PARA EL EFECTO CHERENKOV



FUENTE: Conexión Casual. **La majestuosa Radiación de Cherenkov.** Disponible en: <https://conexioncausal.wordpress.com/2014/11/01/la-majestuosa-radiacion-de-cherenkov/>.

El efecto Cherenkov es parecido a cuando un pato se mueve lentamente en una laguna: las ondas pueden verse en el agua emitidas en todas direcciones desde el lugar donde se mueve el pato, pero a grandes distancias el efecto desaparece porque las ondas se cancelan mutuamente [1].

Similar es el fenómeno que ocurre cuando un avión se mueve más rápido que el sonido, produciendo una fuerte onda formada por la suma de las anteriores denominada *onda de choque*, comúnmente denominada boom sónico [1].

c. Utilidades prácticas

La comprensión final de las causas del efecto estudiado, y la evidencia de que éste se produce también en la atmósfera (un medio en el cual la luz también viaja más lentamente que en el vacío) dio la idea a muchos científicos de utilizar aparatos que permitieran detectar y estudiar partículas hiperlumínicas en el agua o aire que nos rodea, mediante detectores que reconocen el tipo de partícula y determinan cuál es su velocidad [5].

Todas las sondas soviéticas los llevan a bordo desde el lanzamiento del Sputnik 3, ya que son una excelente manera de detectar y medir partículas de alta velocidad. Además, en los reactores nucleares, los colores de esta

radiación proporcionan información valiosa sobre cómo está ocurriendo la fisión del combustible en el reactor.

Detectores altamente sensibles pueden monitorear niveles muy bajos de radiación Cherenkov, invisible a nuestros ojos. El efecto también permite detectar materiales combustibles nucleares y, sobre todo, asegurar si han sido o no sometidos a irradiaciones ionizantes [5].

2.2.4 Tratamiento de Imágenes

El tratamiento de imágenes agrupa a varias ciencias tales como óptica, electrónica, matemática, fotografía e informática, y tiene por objeto modificar características de la imagen capturada.

El tratamiento de imágenes tiene que ver con la adquisición, transmisión, procesamiento y representación de las imágenes. Las técnicas de proceso de imágenes se utilizan para mejorar la apariencia visual de las imágenes para un observador y para poder analizar convenientemente el contenido de la imagen adquirida de cara al objetivo que se tiene sobre él.

a. Imagen digital

Toda información representada por una serie de pulsos eléctricos discretos basados en un sistema binario (ceros y unos). Esta información

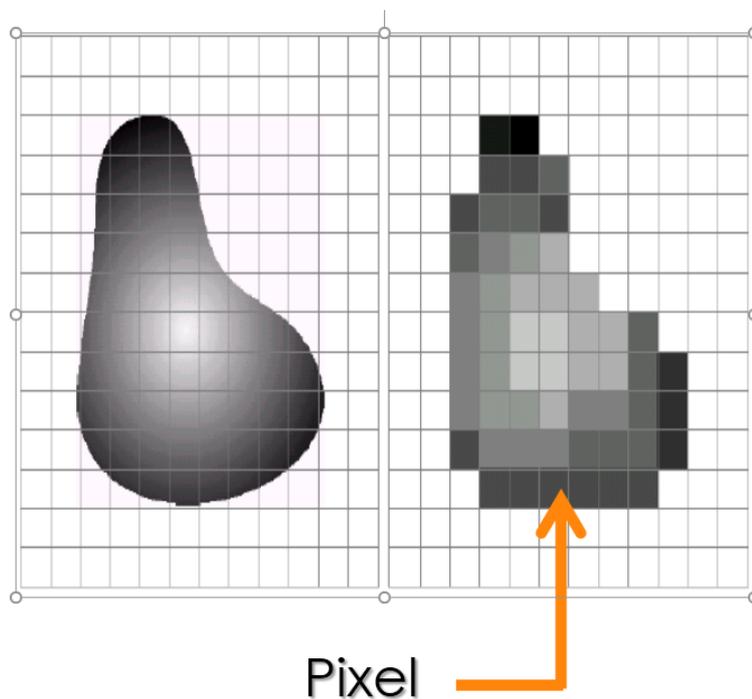
es interpretada correctamente por una computadora, las copias digitales son perfectas y su reproducción es lograda sin errores.

b. Pixel

El píxel es la unidad mínima de visualización de una imagen digital. Si aplicamos el zoom sobre ella observaremos que está formada por una parrilla de puntos o píxeles. Las cámaras digitales y los escáneres capturan las imágenes en forma de cuadrícula de píxeles.

FIGURA N° 2.11.

ADQUISICIÓN Y DIGITALIZACIÓN



FUENTE: MEJIA V. José. **Apuntes de Procesamiento digital de Imágenes.** Universidad Autónoma de San Luis de Potosi. 2005. Disponible en: http://read.pudn.com/downloads159/ebook/711796/Procesamiento_Digital_de_Imágenes.pdf

c. RGB

Cada color se forma por combinación de tres canales. Cada canal se corresponde con un color primario: **R**ed (rojo), **G**reen (verde), y **B**lue (azul). Asigna un valor de intensidad a cada color que oscila entre 0 y 255. De la combinación de estos colores primarios, dependiendo a que escala se encuentren surgen distintos colores.

2.2.5 Software para tratamiento de imágenes

a. Matlab

MATLAB (abreviatura de MATrix LABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas de Unix, Windows y Apple.

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes.

Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las cajas de herramientas (toolboxes). Para el caso de manipulación de imágenes, adquisición y tratamiento para procesamiento digital se emplea el toolbox "Image Processing".

Una imagen de color RGB se representa por tres matrices bidimensionales, correspondientes a los planos R, G y B. Para obtener los planos RGB se ejecutan los comandos:

```
>> Im_R = f(:,:,1)
```

```
>> Im_G = f(:,:,2)
```

```
>> Im_B = f(:,:,3)
```

b. Python

Python es un lenguaje de programación poderoso y fácil de aprender. Cuenta con estructuras de datos eficientes y de alto nivel y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos.

La elegante sintaxis de Python y su tipado dinámico, junto con su naturaleza interpretada, hacen de éste un lenguaje ideal para desarrollo rápido de aplicaciones en diversas áreas y sobre la mayoría de las plataformas.

OpenCV

(Open Source Computer Vision) es una librería software open-source de visión artificial y machine learning. Es una biblioteca open source para C/C++ para tratamiento de imágenes y visión computarizada, desarrollada inicialmente por Intel.

La librería tiene más de 2500 algoritmos, que incluye algoritmos de de visión artificial para usar.

Estos algoritmos permiten identificar objetos, caras, clasificar acciones humanas en vídeo, hacer tracking de movimientos de objetos, extraer modelos 3D, encontrar imágenes similares, eliminar ojos rojos, seguir el movimiento de los ojos, reconocer escenarios.

2.2.6 Hardware para tratamiento de imágenes

a. Dispositivo de Captura de video

Los dispositivos de captura de video permiten transferir al disco duro del ordenador un video ya grabado o una emisión en directo. Los más frecuentes son:

- Una cámara DV (Video Digital) conectada al puerto IEEE 1394 del equipo. Con este dispositivo se obtiene la mejor calidad porque la información de audio y video ya está en formato digital llegando simplemente al ordenador a través del mencionado puerto.
- Una cámara web conectada a un puerto USB y un micrófono conectado a la entrada MIC de la tarjeta de sonido.
- Una tarjeta sintonizadora de TV conectada a la señal de antena.
- Una cámara o reproductor VHS conectado a una tarjeta de captura analógica. Este proceso supone la conversión de video analógico a video digital.

b. Dispositivo para tratamiento de imágenes

Para el tratamiento de imágenes es necesario un ordenador, donde el software instalado ejecuta el programa, y sirve como interface para almacenar en su disco duro la información que proporciona la cámara de video. Como ordenador es preferible el uso de una laptop debido a su flexibilidad de poder realizar trabajos de campo.

El tratamiento de imágenes también es posible con un Raspberry Pi 3, un ordenador casi del tamaño de una tarjeta de crédito. Es una placa que soporta varios componentes y que puede realizar muchas cosas de las que hace una computadora.

FIGURA N° 2.12.

RASPBERRY PI 3 MODELO B



FUENTE: Raspberry pi, disponible en:

<https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b/>

En el Raspberry PI 3, la placa tiene cuatro puertos de entrada USB, uno de Ethernet y salida HDMI. Estos puertos permiten conectar el miniordenador a otros dispositivos como teclados, mouse, pantallas, cámaras web, Internet, etc. Es posible instalar sistemas operativos libres como el Linux, a través de una tarjeta SD.

2.3 Definición de términos básicos

Condición de criticidad: Relación entre el número de neutrones producidos por fisión en cada generación y el número total de neutrones perdidos, por absorción y por escape, en la generación anterior. Prosiguiendo la reacción en cadena con una velocidad definida y bien constante, teniendo como valor de la relación a la unidad.

Flujo Neutrónico: Velocidad de flujo de neutrones en el interior de un reactor. Considérese primeramente una corriente de neutrones que tienen una dirección y una velocidad comunes v . si hay n neutrones en cada centímetro cubico de la corriente, entonces el número que cruza un área de un centímetro cuadrado.

Funcionamiento Normal: Funcionamiento normal de un reactor de Investigación y dispositivos experimentales conexos dentro de límites y condiciones operacionales específicos incluidos la puesta en funcionamiento, el funcionamiento en régimen de potencia, la parada, el estado de parada, el mantenimiento, los ensayos y la recarga de combustible.

Límite: Valor de una cantidad utilizada en determinadas actividades o circunstancias especificadas que no deben superarse. El término “Limite” se debe emplear cuando se trate de un criterio que no se debe sobrepasar. Los criterios usados para otros fines deberían describirse empleando, por ejemplo “nivel de referencia”.

Límites de Seguridad: Límites de los parámetros operacionales dentro de los cuales se ha demostrado que una instalación autorizada puede funcionar en condiciones normales de seguridad. Los límites de seguridad son límites y condiciones operacionales que van más allá de los que se aplican en funcionamiento normal.

Límites y Condiciones Operacionales: Conjunto de normas aprobadas por el órgano regulador para la explotación de una Instalación autorizada en condiciones de seguridad y que establecen los límites de los parámetros, la capacidad funcional y los niveles de rendimiento de la instrumentación y del personal.

Núcleo: Conjunto de elementos combustibles, moderador, manto fértil, reflector, los dispositivos de control de reactividad, apoyo y componentes estructurales. Se incluye también a la instrumentación asociada, el refrigerante primario y los dispositivos reguladores de su flujo que se encuentran dentro del conjunto.

Operación Normal: Explotación dentro de los límites y condiciones operacionales especificados, incluido el estado de parada del reactor, el funcionamiento en régimen de potencia, la parada, la puesta en marcha, el mantenimiento, las pruebas y la recarga de combustible.

Reactividad: Para un medio donde se desarrolla una reacción nuclear en cadena. Es la relación entre el número de fisiones en dos generaciones sucesivas (después o antes) de la reacción en cadena. Es una medida de la desviación de la criticidad de un medio donde se desarrolla una reacción nuclear en cadena, de forma que los valores positivos corresponden a un estado super-crítico y los valores negativos corresponden a un estado sub-crítico.

Reactor Nuclear de Investigación: Reactor Nuclear utilizado principalmente para la generación y utilización de un flujo neutrónico y de radiaciones ionizantes con fines de investigación o de otro tipo.

Secciones Eficaces: Sirve para describir cuantitativamente las interacciones de los neutrones con núcleos atómicos. En efecto, cuando se expone un material cualquiera a la acción de los neutrones, la velocidad con que se produce una reacción nuclear determinada depende del número de neutrones, de su velocidad y del número y naturaleza de los núcleos existentes en el material irradiado.

Seguridad (Seguridad Nuclear): Logro de las condiciones de funcionamiento adecuadas, prevención de accidentes o mitigación de las consecuencias de accidentes, cuyo resultado es la protección de los trabajadores (u otro personal del emplazamiento), del público en general y del medio ambiente contra riesgos radiológicos indebidos.

Sistema de seguridad: Sistema importante para la seguridad, establecido para lograr la parada del Reactor en condiciones de seguridad o para limitar las consecuencias de los incidentes operacionales previstos y de los accidentes base de diseño. Los sistemas de seguridad están conformados por: Sistema de protección, los sistemas de accionamiento de seguridad y los elementos de apoyo.

III. VARIABLES E HIPOTESIS

3.1 Variables de investigación

Variable independiente

Intensidad del efecto Cherenkov.

Variables dependientes

Potencia del Reactor Nuclear RP-10.

Flujo Neutrónico

3.2 Operacionalización de las variables

3.2.1 Variable independiente

TABLA 3.1
OPERACIONALIZACION DE VARIABLES – V. INDEPENDIENTE

| VARIABLE | DIMENSION | INDICADOR | ESCALA |
|------------------|---------------------|------------------------|--------|
| Escala Cherenkov | Propiedades ópticas | Intensidad de luz azul | RGB |

Fuente: Elaboración Propia

3.2.2 Variables dependientes

TABLA 3.2
OPERACIONALIZACION DE VARIABLES – V. DEPENDIENTE

| VARIABLE | DIMENSIÓN | INDICADOR | ESCALA |
|------------------------------------|-------------------|--|----------------------|
| Potencia del Reactor Nuclear RP-10 | Propiedad Física | Potencia neutrónica | Corriente (A) |
| | | Potencia térmica | (Mw) Mega watts |
| | | Potencia por N-16 | (Mw) Mega watts |
| Flujo Neutrónico | Propiedad nuclear | Densidad de neutrones multiplicado por su velocidad. | $n/cm^2 \times cm/s$ |

Fuente: Elaboración Propia

3.3 Hipótesis general y específicas

3.3.1 Hipótesis general

Es posible desarrollar un nuevo sistema de medición de potencia para el reactor nuclear RP-10 mediante el efecto Cherenkov por tratamiento de imágenes.

3.3.2 Hipótesis específicas

- ❖ Se puede cuantificar sobre una variable la intensidad del resplandor azul del efecto Cherenkov mediante tratamiento de imágenes. Esto nos permite calcular el algoritmo para medir la potencia del reactor nuclear RP-10
- ❖ Habrá mejoras en la seguridad nuclear, radiológica y técnica al tener el sistema de medición de potencia del Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov
- ❖ El nuevo sistema de medición de potencia para el reactor nuclear RP – 10 mediante el efecto Cherenkov permite medir la potencia para todos sus niveles. Mide en operaciones a baja potencia y también a alta potencia.

IV. METODOLOGÍA

4.1 Tipo de investigación

El proyecto de investigación es científico de tipo experimental, en razón que para obtener los datos se va medir la potencia del reactor nuclear RP–10 estando en operación, realizando un análisis exhaustivo para garantizar la confiabilidad y robustez del sistema de acuerdo a los requerimientos de seguridad del Reactor Nuclear RP–10. Además de sustentarse de Informes de Seguridad y de Informes Técnicos Científicos publicados.

4.2 Diseño de la investigación

El estudio de investigación está diseñado para demostrar la hipótesis e hipótesis específicas planteadas, además de cumplir con el objetivo general y los objetivos específicos.

4.2.1 Selección de Hardware

a) Ordenador

Para el tratamiento de imágenes y las primeras pruebas se utiliza como ordenador una laptop, para esta investigación se utilizó una laptop HP Core i7, para obtener resultados iniciales.

El sistema de medición de potencia para el Reactor Nuclear RP –10 debe quedar instalado, por lo que se necesita un ordenador dedicado, y de preferencia embebido con el indicador en la sala de control, que se encuentra

fuera de la cúpula del reactor nuclear. La distancia es de aproximadamente 60 metros desde la sala de control hasta boca de tanque donde estará instalada una cámara apuntando al núcleo del reactor.

Se utilizó una Raspberry pi 3 para que es un mini ordenador casi del tamaño de una tarjeta de crédito que se va instalar cerca a boca de tanque y mediante su salida HDMI permitirá visualizar la información en la sala de control.

b) Cámara de video

No es necesario una cámara con zoom, la cámara tiene que estar en un punto fijo enfocando al núcleo del reactor. Para el propósito del desarrollo del sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov basta una cámara con buena resolución y para ello utilizó la cámara Logitech c920 HD pro con entrada USB, resolución de 15MP, Full HD 1080p.

c) Visualización.

El Raspberry pi 3 tiene como salida el puerto HDMI. Para fines de desarrollo y poder visualizar se utiliza un LCD de 9 pulgadas con una resolución 1024X600 pulgadas.

La visualización se puede realizar con cualquier tipo de pantalla que tenga una entrada HDMI, o se puede utilizar conversores de HDMI al tipo entrada del monitor o pantalla.

4.2.2 Desarrollo general del software y la Escala de Cherenkov

La imagen adquirida por una cámara de video, brinda como información una matriz conformada por la coordenada y la intensidad de cada pixel de la imagen en dicho punto; y en RGB se obtiene una matriz por cada color básico. Es decir, se obtiene una matriz de la capa roja, una matriz de la capa verde y una matriz de la capa azul que conjuntamente entre las 3 capas forman todos los colores.

En el programa se toma la capa de color azul de las 3 capas de colores básicos debido a que el efecto Cherenkov es una luminosidad de color azul intenso. Se desactiva en el programa la capa roja y verde, y se saca el promedio de la escala de azules de todos los pixeles que van desde 0 hasta 255.

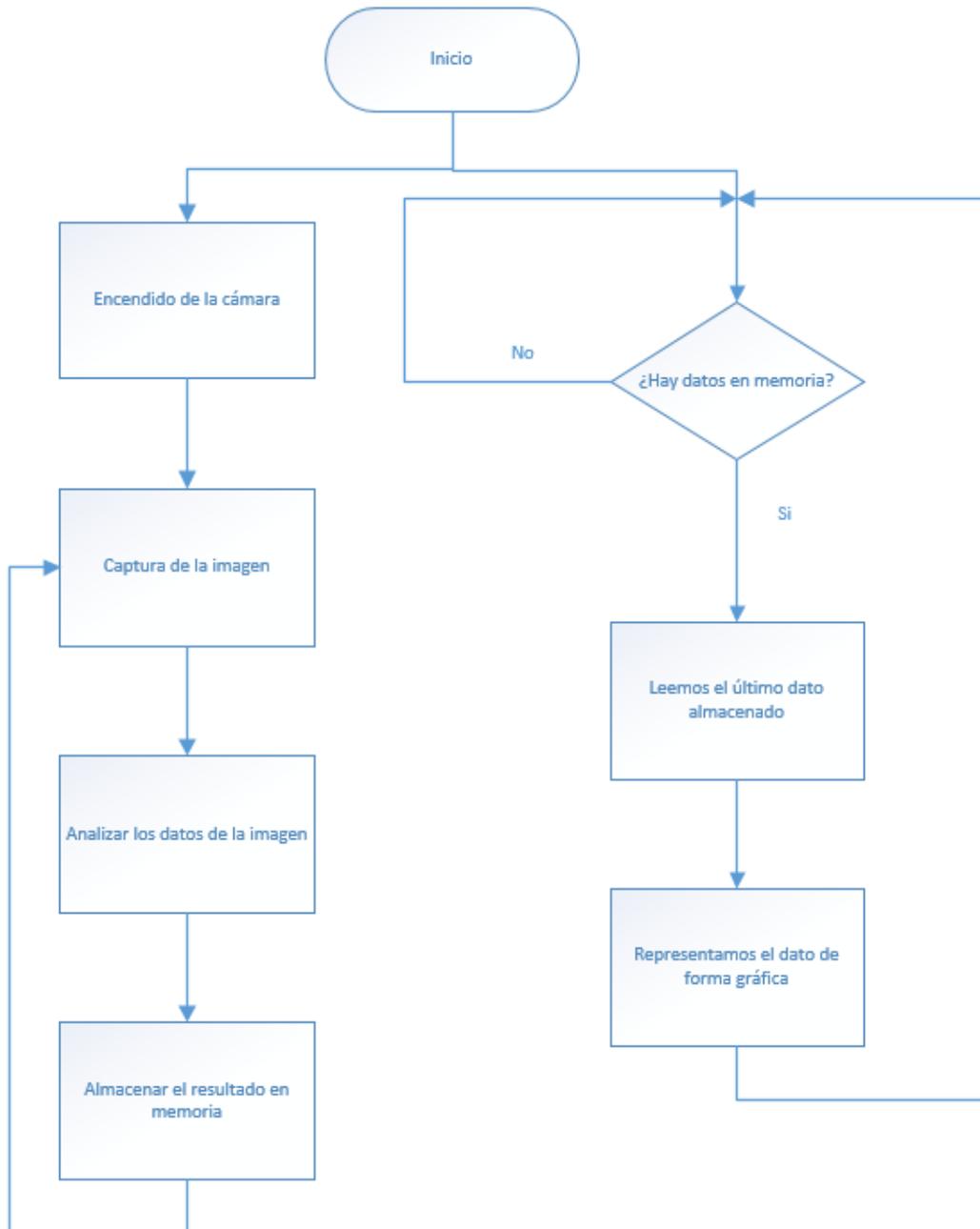
Entonces, al promedio de escala de cada uno de los pixeles de la capa azul lo definimos como la variable de escala de Cherenkov que va permitir medir la potencia del reactor nuclear RP10.

El rango de la escala es desde 0 hasta 255, la resolución depende de la resolución de la cámara de video. Esta escala y resolución son para la escala definida como escala de Cherenkov, mas no para el sistema de medición de potencia para el reactor nuclear RP – 10 mediante el efecto Cherenkov

4.2.3 Diagrama de bloques para el software

FIGURA N° 4.1.

DIAGRAMA DE BLOQUES PARA EL SOFTWARE

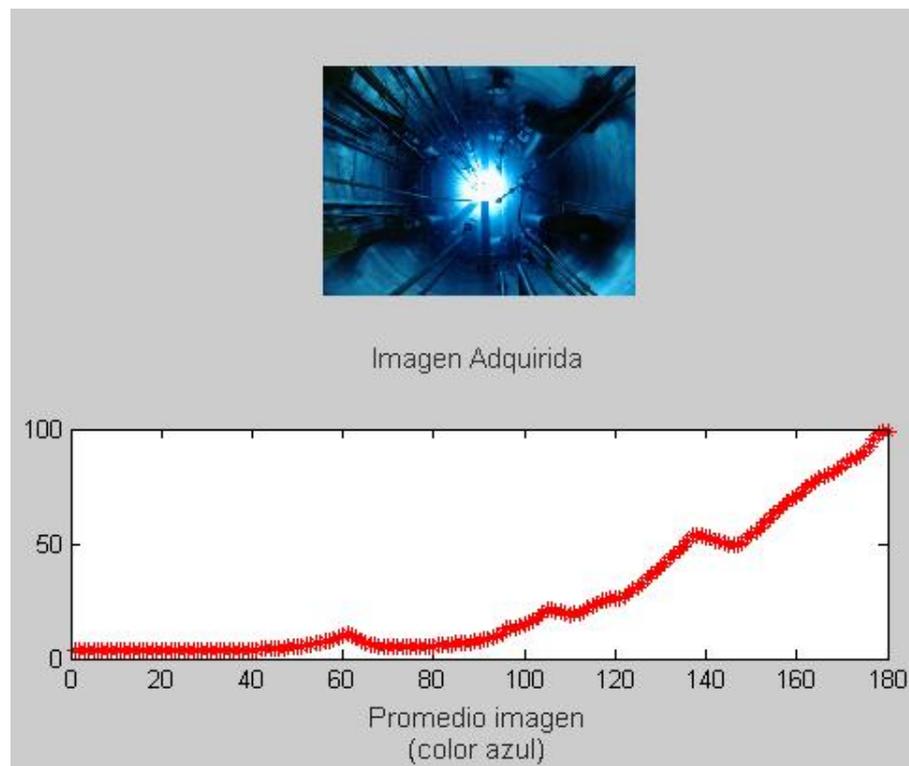


FUENTE: Elaboración propia

4.2.4 Desarrollo del software en Matlab

Se desarrolla el programa en Matlab para realizar las pruebas desde que inicia la operación del Reactor Nuclear RP10 y monitorear hasta que alcance potencia tal como se observa en la figura 4.2.

FIGURA N° 4.2.
MONITOREO EN SUBIDA DE POTENCIA DEL REACTOR
NUCLEAR RP – 10



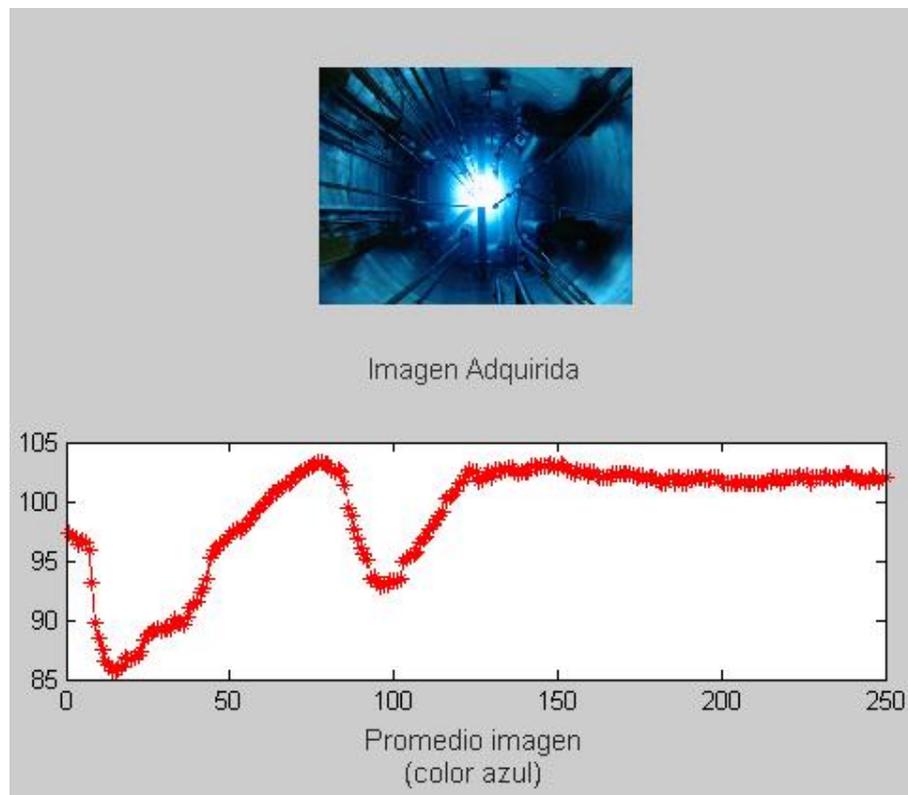
FUENTE: Resultado de las primeras pruebas del desarrollo en Matlab

Se observan de la figura anterior de la prueba en Matlab, que la escala de Cherenkov aumenta a medida que se va aumentando la potencia del reactor nuclear.

Al llegar a potencia se tiene que estabilizar a una potencia y mantenerlo mediante el piloto automático que controla la subida y bajada de barra de control fino y las dos barras de control.

FIGURA N° 4.3.

DESARROLLO DEL SOFTWARE EN MATLAB



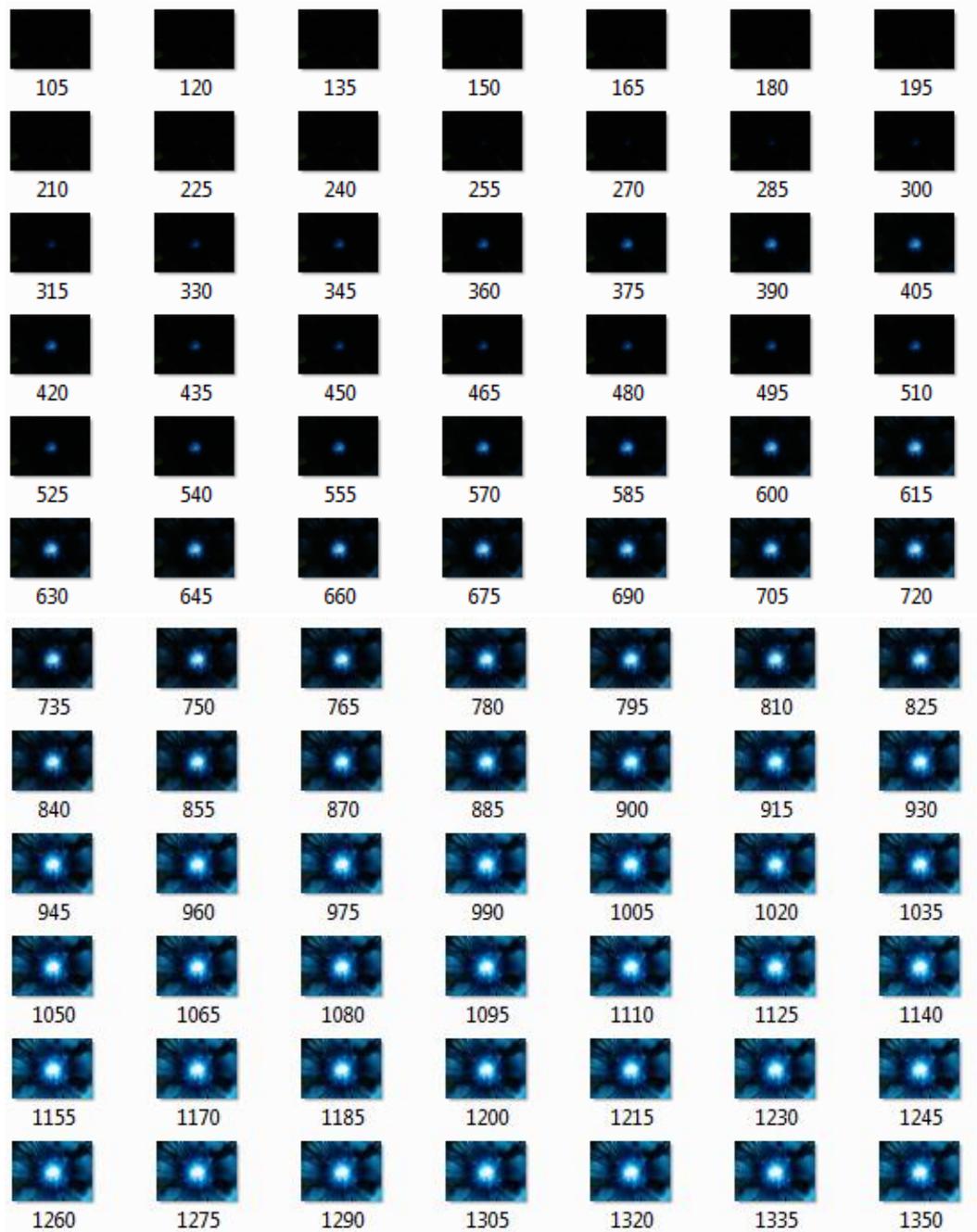
FUENTE: Resultado de las primeras pruebas del desarrollo en Matlab

El control de piloto automático se realiza con el módulo de instrumentación nuclear de piloto automático, que realiza un control tipo PID. Este control PID se puede observar bajo la escala de Cherenkov tal como se observa en la figura 4.3.

4.2.5 Adquisición de imágenes.

FIGURA N° 4.4.

EFFECTO CHERENKOV EN EL RP – 10



FUENTE: Resultado de las primeras pruebas del desarrollo en Matlab

La frecuencia de muestreo es de 1 muestra por segundo, y las imágenes se almacenan en una base de datos para su posterior análisis. En la figura 4.4. se observa alguna de las imágenes (tomados de 15 en 15), que se almacenó en la base de datos durante una de las pruebas.

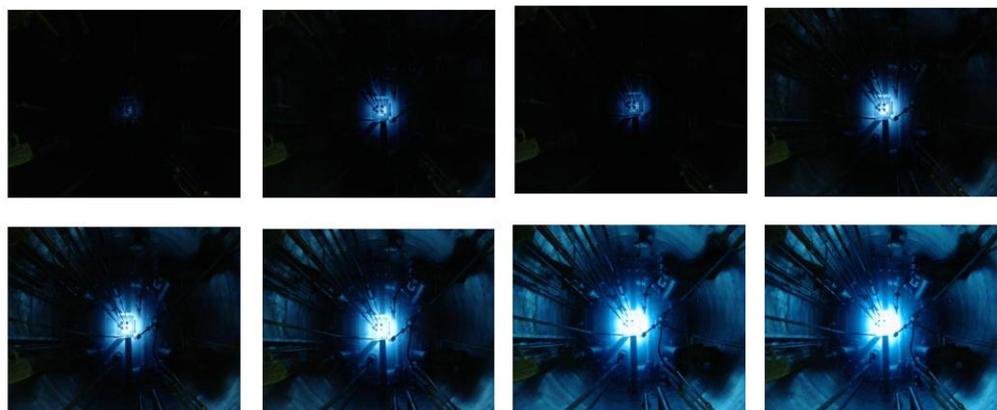
4.2.6 Desarrollo del software en Python

Para el desarrollo en Python seguimos la secuencia según el diagrama de bloques para el software. Se tiene que asegurar que el programa permita obtener la misma información que Matlab.

Para probar la fiabilidad del programa en Python se toman 8 imágenes de la base de datos de una de las pruebas realizadas para poder analizar mediante Matlab, Python para Windows, y Python para Linux.

FIGURA N° 4.5.

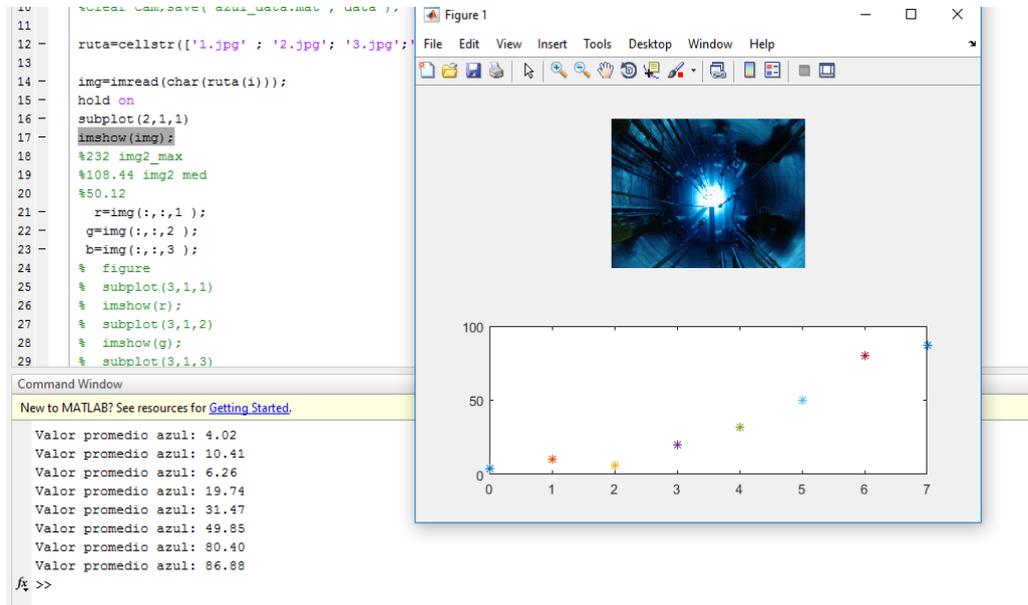
IMÁGENES DE PRUEBA



FUENTE: Imágenes tomadas de la base de datos.

FIGURA N° 4.6.

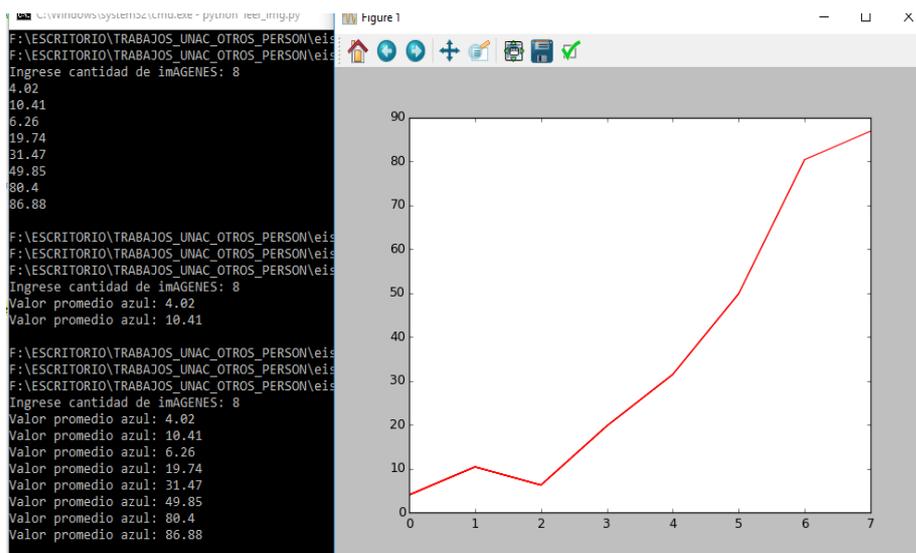
RESULTADO EN MATLAB



FUENTE: Resultado de la prueba para Matlab

FIGURA N° 4.7.

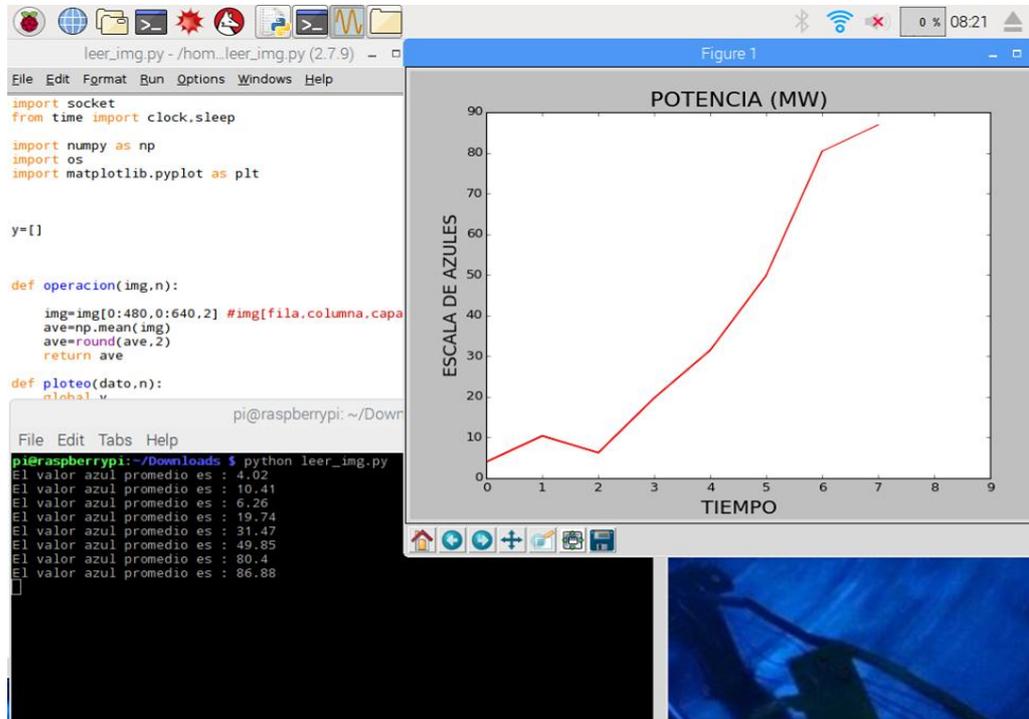
RESULTADO EN PYTHON PARA WINDOWS



FUENTE: Resultado de la prueba para Python en Windows

FIGURA N° 4.8.

RESULTADO DE PYTHON PARA LINUX (RASPBERRY PI 3)



FUENTE: Resultado de la prueba para Python del Raspberry pi 3.

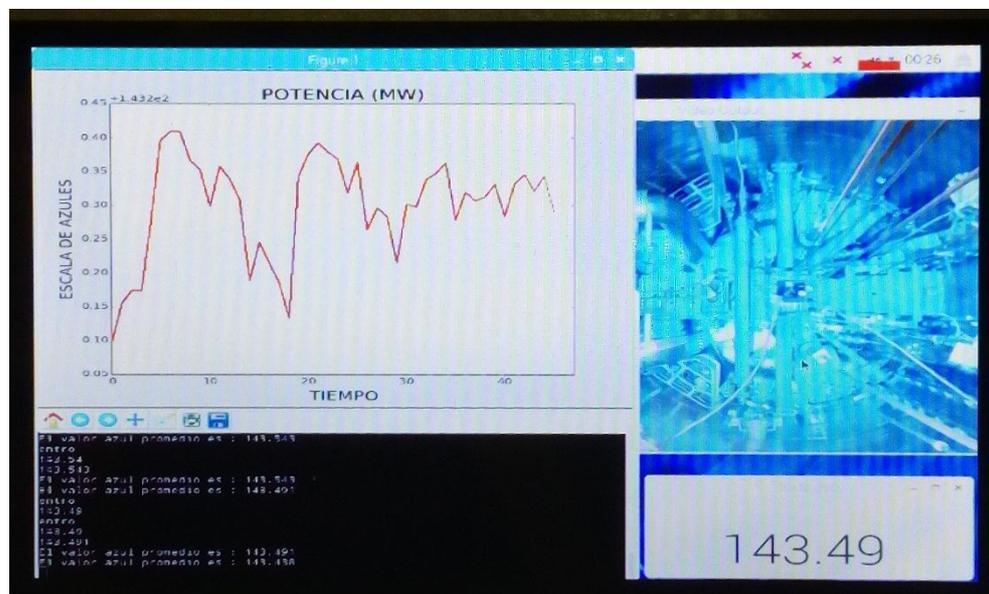
Se puede observar en la parte inferior izquierda de las figuras 4.6., 4.7. y 4.8. que el resultado es el mismo, con lo que se da por concluido el desarrollo del software en Python para el Raspberry pi 3

El programa grafica en el tiempo la evolución de la potencia en la escala de Cherenkov con una frecuencia de muestreo de 1 muestra por segundo mediante la librería OpenCV de Python, el cual va permitir monitorear la potencia y la variación de la potencia en el tiempo desde la sala de control del reactor nuclear RP – 10.

El programa también muestra como video el núcleo del reactor en tiempo real que enfoca la cámara y mediante un indicador va mostrando la escala de Cherenkov con una resolución de 2 puntos decimales, que es el mismo dato que se grafica.

FIGURA N° 4.9.

VISUALIZACIÓN DEL PROGRAMA TERMINADO



FUENTE: Fotografía de la pantalla LCD 9”.

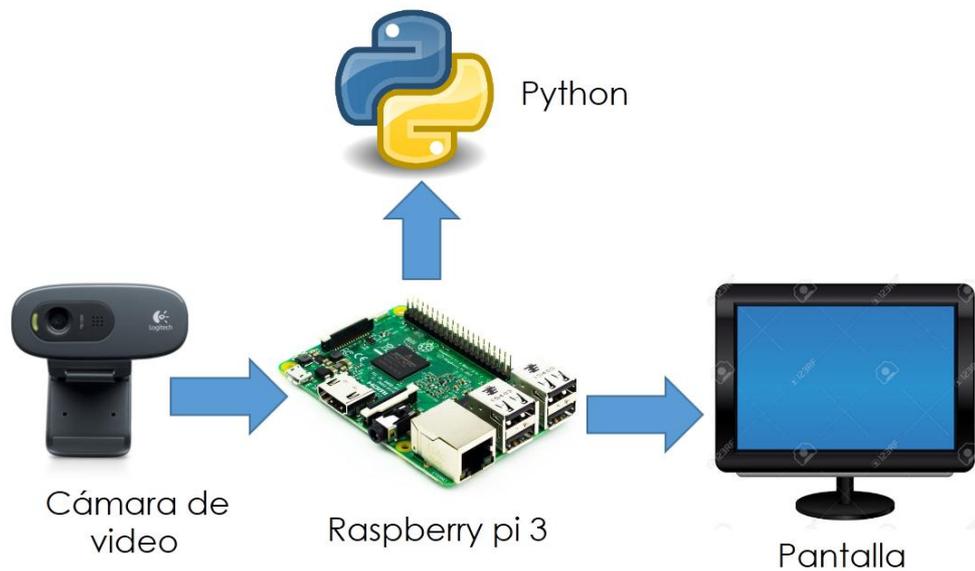
4.2.7 Diagrama general

En el desarrollo del sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov se utiliza como sensor una cámara de video que envía la información al Raspberry pi 3. El sistema operativo del Raspberry pi 3 es GNU/Linux y por tratamiento de imágenes con Python se obtiene la escala de Cherenkov.

Para el desarrollo y la visualización programa en Raspberry pi 3 para el sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov se utilizó como monitor un LCD de 9" que tiene como entrada el puerto HDMI.

FIGURA N° 4.10.

DIAGRAMA GENERAL DEL PROYECTO



FUENTE: Elaboración propia.

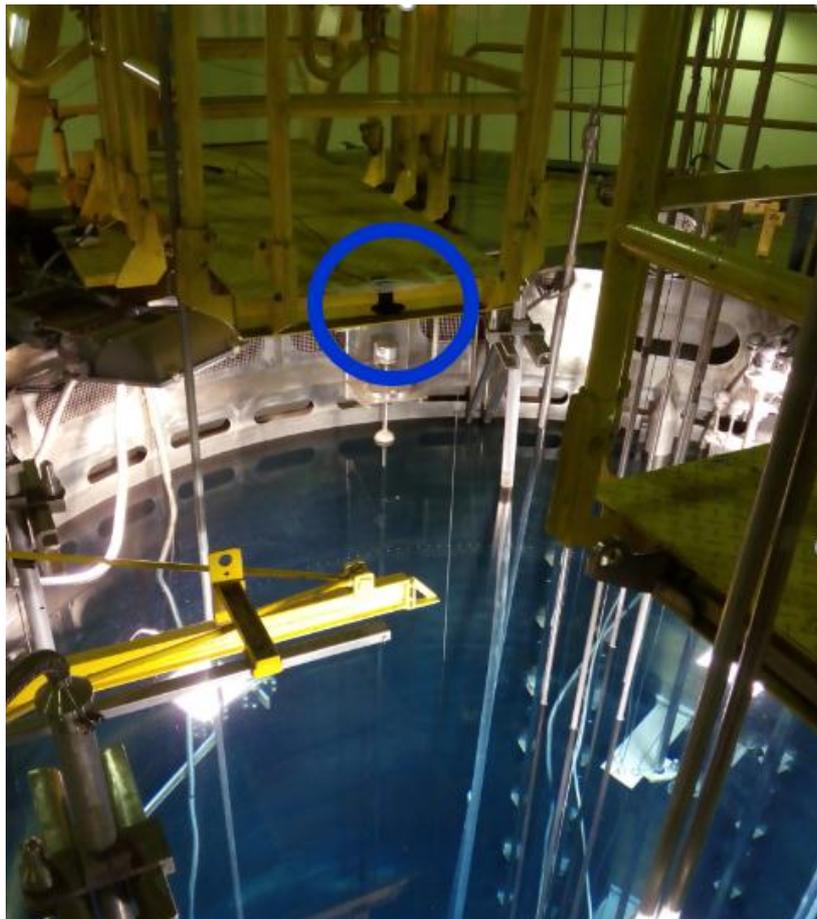
4.2.8 Instalación

Para la instalación se tiene que tener en cuenta que existe radiación gamma en boca de tanque con una tasa de dosis de fondo menor a 0.1 mr/h (mili rem por hora) y que aumenta a medida que se aumenta la potencia de operación del reactor nuclear RP – 10, que llega de entre 4 a 6 mr/h (mili rem por hora) según las planillas de monitoreo rutinario de radiación externa del reactor Nuclear RP – 10 a cargo del área de Radio Protección,

por lo que es necesario este presente un oficial de radio protección durante la instalación.

La instalación se realiza en boca de tanque, con la cámara de video instalada en el puente de mecanismos tal como se muestra en la figura 4.11., que enfoca el núcleo del reactor

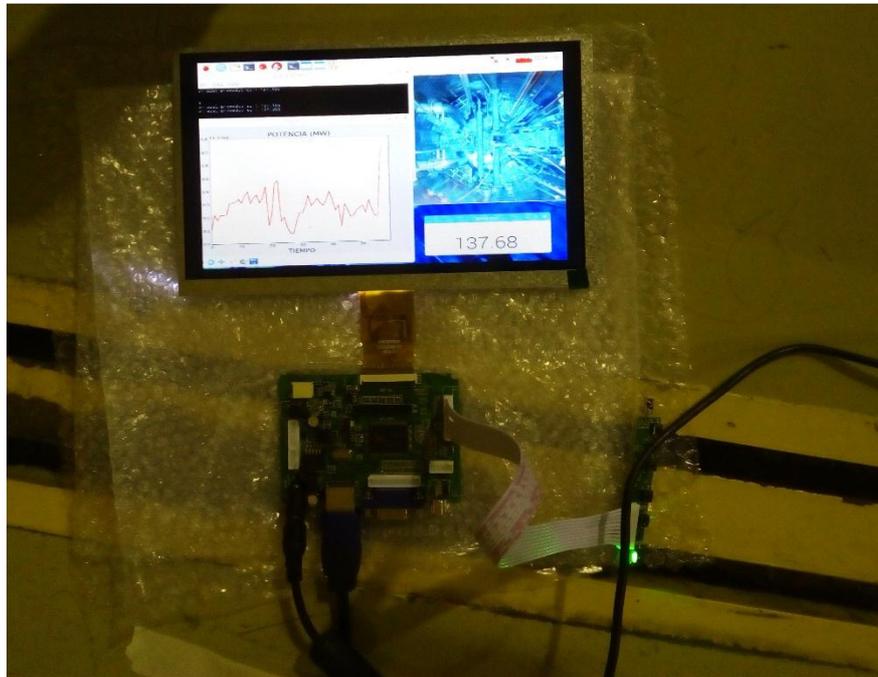
FIGURA N° 4.11.
INSTALACIÓN DE LA CÁMARA DE VIDEO



FUENTE: Fotografía de la instalación.

FIGURA N° 4.12.

PANTALLA LCD DE 9 PULGADAS EN LA INSTALACIÓN



FUENTE: Fotografía de la instalación.

4.3 Población y muestra

Población

El reactor nuclear de investigación RP-10 es una fuente de neutrones, La población es la cantidad de neutrones generados en el núcleo del reactor, debido a los productos de fisión.

Muestra

La población neutrónica se calcula mediante el flujo neutrónico, Este permite calcular la potencia neutrónica. Conociendo la potencia mediante el efecto Cherenkov, podemos calcular la población de neutrones.

4.4 Técnicas e instrumentos de recolección de datos

4.4.1 Técnicas de recolección de datos

a. Revisión de Informes de medición de potencia

La información se buscó en los informes Científicos Técnicos publicados en la página del Instituto Peruano de Energía Nuclear. También de informes de seguridad internos del Reactor Nuclear RP10.

b. Prueba del sistema de medición de potencia

Se instala la cámara de video apuntando al núcleo del reactor, se guarda las imágenes para posteriormente ser tratados.

c. Información de equipos y sensores

En la sala de control está el amplificador marcha cuatro, indica la potencia neutrónica, el registrador muestra la potencia térmica y hay un visualizador tipo multímetro que muestra la potencia por ^{16}N .

4.4.2 Instrumentos de recolección de datos

- ✓ Registros de observación de la sala de control del reactor nuclear RP-10, resultados de los análisis y comparación de los resultados.
- ✓ Revisión de Publicaciones con evidencia científica, resultados y conclusiones acerca de la medición y monitoreo de la potencia en el reactor nuclear RP-10.

- ✓ Registro de observación y base de datos en la laptop, para su análisis y comparación.
- ✓ Registro de observación y base de datos de la Raspberry Pi 3 (SBC, Computador de tarjeta reducida por sus siglas en ingles).

4.5 Plan de análisis estadísticos de datos

Se utilizará el programa Excel 2016 para el procesamiento de la información, gráficos, análisis estadístico de los resultados; posteriormente exportados al programa Word 2016 para su presentación.

4.6 Etapa de experimentación y revisión documental

En boca de tanque existe actividad radioactiva, y en operación aumenta la tasa de dosis por lo que es necesario ingresar con la supervisión de un oficial de radioprotección para poder obtener los datos.

En esta etapa se procederá a realizar una implementación de prueba del sistema de medición de potencia. Para poder evaluar su comportamiento durante la puesta en marcha del Reactor Nuclear para su operación, con el propósito de poder realizar algunas mejoras y correcciones para el cumplimiento de los objetivos y la hipótesis

La implementación se va desarrollar en la pileta principal del reactor nuclear RP10 del centro nuclear Oscar Miro Quesada de la Guerra “RACSO”, se

instalará una cámara de video enfocando sus lentes al núcleo del reactor. Este video será adquirido en forma de imágenes que será procesado y enviado a la sala de control para su visualización y monitoreo por el personal de operación y mantenimiento.

En boca de tanque y en la sala de control se va realizar el monitoreo, comparación del sistema que se va implementar con los otros sistemas de medición de potencia para poder analizar y obtener los resultados. El monitoreo para el análisis estadístico se va realizar por comparación con el sistema de medición de potencia por Nitrógeno 16.

Calcular el algoritmo e incluir en el programa para el cálculo directo de la potencia del reactor nuclear RP-10 mediante el efecto Cherenkov, visualizado en un monitor.

V. RESULTADOS

5.1 Resultados Parciales

5.11 Resultados de los sistemas de medición de potencia actuales

Como el análisis estadístico, el control de la potencia del reactor nuclear y la comparación se realiza con el sistema de medición por Nitrógeno 16, se analiza el este sistema con respecto a los otros dos sistemas de medición según los datos de la tabla 5.1. obtenidos durante la experiencia para la prueba del desarrollo del sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov.

TABLA N° 5.1.

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE POTENCIA ACTUALES

| POTENCIA N-16 (KW) | POTENCIA TÉRMICA (MW) | CORRIENTE MARCHA 4 (A) |
|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| 0 | -0.2 | 0 |
| 200 | -0.2 | 0.00000081 |
| 400 | 0 | 0.000000159 |
| 600 | 0.2 | 0.00000024 |
| 800 | 0.3 | 0.00000032 |
| 1000 | 0.5 | 0.00000039 |
| 1200 | 0.7 | 0.00000047 |
| 1400 | 0.9 | 0.00000056 |
| 1600 | 1.1 | 0.00000066 |
| 1800 | 1.3 | 0.00000074 |
| 2000 | 1.4 | 0.00000084 |
| 2500 | 1.7 | 0.00000105 |
| 3000 | 2.2 | 0.00000126 |
| 3500 | 2.7 | 0.0000015 |
| 4000 | 3.2 | 0.00000177 |
| 4500 | 3.8 | 0.00000204 |

Desde la tabla 5.1 se realizan gráficos de un sistema de medición de potencia respecto de otro sistema de medición de potencia, para analizar el comportamiento de estos sistemas respecto del otro.

GRÁFICO N° 5.1.

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE POTENCIA DEL RP-10

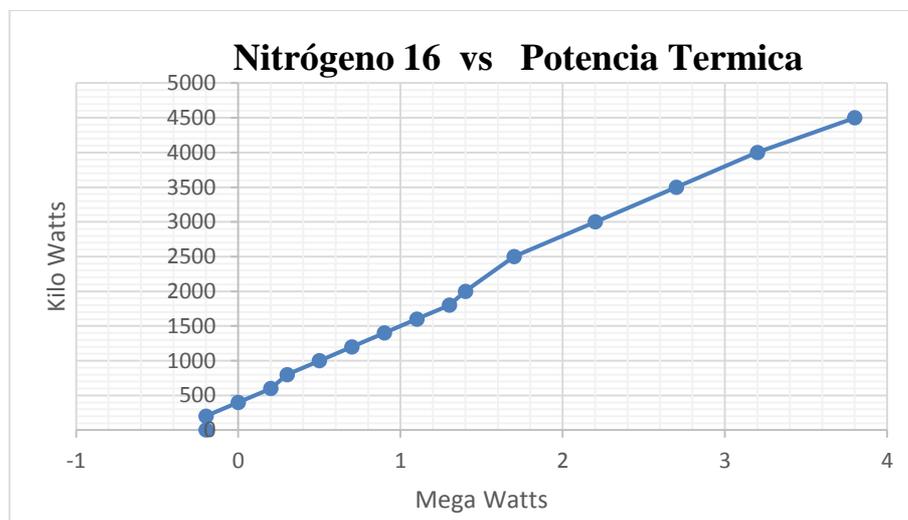


GRÁFICO N° 5.2.

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE POTENCIA DEL RP-10

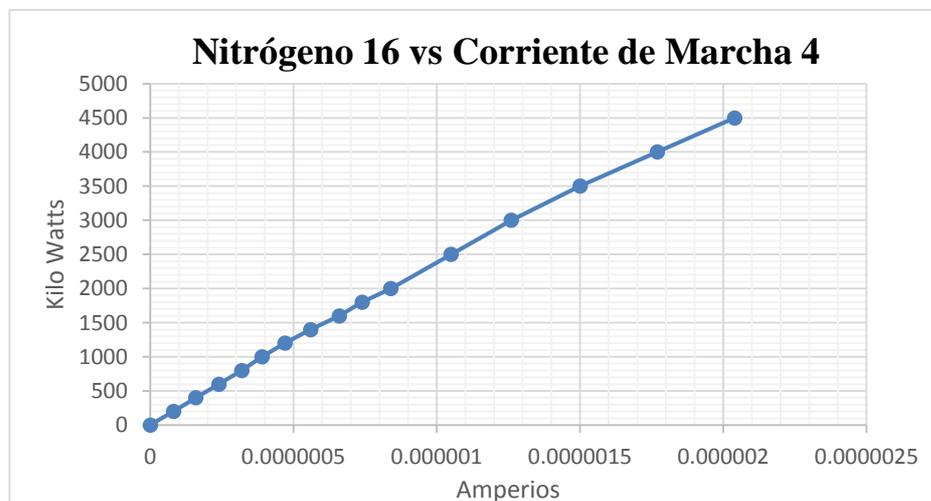
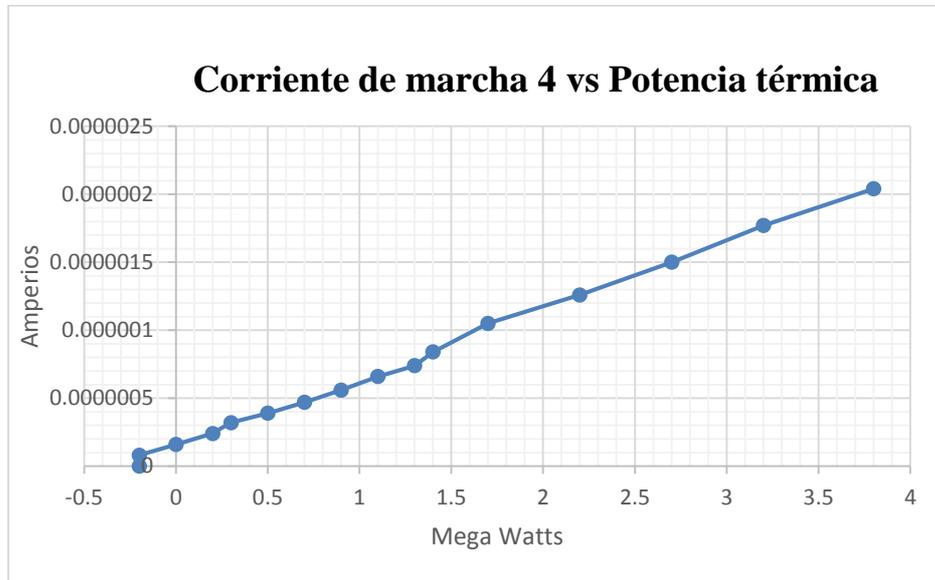


GRÁFICO N° 5.3.

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE POTENCIA DEL RP-10



La potencia que determina la potencia del reactor nuclear RP-10 es la potencia térmica, y a partir de este se realiza la calibración de los otros sistemas de medición de potencia.

De la figura 5.1 y 5.3 se puede comprobar de forma experimental que este sistema de medición de potencia no brinda buenos resultados a potencias menores a 2 Mega Watts. A partir de 2 Mega Watts de potencia tiende a ser lineal con los otros sistemas de medición.

El comportamiento del sistema de medición de potencia por N-16 y el sistema de medición de potencia por corriente de marcha 4 tiende a ser lineal tal como muestra la figura 5.2.

5.12 Resultados de la escala de Cherenkov

Los datos de la tabla 5.1. son datos obtenidos de forma experimental durante una operación del reactor nuclear RP – 10. Se solicitó al área de operación del reactor nuclear RP–10, llevar el reactor nuclear a distintos niveles de potencia y lo mantengan estable a una potencia determinada para poder tomar los datos.

Una vez estabilizado la potencia del reactor nuclear, se toma 10 datos del desarrollo del sistema de medición de potencia mediante el efecto Chercnkov en la escala definida como escala de Cherenkov.

TABLA N° 5.2.

DATOS OBTENIDOS DE LA EXPERIENCIA

| POTENCIA (KW) | D1 | D2 | D3 | D4 | D5 | D6 | D7 | D8 | D9 | D10 |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| 0 | 20.65 | 20.67 | 20.64 | 20.65 | 20.66 | 20.67 | 20.68 | 20.68 | 20.69 | 20.69 |
| 200 | 27.07 | 26.85 | 26.84 | 26.99 | 27.07 | 27.11 | 27.13 | 27.12 | 27.4 | 27.45 |
| 400 | 30.84 | 30.77 | 30.73 | 30.68 | 30.7 | 30.69 | 30.64 | 30.64 | 30.68 | 30.72 |
| 600 | 34.01 | 34.08 | 34.11 | 34.15 | 34.16 | 34.16 | 34.17 | 34.16 | 34.15 | 34.25 |
| 800 | 38.77 | 38.64 | 38.49 | 38.37 | 38.35 | 38.33 | 38.29 | 38.26 | 38.22 | 38.24 |
| 1000 | 41.84 | 42.28 | 42.36 | 42.39 | 42.42 | 42.43 | 42.46 | 42.49 | 42.57 | 42.51 |
| 1200 | 45.92 | 45.73 | 45.23 | 45.17 | 45.12 | 45.27 | 45.25 | 45.49 | 45.51 | 45.53 |
| 1400 | 49.87 | 50.11 | 50.21 | 50.32 | 50.55 | 50.72 | 50.78 | 51.1 | 51.13 | 50.58 |
| 1600 | 54.9 | 54.84 | 54.81 | 54.77 | 54.51 | 54.33 | 54.11 | 54.06 | 54 | 53.9 |
| 1800 | 58.45 | 58.54 | 58.61 | 58.66 | 58.78 | 58.79 | 58.77 | 58.55 | 58.51 | 58.36 |
| 2000 | 62.54 | 62.62 | 62.58 | 62.62 | 62.68 | 62.75 | 62.81 | 62.81 | 62.93 | 63 |
| 2500 | 72.7 | 72.72 | 72.72 | 72.7 | 72.73 | 72.92 | 73.03 | 73.06 | 73.11 | 73.2 |
| 3000 | 81.58 | 81.69 | 81.75 | 81.78 | 81.64 | 81.64 | 81.64 | 81.62 | 81.64 | 81.6 |
| 3500 | 91.72 | 92.25 | 91.3 | 91.1 | 90.51 | 90.03 | 89.46 | 89 | 88.9 | 88.65 |
| 4000 | 99.56 | 99.71 | 99.74 | 99.89 | 100.03 | 100.08 | 100.22 | 100.32 | 100.43 | 100.53 |
| 4500 | 105 | 104.9 | 106.63 | 106.1 | 104.2 | 105.49 | 106.04 | 107.87 | 107 | 106.2 |

De la tabla 5.1 se saca la media aritmética y la desviación estándar que nos va a mostrar la precisión de los datos tomados, para analizar la escala de Cherenkov con los otros sistemas de medición de potencia.

TABLA N° 5.3.

ANALISIS DE LA ESCALA DE CHERENKOV

| POTENCIA (KW) | MEDIA ARITMÉRICA (ESCALA DE CHERNEKOV) | DESVIACION ESTANDAR (σ) | ERROR ESTÁNDAR |
|----------------------|---|--|-----------------------|
| 0 | 20.668 | 0.0175 | 0.0055 |
| 200 | 27.103 | 0.1994 | 0.0631 |
| 400 | 30.709 | 0.0606 | 0.0192 |
| 600 | 34.140 | 0.0630 | 0.0199 |
| 800 | 38.396 | 0.1827 | 0.0577 |
| 1000 | 42.375 | 0.2048 | 0.0648 |
| 1200 | 45.422 | 0.2606 | 0.0824 |
| 1400 | 50.537 | 0.4142 | 0.1310 |
| 1600 | 54.423 | 0.3901 | 0.1234 |
| 1800 | 58.602 | 0.1473 | 0.0466 |
| 2000 | 62.734 | 0.1532 | 0.0485 |
| 2500 | 72.889 | 0.1970 | 0.0623 |
| 3000 | 81.658 | 0.0637 | 0.0202 |
| 3500 | 90.292 | 1.2756 | 0.4035 |
| 4000 | 100.051 | 0.3258 | 0.1030 |
| 4500 | 105.943 | 1.0864 | 0.3435 |

El sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov muestra un valor con 2 cifras decimales, por lo que la resolución es de 0.01 en la escala de Cherenkov. De la desviación estándar de la tabla 5.2. se obtiene la precisión de la medición. La exactitud no se puede calcular ya que no se puede comparar con un valor real de un patrón, y como error se considera al error estándar que nos muestra la incertidumbre del análisis estadístico del proyecto de investigación.

Se agrega la media aritmética como el sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov a la tabla 5.1. que muestra los sistemas de medición de potencia del reactor nuclear RP-10 obteniendo la tabla 5.4.

FIGURA N° 5.4.

SISTEMAS DE MEDICIÓN DE POTENCIA

| POTENCIA N-16 (KW) | POTENCIA TÉRMICA (MW) | CORRIENTE MARCHA 4 (A) | ESCALA DE CHERENKOV |
|---------------------------|------------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| 0 | -0.2 | 0 | 20.668 |
| 200 | -0.2 | 0.000000081 | 27.103 |
| 400 | 0 | 0.000000159 | 30.709 |
| 600 | 0.2 | 0.000000240 | 34.14 |
| 800 | 0.3 | 0.000000320 | 38.396 |
| 1000 | 0.5 | 0.000000390 | 42.375 |
| 1200 | 0.7 | 0.000000470 | 45.422 |
| 1400 | 0.9 | 0.000000560 | 50.537 |
| 1600 | 1.1 | 0.000000660 | 54.423 |
| 1800 | 1.3 | 0.000000740 | 58.602 |
| 2000 | 1.4 | 0.000000840 | 62.734 |
| 2500 | 1.7 | 0.000001050 | 72.889 |
| 3000 | 2.2 | 0.000001260 | 81.658 |
| 3500 | 2.7 | 0.000001500 | 90.292 |
| 4000 | 3.2 | 0.000001770 | 100.051 |
| 4500 | 3.8 | 0.000002040 | 105.943 |

La tabla 5.4. muestra los sistemas de medición de potencia por Nitrógeno 16, sistema de potencia térmica, sistema de potencia por corriente de marcha 4 y la Escala de Cherenkov de forma experimental. Se grafica la escala de Cherenkov respecto de los otros sistemas de medición de potencia y se observa su comportamiento según la figura 5.4, figura 5.5, y figura 5.6.

GRÁFICO N° 5.4.

ESCALA DE CHERENKOV Y POTENCIA POR NITRÓGENO-16

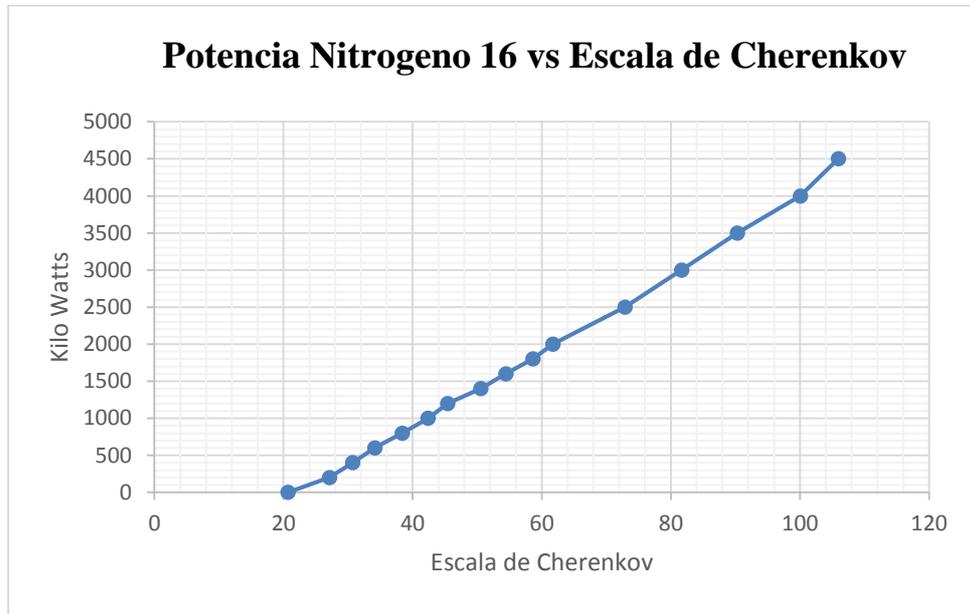


GRÁFICO N° 5.5.

ESCALA DE CHERENKOV Y POTENCIA TÉRMICA

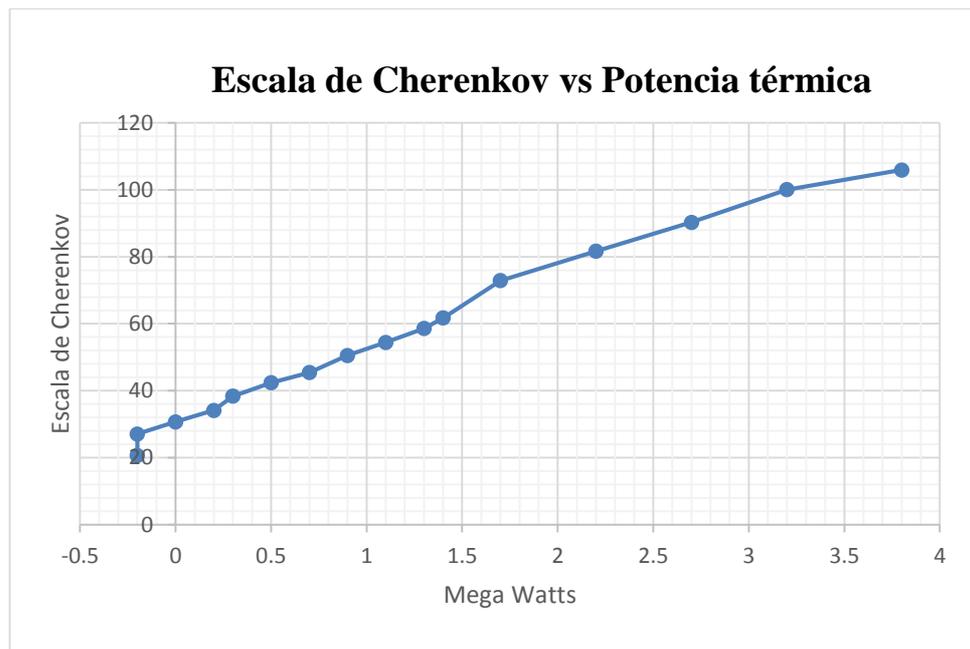
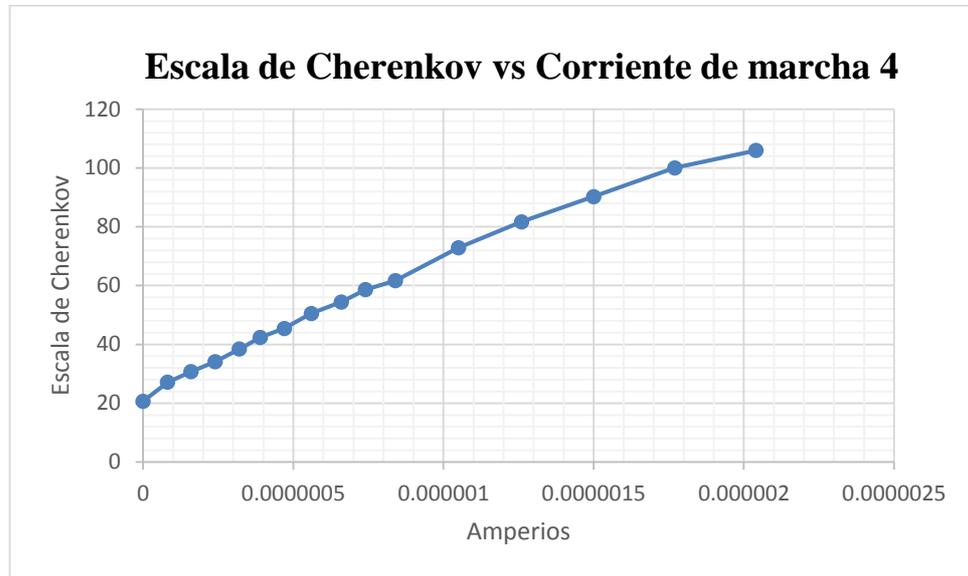


GRÁFICO N° 5.6.

ESCALA DE CHERENKOV Y CORRIENTE DE MARCHA 4



5.2 Resultados Finales

De la figura 5.4 se puede observar que la escala de Cherenkov y la potencia por nitrógeno-16, tiende a ser lineal. También se puede observar de las figuras 5.5 y 5.6 que la escala de Cherenkov tiene un comportamiento similar al comportamiento del sistema de medición de potencia por nitrógeno-16 respecto de los otros sistemas de medición de potencia como se muestra en la figura 5.1 y 5.2.

El monitoreo de la potencia para la prueba se realizó a través del sistema de medición de potencia por nitrógeno-16, y debido a su comportamiento casi lineal con la escala de Cherenkov, se halla una ecuación para poder medir la potencia en watts mediante la escala de Cherenkov.

De la figura 5.4, según su línea de tendencia se halla la ecuación para el algoritmo para el programa, y este vendría a ser:

$$P. Cherenkov = (Escala de Cherenkov) \times 52.151 - 1200.9$$

Obteniendo la siguiente tabla.

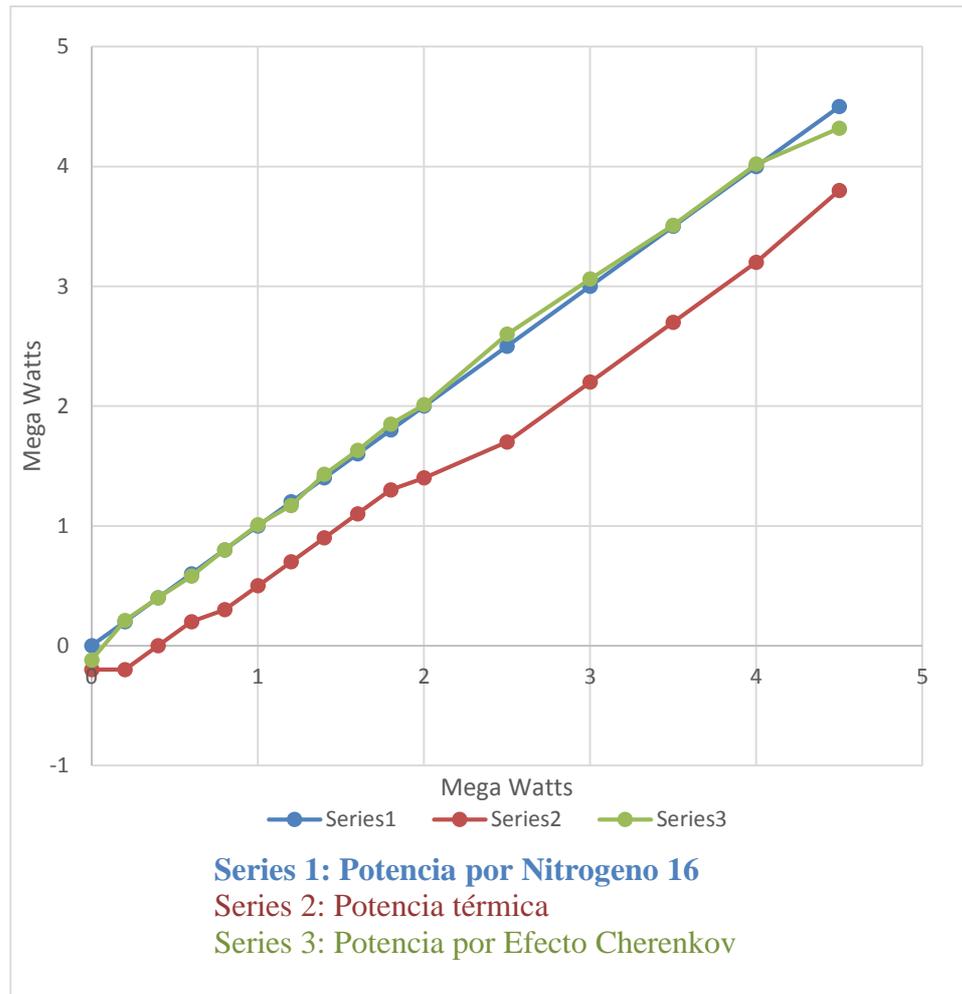
TABLA N° 5.5.
POTENCIA POR CHERENKOV

| POTENCIA N-16 (MW) | POTENCIA TÉRMICA (MW) | POTENCIA POR CHERENKOV (MW) |
|-------------------------------|----------------------------------|--|
| 0 | -0.20 | -0.12 |
| 0.20 | -0.20 | 0.21 |
| 0.40 | 0 | 0.40 |
| 0.60 | 0.20 | 0.58 |
| 0.80 | 0.30 | 0.80 |
| 1.00 | 0.50 | 1.01 |
| 1.20 | 0.70 | 1.17 |
| 1.40 | 0.90 | 1.43 |
| 1.60 | 1.10 | 1.63 |
| 1.80 | 1.30 | 1.85 |
| 2.00 | 1.40 | 2.01 |
| 2.50 | 1.70 | 2.60 |
| 3.00 | 2.20 | 3.06 |
| 3.50 | 2.70 | 3.51 |
| 4.00 | 3.20 | 4.02 |
| 4.50 | 3.80 | 4.32 |

En la tabla 5.5 no se ha incluido el sistema de medición de potencia por corriente de marcha 4, debido a que este varía de acuerdo a la posición de la cámara de fisión y la configuración del núcleo. El monitoreo se realiza mediante equivalencias de corriente respecto a una potencia determinada y al tipo de configuración del núcleo.

GRÁFICO N° 5.7.

RESULTADO DEL SISTEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIA MEDIANTE EL EFECTO CHERENKOV RESPECTO DE LA POTENCIA POR N-16 Y POTENCIA TÉRMICA.



VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Contrastación de las hipótesis con los resultados.

a) Contrastación de la hipótesis general con los resultados.

- ✓ Es posible desarrollar un nuevo sistema de medición de potencia para el reactor nuclear RP-10 mediante el efecto Cherenkov por tratamiento de imágenes.

En efecto, es posible y se ha desarrollado el sistema de medición de potencia mediante el Efecto Cherenkov para el reactor nuclear RP1-10. Se ha implementado en boca de tanque del reactor para realizar las pruebas experimentales y los resultados en contrastación con los otros sistemas de medición de potencia nos indican que tiene una tendencia lineal con respecto al sistema de medición de potencia por nitrógeno16, y un comportamiento similar al sistema de medición de potencia por nitrógeno-16, cuando se analizan ambos sistemas de medición de potencia con el sistema de medición de potencia por corriente de marcha 4 y el sistema de medición por potencia térmica.

b) Contrastación de las hipótesis específicas con los resultados.

- ✓ Se puede cuantificar sobre una variable la intensidad del resplandor azul del efecto Cherenkov mediante tratamiento de imágenes. Esto nos permite calcular el algoritmo para medir la potencia del reactor nuclear RP-10

En efecto, al promedio de la escala de azules de todos los pixeles de la intensidad de luz del Efecto Cherenkov obtenidos por tratamiento de imágenes se le denominó escala de Cherenkov. con un rango numérico que va desde 0 hasta 255. Los resultados obtenidos indican que esta escala de Cherenkov aumenta a medida que aumenta la potencia del reactor nuclear RP-10 y por comparación con los otros sistemas de medición de potencia se puede calcular un algoritmo que permita calcular la potencia del reactor nuclear RP-10.

- ✓ Habrá mejoras en la seguridad nuclear, radiológica y técnica el tener el sistema de medición de potencia del Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov

El monitoreo a baja potencia cuando no se prenden las bombas se realiza solamente mediante el sistema de medición de potencia por corriente de marcha 4. Con el desarrollo del sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov se podrá monitorear a baja potencia con dos sistemas de medición de potencia con distinto principio de funcionamiento. A operación a altas potencias se podrá monitorear la potencia con 4 sistemas de medición de potencia con distinto principio de funcionamiento disminuyendo la tasa de fallas y aumentando la seguridad nuclear, radiológica y técnica del reactor nuclear RP-10.

- ✓ El nuevo sistema de medición de potencia para el reactor nuclear RP – 10 mediante el efecto Cherenkov permite medir la potencia para todos sus niveles. Mide en operaciones a baja potencia y también a alta potencia.

En efecto, el sistema de medición de potencia mediante el Efecto Cherenkov mide tanto a baja potencia (<320KW) como a potencia. El reactor nuclear RP–10, tiene una potencia nominal de 10 mega watts de potencia, pero debido a la licencia solo se puede operar el reactor hasta 6 mega watts de potencia. Los resultados indican que se realizó las pruebas de forma experimental hasta una potencia de 4.5 mega watts de potencia y se observan resultados de la medición desde que inician la operación del reactor nuclear hasta alcanzar los 4.5 mega watts de potencia.

6.2 Contrastación de la hipótesis con otros estudios similares.

No se ha podido contrastar con estudios similares a la medición de potencia mediante el efecto Cherenkov debido a que no hay. Un estudio similar, pero con el efecto Cherenkov es lo que hace el Organismo Internacional de Energía Atómica (OIEA), midiendo el porcentaje de quemado de combustibles de uranio mediante el Efecto Cherenkov midiendo la radiación ultravioleta de los elementos combustibles

VII. CONCLUSIONES

1. Se logró desarrollar el sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov, agregando un nuevo sistema de medición de potencia a los sistemas de medición de potencia del reactor Nuclear RP-10 cumpliendo con el objetivo principal del presente proyecto.
2. Al promedio de todos los pixeles de la capa azul en RGB obtenidos por tratamiento de imágenes del resplandor azul del efecto Cherenkov se le denominó escala de Cherenkov que a una potencia de 4.5MW alcanza los 105.943 con el cual es posible medir la potencia del Reactor Nuclear RP10.
3. Mejora la seguridad nuclear, radiológica y técnica, ya que a operaciones a baja potencia no solo se va monitorear mediante corriente de marcha 4, sino también mediante el sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov. Para operaciones a potencia, se tendrán 4 sistemas de medición de potencia que va permitir monitorear la potencia del Reactor Nuclear RP-10 aumentando la fiabilidad y disminuyendo la tasa de fallas.
4. Con el sistema de medición de potencia mediante el Efecto Cherenkov se puede monitorear la potencia del Reactor Nuclear RP-10 en todos sus rangos de potencia, desde el inicio de la operación, a baja potencia hasta

alcanzar potencia. Debido a la autorización de la operación, las pruebas se realizaron hasta alcanzar los 4.5 MW y no hasta alcanzar su potencia nominal que es de 10 MW, por lo que este sistema de medición de potencia mediante el Efecto Cherenkov es válido solo hasta 4.5 MW de potencia.

VIII. RECOMENDACIONES

1. Para su implementación y puesta en marcha es necesario una cámara IP67 debido al vapor en boca de tanque que se genera durante la operación del reactor nuclear RP-10.
2. Realizar mayores estudios sobre el Efecto Cherenkov, monitoreando los rayos ultravioletas en boca de tanque del reactor nuclear RP-10 a medida que aumenta la potencia del reactor nuclear.
3. Encontrar mayores formas de aprovechar al Efecto Cherenkov en el Reactor Nuclear RP-10 como el cálculo del porcentaje de quemado de los elementos combustibles.

IX. REFERENCIAS

- [1] Conexión Casual. **La majestuosa Radiación de Cherenkov**. Disponible en: <https://conexioncausal.wordpress.com/2014/11/01/la-majestuosa-radiacion-de-cherenkov/>. Consultado el 10 de octubre del 2016.
- [2] DUDERSTADT James, HAMILTON Louis. **Nuclear Reactor Analysis**. United States of America. Copyright John Wiley & Sons, Inc. 1976.
- [3] ESPINOZA LUNA Lupe. 1997. **Estudio de evaluación de los parámetros de fabricación de materiales combustibles para un reactor nuclear de investigación**. (Tesis de Grado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad de Química e Ingeniería Química. Lima. Recuperado el 10 de abril del 2017 desde <http://dspace.ipen.gob.pe/bitstream/ipen/276/3/T095.pdf>.
- [4] FÉLIX J., VELA M., ARRIETA R. **Monitoreo de potencia del reactor RP – 10 mediante la medición de la actividad del ^{16}N . Avances del proyecto**. Informe Científico Tecnológico 2011 del Instituto Peruano de Energía Nuclear. 2013. ISSN 1684 – 1662.
- [5] FERNANDEZ Carlos. **Una mirada al Efecto Cherenkov**. Instituto de Energía y Desarrollo Sustentable, Comisión Nacional de Energía Atómica – CNEA. Edición 2016. ISBN: 978-987-1323-12-8. Disponible en: http://www.cab.cnea.gov.ar/ieds/images/extras/hojitas_conocimiento/2016/fernandez_c-efecto_cherencov16_137-138.pdf. Consultado el 10 de abril 2017.
- [6] FISHBANE Paul, GASIOROWICZ Stephen, THORNTON Stephen. **Física para Ciencias e Ingenierías Volumen II**. México. Editorial Prentice–Hall Hispanoamérica. 1974.
- [7] FRISANCHO P. Ignacio. **Física Nuclear**, (Curso Básico). Perú. Centro Superior de Estudios Nucleares – CSEN. Instituto Peruano de Energía Nuclear. 1991.
- [8] Foro de la Industria Nuclear Española. **¿Sabes que es un Reactor Nuclear?** Disponible en: <http://www.foronuclear.org/es/el-experto-te-cuenta/120647-isabes-que-es-un-reactor-nuclear>. Consultado el 15 de junio de 2017.
- [9] GALLARDO Alberto. **Potencia máxima del reactor RP – 10 refrigerado por convección natural**. Informe Científico Tecnológico 2008 del Instituto Peruano de Energía Nuclear. 2010. ISSN 1684 – 1662.

- [10] GLASSTONE Samuel. SESONSKE Alexander. **Ingeniería de Reactores Nucleares**. España. Editorial Reverte, S.A. Edición en español. 1975.
- [11] GRAU Agustín. **La radiación Cherenkov en Sistemas no Triviales**, Informes Técnicos CIEMAT. Madrid. Editorial CIEMAT. 2002. ISSN: 1135 – 9420. Disponible en: <http://www.iaea.org/inis/collection/NCLCollectionStore/Public/33/070/33070597.pdf>. Consultado el 15 de junio del 2017.
- [12] HALLIDAY David. **Introducción a la Física Nuclear**. Barcelona. Editorial Reverte, S.A. 1950.
- [13] H. A. LORENTZ, A. EINSTEIN, H. MINKOWSKY AND H. WEYL. **The Principle of Relativity**: a collection of original memoirs on the special and general theory of relativity. Dover Publications, INC. United States This Translation First Published in 1923.
- [14] Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP–10. **Capítulo I: Introducción y Descripción General de la Institución**. IPEN, 27 setiembre 2013. (Informe interno).
- [15] Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP–10. **Capítulo II: Objetivos de Seguridad y Requisitos de Diseño de Ingeniería** IPEN, 27 setiembre 2013. (Informe interno).
- [16] Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP–10. **Capítulo V: El Reactor**. IPEN, 27 setiembre 2013. (Informe interno).
- [17] Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP–10. **Capítulo VI: Sistema de Refrigeración y Sistemas Conexos**. IPEN, 27 setiembre 2013. (Informe interno).
- [18] Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP–10. **Capítulo VIII: Instrumentación y Control**. IPEN, 27 setiembre 2013. (Informe interno).
- [19] Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP–10. **Capítulo XI: Introducción y Descripción General de la Institución**. IPEN 27, setiembre 2013. (Informe interno).
- [20] Instituto Peruano de Energía Nuclear, Informe de Seguridad del RP–10. **Capítulo XVII: Introducción y Descripción General de la Institución**. IPEN 27, setiembre 2013. (Informe interno).

- [21] INVAP. **Manual de Usuario del amplificador de cámara ACC – 1**. Argentina. 2000.
- [22] KEPIN Robert. **Physics of Nuclear Kinetics**. United States of America. Copyright Addison-Wesley Publishing Company, INC. 1965.
- [23] Klimov A. **Nuclear Physics and Nuclear Reactors**. Moscow. Editorial Mir Publishers. 1975.
- [24] KNOLL Glen F. **Radiation Detection and Measurement**. United States. John Wiley & Sons, Inc. Third Edition. 1999.
- [25] LAMARSH John, BARATTA Anthony. **Introduction to Nuclear Engineering**. Third Edition. 2001.
- [26] LAZARO G., BRUNA R., VELA M., PARREÑO F. **Implementación de monitorización de la potencia del RP-10 por N16 utilizando un detector de INA**. Informe Científico Tecnológico 1998 – 2001 del IPEN. 2002. ISSN 1684 – 1662.
- [27] LEWIS Elmer E. **Fundamentals of Nuclear Reactor Physics**. United States of America. Editorial Academic Press. 18th January 2008
- [28] MEJIA V. José. **Apuntes de Procesamiento digital de Imágenes**. Universidad Autónoma de San Luis de Potosi. 2005. Disponible en: http://read.pudn.com/downloads159/ebook/711796/Procesamiento_Digital_de_Imagenes.pdf. Consultado el 2 de junio 2017
- [29] MURRAY Raymond. **Introducción a la Ingeniería Nuclear**. Barcelona. Editorial Palestra. 1957
- [30] RONCAGLILOLO Pablo. **Procesamiento Digital de Imágenes**. Disponible en: http://www2.elo.utfsm.cl/~elo328/pdf1dpp/PDI04_Procesamiento_Basico_1dpp.pdf. Consultado el 2 de junio 2017.
- [31] SAAVEDRA Igor. **Física de Partículas**. EEUU. Unión Panamericana Washington DC. Segunda Edición. 1978.
- [32] SANGALLI Sergio. **Radiación de Cherenkov**. Publicado el 27 de marzo del 2011 <https://prezi.com/q8zhlzauogmb/radiacion-de-cherenkov/>.
- [33] VAN ROSSUM Guido. **El tutorial de Python**. Comunidad de Python Argentina. 2017. Disponible en: <http://docs.python.org.ar/tutorial/pdfs/TutorialPython3.pdf>. Consultado el 5 de mayo 2017.

[34] Vela M., Castro J., Arrieta R., Salazar A., Urcia. **Seguimiento de la potencia del reactor RP-10 por activación del agua refrigerante.** Informe Científico Tecnológico 2008 del Instituto Peruano de Energía Nuclear. 2010. ISSN 1684 – 1662.

ANEXOS

| MATRIZ DE CONSISTENCIA: “DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE POTENCIA PARA EL REACTOR NUCLEAR RP-10 MEDIANTE EL EFECTO CHERENKOV” | | | | | |
|---|--|--|---|--|--|
| PROBLEMA | OBJETIVOS | HIPOTESIS | VARIABLES | METODOLOGÍA | POBLACIÓN |
| <p>GENERAL:</p> <p>Debido a los requerimientos de diseño del Reactor Nuclear RP-10, y a la modernización de sus sistemas para aumentar su tiempo de vida. Se deben tener sistemas de medición de potencia del reactor, que sean adecuados, redundantes y diversos a fin de mantener la operatividad del reactor y garantizar la seguridad nuclear, radiológica y técnica.</p> <p>¿Se puede desarrollar un nuevo sistema de medición de potencia para el Reactor Nuclear de investigación “RP-10” mediante el efecto Cherenkov?</p> <p>ESPECIFICOS:</p> <p>¿Se puede cuantificar sobre una variable la intensidad del resplandor azul del efecto Cherenkov mediante tratamiento de imágenes, que nos va permitir calcular el algoritmo para medir la potencia del reactor nuclear RP-10?</p> <p>¿Cómo mejorará la seguridad nuclear, radiológica y técnica al tener el sistema de medición de potencia del Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov?</p> <p>¿Cuáles son los límites máximos y mínimos de potencia que puede medir el sistema de medición de potencia del Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov?</p> | <p>GENERAL:</p> <p>Tener sistemas de medición de potencia en el reactor nuclear de investigación RP-10 con diversos principios, diseñando un nuevo sistema de medición de potencia mediante el efecto Cherenkov.</p> <p>ESPECIFICOS:</p> <p>Cuantificar sobre una variable la intensidad del resplandor azul del efecto Cherenkov mediante tratamiento de imágenes, que nos va permitir calcular el algoritmo para medir la potencia del reactor nuclear RP-10.</p> <p>Analizar en qué medida habrá mejoras en la seguridad nuclear, radiológica y técnica el tener un nuevo sistema de medición de potencia en el Reactor Nuclear de investigación RP-10 mediante el efecto Cherenkov.</p> <p>Encontrar los límites de potencias máximas y mínimas que puede mostrar el sistema de medición de potencia en el Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov.</p> | <p>PRINCIPAL:</p> <p>Es posible desarrollar un nuevo sistema de medición de potencia para el reactor nuclear RP-10 mediante el efecto Cherenkov por tratamiento de imágenes.</p> <p>ESPECIFICO:</p> <p>Se puede cuantificar sobre una variable la intensidad del resplandor azul del efecto Cherenkov mediante tratamiento de imágenes. Esto nos permite calcular el algoritmo para medir la potencia del reactor nuclear RP-10</p> <p>Habrá mejoras en la seguridad nuclear, radiológica y técnica el tener el sistema de medición de potencia del Reactor Nuclear “RP-10” mediante el efecto Cherenkov</p> <p>El nuevo sistema de medición de potencia para el reactor nuclear RP - 10 mediante el efecto Cherenkov permite medir la potencia para todos sus niveles. Mide en operaciones a baja potencia y también a alta potencia.</p> | <p>INDEPENDIENTE:</p> <p>Intensidad del efecto Cherenkov.</p> <p>DEPENDIENTES:</p> <p>Potencia del Reactor Nuclear RP-10.</p> <p>Flujo neutrónico</p> | <p>TIPO DE INVESTIGACION</p> <p>Según la clase de medios utilizados para obtener los datos. El presente trabajo de investigación se clasifica de tipo experimental y documental.</p> <p>El proyecto de investigación científico de tipo experimental, en razón que para obtener los datos se va medir la potencia del reactor nuclear RP-10 estando en operación, realizando un análisis exhaustivo para garantizar la confiabilidad y robustez del sistema de acuerdo a los requerimientos de seguridad del Reactor Nuclear RP-10. Además de sustentarse de Informes de Seguridad y de Informes Técnicos Científicos publicados.</p> <p>DISEÑO DE LA INVESTIGACION</p> <p>Los pasos para fundamentar, explicar y realizar el trabajo de investigación fueron los siguientes:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Recolección de información sobre el efecto Cherenkov, física nuclear, reactores nucleares, los sistemas de medición de potencia y tratamiento de imágenes. 2. Adquisición de imágenes mediante una cámara de video instalada en el tanque principal del reactor, apuntando su núcleo, para tener como base que es lo que queremos medir. 3. Selección y desarrollo del Hardware y Software para tratamiento de imágenes. 4. Pruebas en boca de tanque del sistema de adquisición de imágenes paramonitorear su comportamiento, y en función a eso terminar el desarrollo del sistema de medición de potencia. 5. Revisión de los sistemas de medición de potencia en el reactor nuclear RP - 10. 6. Comparación de la intensidad del efecto Cherenkov con los otros sistemas de medición de potencia, principalmente con el sistema de medición de potencia térmica. 7. Calculo del algoritmo que permita la medición de potencia del reactor nuclear mediante el efecto Cherenkov. | <p>Población</p> <p>El reactor nuclear de investigación RP-10 es una fuente de neutrones, La población es la cantidad de neutrones generados en el núcleo del reactor, debido a los productos de fisión.</p> <p>Muestra</p> <p>La población neutrónica se calcula mediante el flujo neutrónico, Este permite calcular la potencia neutrónica. Conociendo la potencia mediante el efecto Cherenkov, podemos calcular la población de neutrones.</p> |

ANEXO 02: PROGRAMA EN MATLAB

```
%adquisicion de imagenes
close all;clear all;clc;
data=0;

cam=webcam;
preview(cam)
muestras=input('Ingrese cantidad de muestras :');
for i=1:muestras

pause(1)%1seg
img = snapshot(cam);

imwrite(img,[num2str(i) '.jpg']);

hold on
subplot(2,1,1)
imshow(img);
xlabel({'Imagen Adquirida' })

r=img(:,:,1 );
g=img(:,:,2 );
b=img(:,:,3 );

%hallamos el promedio
rojo= mean2(r);
verde= mean2(g);
azul= mean2(b);
fprintf('Valor promedio azul: %.2f verde : %.2f rojo:%.2f
\n',azul,verde,rojo);
data=[data azul];
x=1:length(data)-1 ;

subplot(2,1,2)
plot(x,data(2:length(data)),'-r*') %dibujar el punto de la
temperatura en el tiempo que va
xlabel({'Promedio imagen','(color azul)'})
pause(1) %pausar el tiempo un segundo

end
```

ANEXO 03: PROGRAMA EN PYTHON PARA WINDOWS

```
# -*- coding: utf-8 -*-
import socket
from time import clock,sleep
import cv2
import numpy as np
import os
import matplotlib.pyplot as plt
global n
tiempo=1 #SEGUNDOS
i=1
y=[]
cont=1
sig=0
tiempo=0.7
cam=0

def ploteo(dato,n):
    global y
    #dato=float(dato)
    y.append(dato)
    print y
    x=range(n)
    print x
    #plt.axis([0,10 ,100 ,150])
    #plt.yscale('linear')
    print "El valor azul promedio es :",dato
    plt.xlim(0,n+1)
    plt.plot(x,y,'r')
    plt.draw()
    plt.show(block=False)
    plt.pause(0.05)

def data_save(data):
    archivo = open('data.txt', 'w')
    archivo.write(str(data))
    archivo.close()

def operacion(img,n):
    img=img[0:480,0:640,0] #img[filas,columnas,capas]
    blue=0]
    ave=np.mean(img)
    ave=round(ave,3)
    print "El valor azul promedio es :",ave
    return ave

print "Inicia en 3 segundos"
sleep(3)

n=5
```

```
cap=cv2.VideoCapture(0)
sleep(1)
t0 = clock()

while True:
    ret,img=cap.read()
    cv2.imshow('Video Output',img)

    cv2.waitKey(1) #mantiene la ventana
    if (clock() - t0)>tiempo:
        t0 = clock()
        ave=operacion(img,i)
        data_save(ave)
        i=i+1

print "PROGRAMA TERMINADO"
print "CERRAR LA VENTANA PARA CONTINUAR"
s.close()
cap.release()
cv2.destroyAllWindows('Video Output')
```

ANEXO 04: PROGRAMA EN PYTHON PARA EL RASPBERRY PI 3

```
import socket
from time import clock,sleep
import numpy as np
import os
import matplotlib.pyplot as plt
tiempo=1 #SEGUNDOS
i=1
y=[]
cont=1
sig=0

tiempo=0.7
cam=0

def ploteo(dato,n):
    global y,i
    if n>=100:
        y=[]
        i=0
        plt.clf()
        return
    #dato=float(dato)
    y.append(dato)
    x=range(n)
    print "El valor azul promedio es :",dato
    plt.xlim(0,n+1)
    plt.plot(x,y,'r')
    plt.draw()
    plt.title('POTENCIA (MW)', fontsize=20)
    plt.xlabel('TIEMPO', fontsize=18)
    plt.ylabel('ESCALA DE AZULES', fontsize=16)
    plt.show(block=False)
    plt.pause(0.05)

def data_read():
    archivo = open('data.txt', 'r')
    data=archivo.read(7)
    print data
    archivo.close()
    return data

sleep(6)
t0 = clock()
while True:

    if (clock() - t0)>tiempo:
        t0 = clock()
        ave=data_read()
        ploteo(ave,i)
        i=i+1

print "PROGRAMA TERMINADO"
print "CERRAR LA VENTANA PARA CONTINUAR"
```

```

# -*- coding: utf-8 -*-

import sys
from time import clock
from PyQt4 import QtGui
from PyQt4.QtCore import QTimer, SIGNAL, QObject
from time import sleep

import os

tiempo=1
def inicio():
    global widget, l, app
    app = QtGui.QApplication(sys.argv)
    widget = QtGui.QWidget()
    widget.setGeometry(500,500,350,117)
    l = QtGui.QLabel(widget)
    l.setGeometry(80,50,190,50)
    font = QtGui.QFont()
    font.setPointSize(45)
    l.setFont(font)
    l.setText("inicio")
    widget.show()

def data_read():
    archivo = open('data.txt', 'r')
    data=archivo.read(6)
    print data
    archivo.close()
    return data

def main():
    global timer
    timer=QTimer()
    QObject.connect(timer, SIGNAL("timeout()"),mostrar)
    timer.start(1000)

    return app.exec_()

def mostrar():
    global timer
    print "entro"

    l.setText(str(data_read()))
    timer.stop()
    #return app.exec_()

if __name__ == '__main__':

    inicio()
    sys.exit(main())

```