



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica

Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

**Diseño de un sistema de instrumentación nuclear para
el monitoreo de la reactividad en el reactor RP-10**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

AUTOR

Juan Antonio SUICA HUILLCA

ASESOR

Dra. Amanda Georgina CÁCERES MARI

Lima, Perú

2026



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Suica, J. (2026). *Diseño de un sistema de instrumentación nuclear para el monitoreo de la reactividad en el reactor RP-10*. [Trabajo de Suficiencia Profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Juan Antonio Suica Huílca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	47051662
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0007-8889-9936
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Amanda Georgina Cáceres Mari
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	06284576
URL de ORCID	https://orcid.org/0009-0006-7663-6787
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Teresa Esther Núñez Zúñiga
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08006778
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Victor Edmundo Alva Saldaña
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07299248
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Jean Carlos Malca Fernández
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	45535181
Datos de investigación	
Línea de investigación	C.0.4.13. Instrumentación digital
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	No Aplica

Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Lima Provincia: Lima Distrito: Carabayllo Latitud: -11.799477 Longitud: -77.011915
Año o rango de años en que se realizó la investigación	Noviembre 2023 - Diciembre de 2024
URL de disciplinas OCDE	Ingeniería eléctrica, Ingeniería Electrónica https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.02.01 Ingeniería relacionada con la energía nuclear https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.03.05



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA Y ELÉCTRICA
Teléfono 619-7000 Anexo 4226
Calle Germán Amezaga 375 – Lima 1 – Perú



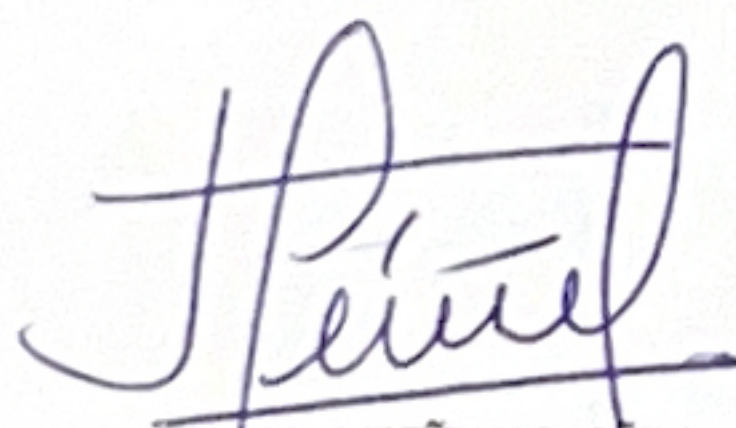
ACTA DE SUSTENTACIÓN
TRABAJO DE
SUFICIENCIA PROFESIONAL
ACTA N°11/FIEE-PPP/2026

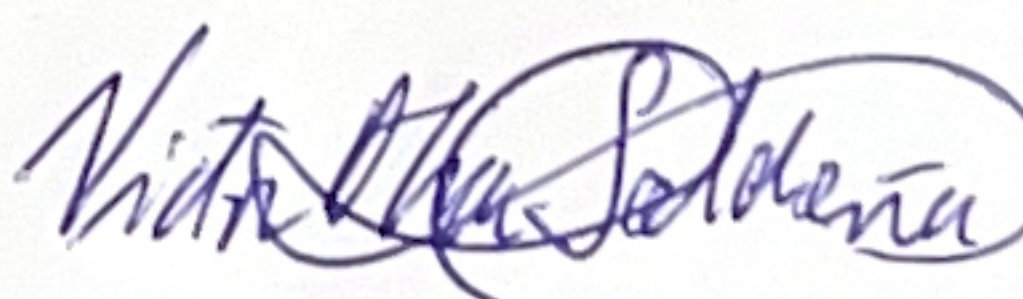
Los suscritos Miembros del Jurado, docentes permanentes de las Escuelas Profesionales de la Facultad de Ingeniería Electrónica y Eléctrica, reunidos en la fecha 12 de marzo del 2026, como presidente de Jurado la **DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA**, integrado por el Miembro de Jurado el **ING. VICTOR EDMUNDO ALVA SALDAÑA**, el Miembro de Jurado el **MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ** y Miembro Asesor el **DRA. AMANDA GEORGINA CÁCERES MARI**.

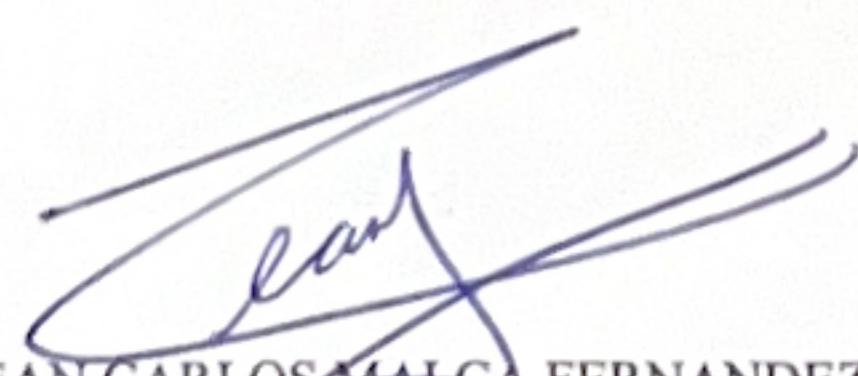
Después de escuchar la Sustentación Presencial del Trabajo de Suficiencia Profesional del Bachiller **JUAN ANTONIO SUICA HUILLCA** con código 11190022 que para optar el Título Profesional de Ingeniero Electrónico sustentó el Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **DISEÑO DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN NUCLEAR PARA EL MONITOREO DE LA REACTIVIDAD EN EL REACTOR RP-10**.

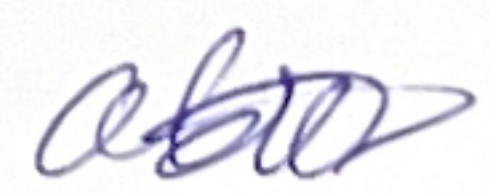
El jurado examinador procedió a formular las preguntas reglamentarias y, luego de una deliberación en privado, decidió otorgarle el calificativo de 18 (Dieciocho).

Ciudad Universitaria, 12 de marzo del 2026


DRA. TERESA ESTHER NUÑEZ ZUÑIGA
Presidente Jurado


ING. VICTOR EDMUNDO ALVA SALDAÑA
Miembro Jurado


MG. JEAN CARLOS MALCA FERNANDEZ
Miembro Jurado


DRA. AMANDA GEORGINA CÁCERES MARI
Miembro Asesor



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo , **AMANDA GEORGINA CÁCERES MARI** en mi condición de asesor acreditado con el Dictamen N°08/FIEE-PPP/2026 del Trabajo de Suficiencia Profesional titulado **DISEÑO DE UN SISTEMA DE INSTRUMENTACIÓN NUCLEAR PARA EL MONITOREO DE LA REACTIVIDAD EN EL REACTOR RP-10**, presentado por el bachiller JUAN ANTONIO SUICA HUILLCA, para optar al título profesional de Ingeniero Electrónico. CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 5% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su publicación en el repositorio institucional.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título de Ingeniero Electrónico.

Lima, 12 de Marzo del 2026

Firma del Asesor

DNI: 062 84576

Nombres y apellidos del asesor:

AMANDA GEORGINA CÁCERES MARI

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mis
padres Virgilio y Ricarda.

AGRADECIMIENTOS

A mis amigos del Instituto Peruano de Energía Nuclear por su apoyo en la realización del presente trabajo.

RESUMEN

Actualmente, el reactor RP-10 no cuenta con instrumentación dedicada para la estimación de la reactividad, calculada manualmente, aumentando la duración de los ensayos y la probabilidad de errores humanos. En este contexto, el presente trabajo describe el diseño de un sistema de instrumentación nuclear para el monitoreo de la reactividad en el reactor RP-10. El sistema integra un detector de neutrones y un módulo de procesamiento que acondiciona, digitaliza y calcula la reactividad mediante un algoritmo basado en el método de cinética inversa. Los resultados se visualizan localmente y se transmiten a una computadora para su supervisión y registro. Las pruebas experimentales demostraron que los valores generados por el sistema fueron consistentes con el método del período, referencia estándar en las operaciones del RP-10. Asimismo, el sistema presentó una respuesta más rápida que el procedimiento manual, redujo errores en la adquisición de datos y mostró mayor sensibilidad ante pequeñas variaciones de reactividad. En conjunto, el sistema propuesto constituye una alternativa redundante que fortalece la defensa en profundidad y aporta a la modernización de la instrumentación nuclear del RP-10 mediante un método actualizado y eficiente para el monitoreo de parámetros críticos.

Palabras clave: instrumentación nuclear, reactividad, RP-10.

ABSTRACT

Currently, the RP-10 reactor does not have dedicated instrumentation for estimating reactivity, which is calculated manually, increasing the duration of tests and the probability of human error. In this context, this paper describes the design of a nuclear instrumentation system for monitoring reactivity in the RP-10 reactor. The system integrates a neutron detector and a processing module that conditions, digitizes, and calculates reactivity using an algorithm based on the inverse kinetics method. The results are displayed locally and transmitted to a computer for monitoring and recording. Experimental tests demonstrated that the values generated by the system were consistent with the period method, the standard reference in RP-10 operations. Likewise, the system responded more quickly than the manual procedure, reduced errors in data acquisition, and showed greater sensitivity to small variations in reactivity. Overall, the proposed system constitutes a redundant alternative that strengthens defense in depth, and contributes to the modernization of the RP-10's nuclear instrumentation through an updated and efficient method for monitoring critical parameters.

Keywords: nuclear instrumentation, reactivity, RP-10.

ÍNDICE GENERAL

CARÁTULA	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
RESUMEN	iv
ABSTRACT	v
ÍNDICE GENERAL	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
LISTA DE TABLAS	xi
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 Objetivos del informe	1
1.2 Estructura del informe	2
CAPÍTULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD	3
2.1 Institución – Actividad que desarrolla	3
2.2 Periodo de duración de la actividad.	3
2.3 Finalidad y objetivos de la entidad	3
2.4 Razón social	4
2.5 Dirección postal	4
2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo	4
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD	5
3.1 Organización de la actividad	5
3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad	6
3.2.1 Finalidad	6
3.2.2 Objetivos	6
3.2.2.1 Objetivo General	6
3.2.2.2 Objetivos Específicos	6

3.3	Problemática	6
3.3.1	Problema General	7
3.3.2	Problemas Específicos	7
3.3.3	Justificación e importancia de la investigación	7
3.4	Metodología, Procedimientos	8
3.4.1	Bases teóricas	8
3.4.2	Marco conceptual	28
3.4.3	Requisitos del sistema	30
3.4.4	Diseño del sistema de instrumentación nuclear	32
3.4.4.1	Arquitectura del sistema	32
3.4.4.2	Selección de módulos del sistema de monitoreo	34
3.4.4.3	Diseño del reactímetro digital	38
3.4.4.4	Diseño del Firmware del reactímetro	50
3.4.5	Implementación del sistema	54
3.5	Resultado de la actividad	61
3.5.1	Pruebas en el laboratorio	61
3.5.2	Pruebas en el Reactor	62
CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS		69
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES		73
CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES		75
CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA		76
CAPÍTULO VIII: ANEXOS		84

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1</i> Organigrama simplificado del IPEN.	5
<i>Figura 2</i> Esquema funcional de un sistema de medición de reactividad.	11
<i>Figura 3</i> Esquema simplificado de una cámara de ionización compensada.	13
<i>Figura 4</i> Esquema básico de un TIA.	14
<i>Figura 5</i> Esquema general del filtro pasabajos Sallen-Key.	16
<i>Figura 6</i> Esquema de un limitador de voltaje con diodos a la entrada de un ADC.	16
<i>Figura 7</i> Esquema funcional de un reactímetro digital.	17
<i>Figura 8</i> Representación esquemática del proceso de fisión nuclear.	18
<i>Figura 9</i> Reacción en cadena autosostenida. Para $k_{eff} = 1$, los neutrones de la generación 2 deben ser iguales a la generación 1.	20
<i>Figura 10</i> Evolución temporal de la población neutrónica normalizada para 3 condiciones de reactividad.	20
<i>Figura 11</i> Diagrama de flujo de cálculo de reactividad por el método del periodo a partir de la población neutrónica.	26
<i>Figura 12</i> Diagrama de flujo de cálculo de reactividad por el método de cinética inversa a partir de la población neutrónica.	28
<i>Figura 13</i> Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de reactividad para el RP-10.	33
<i>Figura 14</i> CIC del laboratorio de física experimental de reactores del RP-10.	35
<i>Figura 15</i> Fuente de alto voltaje modelo 3002D de Canberra.	36
<i>Figura 16</i> Amplificador de transimpedancia modelo K330 de INVAP.	38
<i>Figura 17</i> Esquema del regulador de +5 V basado en el integrado AMS1117.	40

<i>Figura 18</i> Esquema de la etapa de regulación de -5 V basado en el integrado ICL7660.	41
<i>Figura 19</i> Esquema del amplificador de ganancia unitaria.	43
<i>Figura 20</i> Evolución de la población de neutrones simulada, para una inserción de reactividad de $0,100\ \$$.	44
<i>Figura 21</i> Espectro de $n(t)$ para una inserción de reactividad de $0,100\ \$$.	44
<i>Figura 22</i> Esquema del filtro Sallen-Key implementado.	45
<i>Figura 23</i> Respuesta en frecuencia del filtro implementado.	45
<i>Figura 24</i> Esquema del limitador de voltaje implementado para el reactímetro.	46
<i>Figura 25</i> Arduino Due.	47
<i>Figura 26</i> Visualizador de 7 segmentos para la visualización de reactividad.	48
<i>Figura 27</i> Diagrama de flujo de la aplicación de adquisición y registro de datos.	49
<i>Figura 28</i> Esquema general del firmware del reactímetro.	50
<i>Figura 29</i> Diagrama de flujo del firmware del reactímetro.	51
<i>Figura 30</i> Diagrama de flujo del algoritmo diseñado para el cálculo de reactividad.	53
<i>Figura 31</i> Vista 3D de la PCB de la etapa de acondicionamiento.	54
<i>Figura 32</i> Montaje de la PCB de la etapa de acondicionamiento.	55
<i>Figura 33</i> Vista 3D de los módulos electrónicos que componen el reactímetro.	55
<i>Figura 34</i> Integración de la PCB de acondicionamiento con el conversor DC/DC y el Arduino Due.	56
<i>Figura 35</i> Vista 3D del reactímetro digital en formato NIM.	56
<i>Figura 36</i> Módulo reactímetro digital ensamblado en formato NIM.	57
<i>Figura 37</i> IDE de Arduino. Se muestra la sección inicial del firmware.	58
<i>Figura 38</i> Ventana de configuración de la aplicación de escritorio.	58
<i>Figura 39</i> Ventana de control y visualización de la aplicación.	59
<i>Figura 40</i> Archivo de texto generado con el aplicativo de escritorio.	59
<i>Figura 41</i> Cadena de instrumentación del sistema de monitoreo de reactividad.	60

<i>Figura 42</i> Cadena de instrumentación montada en un rack de la sala de control del RP-10.	60
<i>Figura 43</i> Simulación de la señal de un detector de neutrones.	62
<i>Figura 44</i> Simulación de una inserción de reactividad de 0,200 \$.	62
<i>Figura 45</i> Montaje experimental del reactímetro en el reactor RP-10.	63
<i>Figura 46</i> Evolución temporal de la reactividad y el flujo neutrónico en el reactor RP-10.	65
<i>Figura 47</i> Reactividad acumulada para la barra de control BC2, obtenida con el método del periodo y el reactímetro digital.	67
<i>Figura 48</i> Fluctuaciones de reactividad durante el ensayo de calibración.	67
<i>Figura 49</i> Desviación del estado crítico durante el ensayo de calibración.	68
<i>Figura B1</i> Esquema del reactor nuclear RP-10.	85
<i>Figura B2</i> Esquema de la reacción en cadena en el núcleo del reactor RP-10.	86

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1</i> Requisitos del sistema de monitoreo de reactividad.	31
<i>Tabla 2</i> Resultados de la calibración de la barra de control BC2.	66
<i>Tabla 3</i> Costo estimado de materiales y componentes.	71
<i>Tabla 4</i> Estimaciones de reducción de tiempo y costo operativo en el RP-10.	71
<i>Tabla A1</i> Parámetros cinéticos del núcleo del reactor.	84
<i>Tabla A2</i> Constantes cinéticas usadas.	84

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

En la actualidad, el reactor RP-10 no cuenta con instrumentación dedicada para la estimación de la reactividad. Por ello, este parámetro se obtiene a partir de señales de la instrumentación existente y se calcula manualmente, lo que incrementa la duración de los ensayos experimentales y eleva la probabilidad de errores humanos.

1.1 Objetivos del informe

El objetivo del presente trabajo es diseñar un sistema de instrumentación nuclear para el monitoreo de la reactividad en el reactor RP-10, a fin de reducir la dependencia de cálculos manuales durante los ensayos. El trabajo se centra en automatizar la estimación de la reactividad en tiempo real mediante el método de cinética inversa y en evaluar su desempeño mediante la comparación con el método del período, referencia operativa en el RP-10.

Los reactores de investigación han desempeñado un rol esencial en el desarrollo de aplicaciones médicas y científicas, debido a su diseño más simple y a su menor consumo de combustible en comparación con los reactores de potencia. Su función principal es la producción de neutrones, los cuales se emplean en la generación de radioisótopos utilizados en el diagnóstico y tratamiento médicos, así como en la irradiación de materiales con aplicaciones en campos como la industria, la medicina, la agricultura y la geocronología (Jawerth & Mattar, 2019).

En el Perú, el reactor RP-10 opera desde 1988 en el Centro Nuclear RACSO. Con una potencia térmica de 10 MW y un diseño de piletta abierta,

se utiliza principalmente para la producción de radioisótopos médicos, como el tecnecio-99m, ampliamente empleado en hospitales y clínicas del país. Asimismo, cumple un rol relevante en el desarrollo tecnológico nacional, al facilitar estudios de materiales mediante análisis por activación neutrónica en sectores como la minería y otras industrias (Anaya et al., 2002).

1.2 Estructura del informe

El presente documento se encuentra organizado en seis capítulos. El Capítulo I corresponde a la introducción. El Capítulo II presenta el entorno de ejecución, que incluye la institución, el período, la finalidad, la razón social, la dirección y los datos de contacto. El Capítulo III describe la actividad desarrollada, abordando la organización, la finalidad y los objetivos; la problemática y su justificación; la metodología y el marco conceptual. Asimismo, presenta los requisitos, el diseño y la implementación del sistema, así como los resultados de las pruebas realizadas en laboratorio y en el reactor. El Capítulo IV presenta los resultados obtenidos y compara el desempeño del sistema con el método del período. El Capítulo V expone las conclusiones, mientras que el Capítulo VI presenta las recomendaciones. Finalmente, se incluyen las referencias y los anexos correspondientes.

CAPÍTULO II: INFORMACIÓN DEL LUGAR DONDE SE DESARROLLÓ LA ACTIVIDAD

2.1 Institución – Actividad que desarrolla

Las actividades se realizaron en el reactor nuclear RP-10 del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN); ubicado en Huarangal, Carabayllo. En específico, se llevaron a cabo en el Laboratorio de Física Experimental de Reactores (LABFER) del área de Cálculo, Análisis y Seguridad (CASE), y en la sala de control del reactor. El IPEN es una institución científica cuya misión es normar, promover, supervisar y desarrollar las actividades aplicativas de la energía nuclear de tal forma que contribuyan eficazmente al desarrollo nacional. Asimismo, el IPEN gestiona el reactor nuclear RP-10 y ofrece servicios de producción de radiofármacos, monitoreo radiológico de muestras ambientales, control de calidad, calibración y mantenimiento de monitores de radiación ionizante, irradiación de muestras y gestión de residuos radiactivos.

2.2 Periodo de duración de la actividad.

La implementación del sistema y las pruebas finales se realizaron entre noviembre de 2023 y diciembre de 2024.

2.3 Finalidad y objetivos de la entidad

Finalidad

El Instituto Peruano de Energía Nuclear, es el ente rector de la energía nuclear en el Perú. Su finalidad es promover y desarrollar el uso de la energía

nuclear, asegurando su aplicación segura y pacífica en beneficio de la población y del desarrollo nacional.

Objetivo

Desarrollar y promover aplicaciones pacíficas de la energía nuclear y tecnologías de radiación que atiendan demandas de sectores productivos y sociales (industria, minería, ambiente, agricultura y salud), fortaleciendo la competitividad del país y contribuyendo al bienestar de la población, en el marco de la regulación y supervisión correspondientes.

2.4 Razón social

Instituto Peruano de Energía Nuclear, con RUC: 20131371293.

2.5 Dirección postal

Av. Canadá N° 1480.

San Borja.

Lima, 15034.

Perú.

2.6 Nombre y correo electrónico del profesional a cargo

Germán Cáceres Vivanco

Subdirector de reactores nucleares

Email: gcaceres@ipen.gob.pe

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DE LA ACTIVIDAD

3.1 Organización de la actividad

Las actividades se realizaron en el Departamento de Cálculo, Análisis y Seguridad (CASE), adscrito a la Subdirección de Operación de Reactores Nucleares del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). Este departamento se encarga de evaluar los parámetros de seguridad del reactor mediante simulaciones, cálculos y ensayos experimentales. La Figura 1 muestra el organigrama simplificado de la institución. La actividad se desarrolló bajo supervisión del Ing. Wilder Joel Arévalo Farro (jefe del área CASE) y del Ing. Germán Cáceres Vivanco (Subdirector de Reactores), quien otorgó la conformidad del servicio.

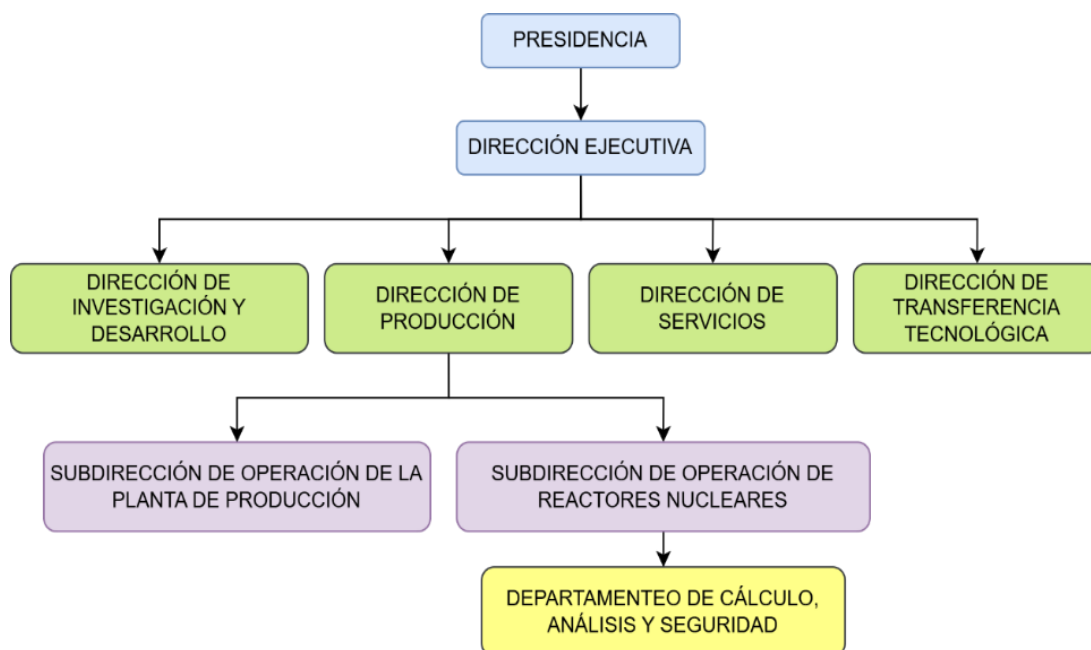


Figura 1 Organigrama simplificado del IPEN. Fuente. Adaptado de Estructura orgánica (IPEN, 2018).

3.2 Finalidad y objetivos de la Actividad

3.2.1 Finalidad

La finalidad de la actividad es desarrollar un sistema automatizado para el monitoreo en tiempo real de la reactividad en el reactor RP-10 mediante el método de cinética inversa. El sistema integra un detector, un amplificador de corriente y un reactímetro digital, con el fin de disminuir la intervención manual y los tiempos de determinación de la reactividad, así como de proporcionar un canal redundante para el monitoreo de este parámetro crítico para la operación segura del reactor.

3.2.2 Objetivos

3.2.2.1 Objetivo General

Determinar el diseño de un sistema de instrumentación nuclear para el monitoreo de la reactividad en el reactor rp-10.

3.2.2.2 Objetivos Específicos

- Determinar el diseño de un sistema de instrumentación nuclear.
- Monitorear la reactividad en el reactor RP-10.
- Validar el desempeño de la instrumentación nuclear implementada, evaluando exactitud, resolución y duración del procedimiento de medición, comparándola con el método del período.

3.3 Problemática

Para la operación segura y eficiente del reactor nuclear RP-10, es fundamental el monitoreo continuo de parámetros nucleares. La reactividad es un parámetro crítico, porque permite describir el comportamiento temporal del núcleo y su proximidad al estado de criticidad del reactor (Huaccho, 2017; Ansari, 1991; Wan *et al.*, 2018).

Aunque el Organismo Internacional de Energía Atómica (IAEA) recomienda modernizar y automatizar la instrumentación en reactores de investigación (IAEA, 2023; Auerbach & Carpenter, 1978, el reactor RP-10 no cuenta con instrumentación dedicada para determinar la reactividad, sino que esta se estima a partir de señales neutrónicas y se calcula manualmente en hojas de cálculo. Este método, si bien es confiable para determinar parámetros críticos de seguridad, no es eficiente para otras aplicaciones. Este procedimiento puede extender algunos ensayos hasta cuatro horas mediante la aplicación de este método y es susceptible a errores humanos en la toma de datos. Esto afecta la disponibilidad del reactor para otras actividades programadas, como la producción de radioisótopos. Además, presenta limitaciones en la detección de variaciones pequeñas de reactividad (menores que 0,020 %), lo que reduce su precisión en ensayos más exigentes.

Por ello, se requiere un sistema que permita automatizar la adquisición de datos y el cálculo de la reactividad en tiempo real. Ello con el fin de reducir el tiempo de los ensayos, disminuir los errores humanos y mejorar la precisión en la detección de pequeñas variaciones de reactividad.

3.3.1 Problema General

¿De qué manera es posible determinar el diseño de un sistema de instrumentación nuclear para el monitoreo de reactividad en el reactor rp-10?

3.3.2 Problemas Específicos

- ¿Cómo determinar el diseño de un sistema de instrumentación nuclear?
- ¿Cómo monitorear la reactividad en el RP-10?
- ¿Cómo Validar el desempeño del sistema implementado, evaluando exactitud, resolución y duración del procedimiento de medición, comparándola con el método del período?

3.3.3 Justificación e importancia de la investigación

Justificación técnica: la presente investigación es importante porque permitió desarrollar un sistema de instrumentación nuclear dedicado para

determinar la reactividad en tiempo real, estableciendo un precedente tecnológico para la actualización de otros sistemas del reactor RP-10.

Justificación operativa: La investigación permitió mejorar la eficiencia de operación del reactor al automatizar la adquisición de datos y el cálculo de la reactividad, reduciendo los tiempos de ensayo e incrementando la disponibilidad del RP-10 para otras actividades programadas.

Justificación social: Esta investigación contribuye a la continuidad de los servicios del RP-10 al favorecer un uso más eficiente del reactor y una mayor disponibilidad para la producción de radiofármacos, empleados principalmente en el diagnóstico y tratamiento médicos.

3.4 Metodología, Procedimientos

3.4.1 Bases teóricas

Antecedentes nacionales

Zúñiga *et al.* (2002) resolvieron de forma analítica y numérica las ecuaciones de cinética puntual para un reactor nuclear, empleando modelos de uno y seis grupos de neutrones retardados con los parámetros de Keepin. Sus resultados muestran cómo evoluciona la población neutrónica en un reactor nuclear ante inserciones de reactividad, y validan curvas de referencia mediante soluciones en Mathematica. Este trabajo resulta útil en el contexto del reactor RP-10, ya que permite relacionar la variación de la potencia con la reactividad; sin embargo, no aborda la implementación en sistemas de monitoreo en tiempo real.

Castro *et al.* (2005) realizaron mediciones de reactividad en el reactor RP-10 utilizando un sistema de instrumentación nuclear desarrollado en Argentina, compuesto por una tarjeta de adquisición de datos y el software FERCIN. Este sistema permitía calcular la reactividad mediante los métodos de cinética inversa y Rod-Drop. A su vez, posibilitó su comparación con el

método del periodo asintótico (método manual), evidenciando que el reactímetro digital resultaba más confiable y eficiente que la toma manual de datos. Entre sus aportes destaca la calibración del banco de barras del reactor en peso de reactividad y la determinación del factor de seguridad de reactividad (FSR), lo que fortaleció la caracterización cinética del reactor. Sin embargo, el sistema dejó de operar con el tiempo debido a la obsolescencia de sus componentes y a la falta de código fuente del software, que impidió su actualización a plataformas más modernas.

Antecedentes Internacionales

Suzuki y Tsunoda (1964) desarrollaron uno de los primeros reactímetros. Construido con técnicas de cómputo analógico mediante amplificadores operacionales y redes RC, ello a fin de resolver en tiempo real la ecuación de cinética inversa. El sistema incorporaba un circuito de cambio de escala que permitía cubrir todo el rango de operación del reactor, desde el arranque hasta niveles de potencia nominal. El reactímetro se validó en el Tokai Training Reactor-1 (TTR-1, Japón) al medir el peso en reactividad de las barras de control (capacidad de inserción de reactividad negativa) mediante ensayos de rod-drop y arranques, y se comparó con el método del período. El desarrollo de este dispositivo representó un avance importante al simplificar el cálculo de reactividad y permitir su medición continua. Esto abrió la posibilidad de emplearlo como monitor en tiempo real durante la operación del reactor.

Khalafi *et al.* (2011) diseñaron y construyeron un reactímetro digital para el Tehran Research Reactor (TRR, Irán) utilizando el método de cinética inversa. El dispositivo recibía la señal proveniente de la instrumentación del reactor, la amplificaba y la convertía a voltaje, para luego ser digitalizada en un microcontrolador PIC16F877 y transmitida a una computadora. Para ese propósito, una aplicación desarrollada en MATLAB procesa los datos y calcula la reactividad en tiempo real. La validación se realizó en el TRR comparando con resultados experimentales del peso en reactividad de las barras de control, el coeficiente de vacío y los cambios de reactividad durante el arranque hasta la potencia nominal, reportándose un error relativo máximo del

13 %. Los autores muestran que es posible construir un sistema confiable usando instrumentación accesible y componentes de bajo costo, aportando un antecedente útil para diseñar soluciones semejantes en el RP-10.

Benhaim *et al.* (2012) desarrollan un reactímetro digital para el Reactor Argentino – 1 (RA-1, Argentina), que permite calcular la reactividad en tiempo real a partir de la señal de potencia o flujo neutrónico. Para implementar el cálculo, discretizaron las ecuaciones de cinética puntual inversa con seis grupos de neutrones retardados. Con dicho fin, aplicaron un esquema de Euler hacia adelante y métodos de integración lineal y exponencial por tramos. El sistema fue validado con detectores de cámara de ionización y helio-3, y mostró resultados consistentes con los de un reactímetro de referencia. Este trabajo aporta un procedimiento práctico para la estimación digital de la reactividad y sirve como referencia para el diseño de sistemas de medición en el RP-10.

Vo *et al.* (2023) implementaron en un FPGA un controlador digital para el Dalat Nuclear Research Reactor (DNRR, Vietnam), capaz de calcular en línea la reactividad con el modelo de cinética puntual de seis grupos y estabilizar la potencia mediante la barra automática. El sistema procesa señales en frecuencia provenientes de detectores de neutrones, aplica filtrado por media móvil y alcanza discrepancias ≤ 5 % respecto al módulo de referencia BNO-102R1 en medición de reactividad y $< \pm 1$ % en control de potencia. El sistema fue validado en todo el rango de operación del reactor, desde el estado subcrítico hasta el 100 % de la potencia nominal, incluyendo pruebas en condiciones de parada de emergencia (SCRAM). La elección de FPGA permite ejecutar los cálculos en paralelo y en tiempo real, garantizando confiabilidad y baja latencia en la respuesta. Este trabajo entrega detalles prácticos de diseño y operación que resultan útiles como guía para desarrollar un sistema equivalente en el RP-10.

3.4.1.1 Sistema de instrumentación nuclear

Comprende un conjunto de dispositivos y detectores que permiten cuantificar la población de neutrones en un reactor y determinar parámetros

críticos a partir de ella. Esta información es indispensable para la operación segura y eficiente del reactor. Debido al entorno en el que se utilizan, el diseño de estos sistemas debe considerar factores clave. Entre ellos destacan la robustez de los equipos, la compatibilidad con la instrumentación existente del reactor y la capacidad de discriminar la radiación de neutrones de otros tipos de radiación.

Sistema de medición de reactividad

Está conformado por un conjunto de instrumentos integrados que permite estimar la reactividad en tiempo real del reactor. Este sistema abarca la adquisición de la señal proporcional a la población neutrónica, el acondicionamiento y la digitalización, el cálculo de la reactividad en el reactímetro digital y la presentación de los resultados a través de una interfaz visual o el envío de datos por una interfaz de comunicación.

La Figura 2 muestra el esquema funcional de un sistema de medición de reactividad, con los componentes principales, los cuales se describen a continuación.

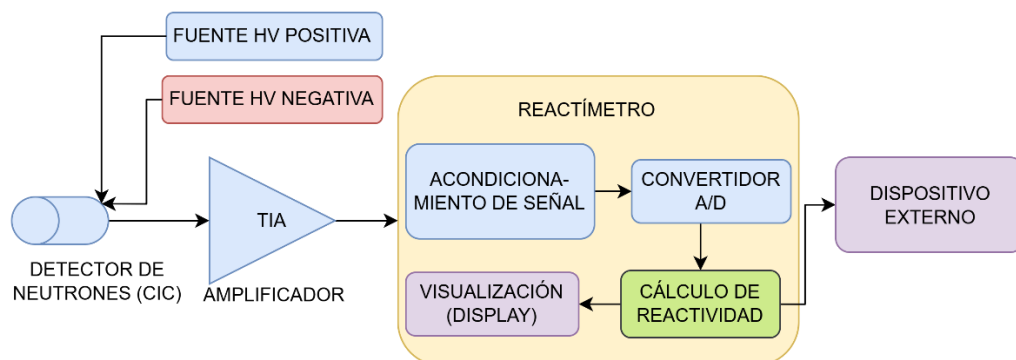


Figura 2 Esquema funcional de un sistema de medición de reactividad.
Fuente. Elaboración propia.

Detector de neutrones: Genera una corriente proporcional a la población neutrónica en un punto específico del reactor.

Amplificador de transimpedancia (*Transimpedance Amplifier*, TIA): Convierte la corriente proporcionada por el detector de neutrones en una señal de voltaje.

Fuente de alto voltaje (HV): Proporcionan el voltaje de polarización requerido para el correcto funcionamiento del detector de neutrones.

Etapas de acondicionamiento: Realiza el filtrado y la limitación de amplitud para proteger etapas posteriores.

Conversor análogo-digital (ADC): Digitaliza la señal acondicionada con una resolución y frecuencias adecuada para su procesamiento.

Procesamiento digital: Cálculo de reactividad en tiempo real mediante la resolución las ecuaciones de cinética inversa a partir de la señal digitalizada y los parámetros del reactor.

Salida de resultados: Visualización local en un visualizador y envío de datos por puerto de comunicación.

Detectores de neutrones

El principio de funcionamiento de los detectores de radiación se basa en la ionización del medio en el que se encuentran. En el caso de los neutrones, al no tener carga, producen ionización de forma indirecta en interacciones neutrón-núcleo. Estas interacciones se clasifican como de absorción o dispersión. Los productos de estas interacciones pueden ser detectados por dispositivos adecuados (Tsoulfanidis y Landsberger, 2015), lo que proporciona información sobre el flujo de neutrones incidente y, por lo tanto, sobre la potencia del reactor.

En los reactores nucleares predominan los detectores gaseosos, los cuales se caracterizan por su gran robustez, rangos dinámicos de operación y alta estabilidad (Knoll, 2010).

Cámara de ionización compensada (CIC)

En un reactor nuclear, los detectores reciben radiación gamma y de neutrones. Aunque los detectores gaseosos basados en boro-10 ($^{10}_5B$), son principalmente sensibles a neutrones también responden a radiación gamma.

Este problema puede mitigarse utilizando cámaras de ionización compensada (CIC).

Las CIC consisten en cavidad, generalmente de aluminio y llena de un gas ionizable, internamente dividida en dos secciones. Una sección tiene un recubrimiento de boro-10, sensible a neutrones y gamma, y otra sección sin boro, sensible solo a gamma (Tsoulfanidis y Landsberger, 2015).

La reacción característica de una CIC con boro-10 es:

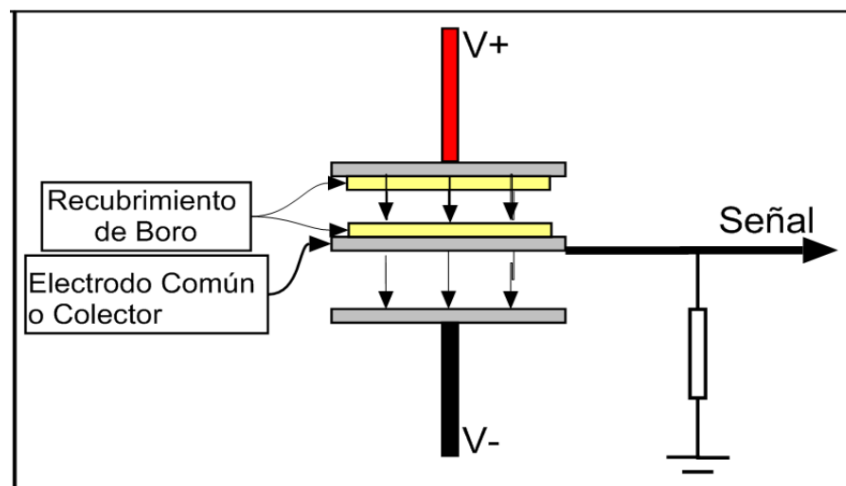
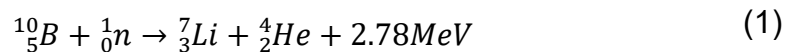


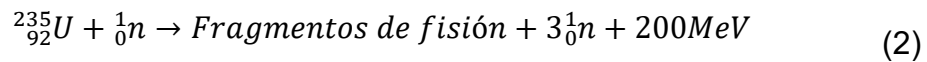
Figura 3 Esquema simplificado de una cámara de ionización compensada. Fuente. Elaboración propia.

La CIC funciona restando la señal gamma de la señal total (debida a gamma y neutrones), de modo que se obtiene una señal proporcional al flujo neutrónico. Si I_1 es la corriente generada por la sección con boro e I_2 es la corriente generada por la sección sin boro, entonces la salida diferencial o compensada de la CIC será $I = I_1 - I_2$, que será aproximadamente proporcional al flujo neutrónico en el reactor.

Cámara de fisión (CF)

Es un detector gaseoso que incorpora un recubrimiento fisible (típicamente uranio-235) en uno de sus electrodos. Cuando un neutrón induce

fisión en el núcleo de uranio, los fragmentos de fisión producen una gran ionización en el gas, generando pulsos eléctricos detectables.



Los pulsos generados por los fragmentos de fisión pueden contarse y relacionarse con el flujo neutrónico a partir de la sensibilidad del detector: $R \approx k \cdot \Phi$ (3), donde R es la tasa de conteo, Φ el flujo neutrónico y k un factor de sensibilidad del detector.

Acondicionamiento de señales

La señal de corriente proveniente de un detector de neutrones se debe acondicionar a un rango de voltaje y ancho de banda adecuados para su posterior procesamiento. En esta sección se definen tres bloques funcionales de una etapa de acondicionamiento en un instrumento nuclear: el amplificador de transimpedancia, el filtro antialiasing y los limitadores de voltaje.

Amplificador de transimpedancia (*Transimpedance Amplifier*, TIA)

Es un dispositivo que recibe una corriente de entrada y proporciona una salida de voltaje. La configuración básica se muestra en la *Figura 4*, la cual está formada por un amplificador operacional y una resistencia de realimentación R_f .

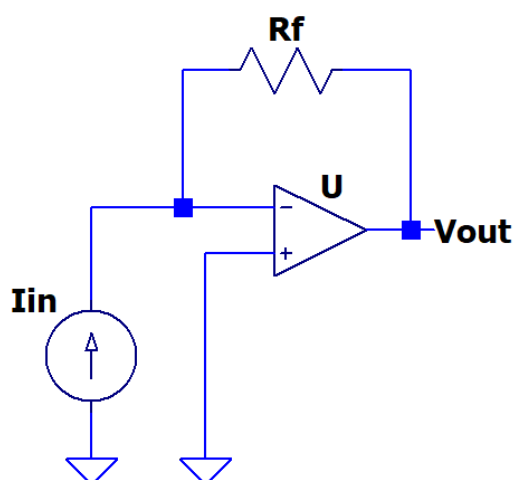


Figura 4 Esquema básico de un TIA. Fuente. Elaboración propia.

En esta configuración, la salida depende de la corriente de entrada y de la resistencia de realimentación según la siguiente relación (Karplus, 2020):

$$V_{out} = I_{in} * R_f \quad (3)$$

La selección del amplificador operacional debe considerar una baja corriente de polarización, un bajo ruido de entrada y un ancho de banda adecuado. En instrumentación nuclear, el TIA permite convertir la señal de los detectores de neutrones, como las CIC, en voltajes en el rango adecuado para su posterior acondicionamiento.

Filtro antialiasing

En el muestreo de una señal a una frecuencia fija se produce un efecto conocido como aliasing, que se presenta cuando la frecuencia de muestreo es insuficiente (menor al doble de la frecuencia máxima presente en la señal). Como resultado, se produce un cambio aparente en la frecuencia de la señal. El filtro antialiasing tiene como objetivo eliminar componentes de alta frecuencia indeseados, por encima de la frecuencia de corte f_c (Karplus, 2020).

Una de las configuraciones más comunes de filtro pasabajos usado como filtro antialiasing es el Sallen-Key debido a su sencillez, estabilidad, buena atenuación y fácil implementación. La Figura 5 presenta el esquema de un filtro pasabajos Sallen-Key. Se observa que esta configuración está conformada por dos redes RC en cascada y un amplificador operacional (Floyd, 2008). Su característica más importante es una pendiente de atenuación de -40 dB/década por encima de la frecuencia de corte. Los valores de los componentes de ambas redes RC pueden igualarse, lo que simplifica su implementación práctica. La ecuación (4) muestra la función de transferencia para esta configuración (Texas Instruments, 2024).

$$H(s) = \frac{1}{s^2(R_1R_2C_1C_2) + s(R_1C_2 + R_2C_2 + R_1C_1) + 1} \quad (4)$$

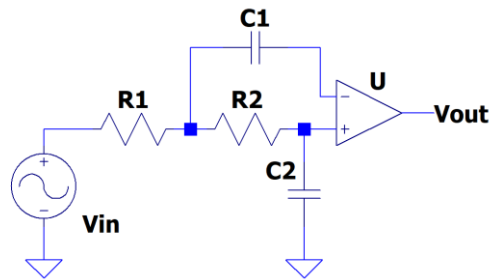


Figura 5 Esquema general del filtro pasabajos Sallen-Key. Fuente. Elaboración propia.

Limitador de voltaje

Un limitador de voltaje es un elemento de protección que evita que la señal de interés supere un rango seguro. Los fabricantes de componentes electrónicos, como los conversores analógico-digitales (ADC), sugieren una protección con diodos, como se indica en la Figura 6. Este circuito asegura que el voltaje que llega a la siguiente etapa sea recortado a un nivel seguro, que en este caso se limita al rango de $-V_d$ hasta $V_{cc} + V_d$, donde V_d es la caída de voltaje directa del diodo.

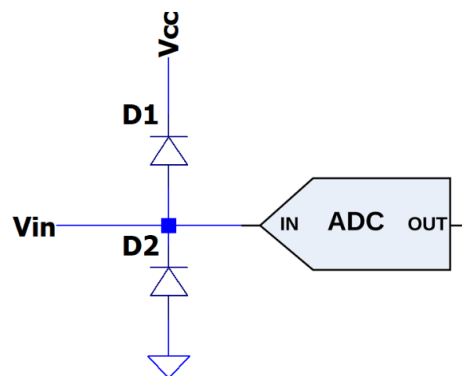


Figura 6 Esquema de un limitador de voltaje con diodos a la entrada de un ADC. Fuente. Elaboración propia.

Reactímetro digital

Un reactímetro digital es un instrumento que resuelve las ecuaciones de cinética inversa en tiempo real a partir de datos obtenidos de un detector de neutrones y de los parámetros cinéticos característicos del reactor (Huo *et al.*, 2019). El término “digital” hace referencia a que la señal proveniente de

los detectores es convertida y procesada en formato digital. Luego de su acondicionamiento, se digitaliza y se procesa numéricamente, a diferencia de un reactímetro analógico en el que las ecuaciones de cinética inversa se resuelven mediante circuitos analógicos basados en amplificadores operacionales (Suzuki y Tsunoda, 1964).

La implementación de un reactímetro digital puede realizarse en diversas plataformas de hardware, como microprocesadores, computadoras, microcontroladores y FPGAs (Auerbach y Carpenter, 1978; Jones, 1977; Khalafi *et al.*, 2011; Messai *et al.*, 2022). Entre ellas, los microcontroladores resaltan como una opción flexible y económica al integrar periféricos como conversores ADC, temporizadores, interfaces de comunicación serie y pines de entrada/salida.

La Figura 7 presenta el esquema funcional de un reactímetro digital. El dispositivo recibe como entrada la señal proporcional a la población de neutrones en el reactor, la cual se acondiciona y digitaliza mediante un ADC. Esta señal se usa como entrada para un algoritmo recursivo que resuelve las ecuaciones de cinética inversa para obtener la reactividad instantánea. Finalmente, los resultados se muestran en un visualizador local o se envían mediante comunicación serie a otros dispositivos para su almacenamiento.

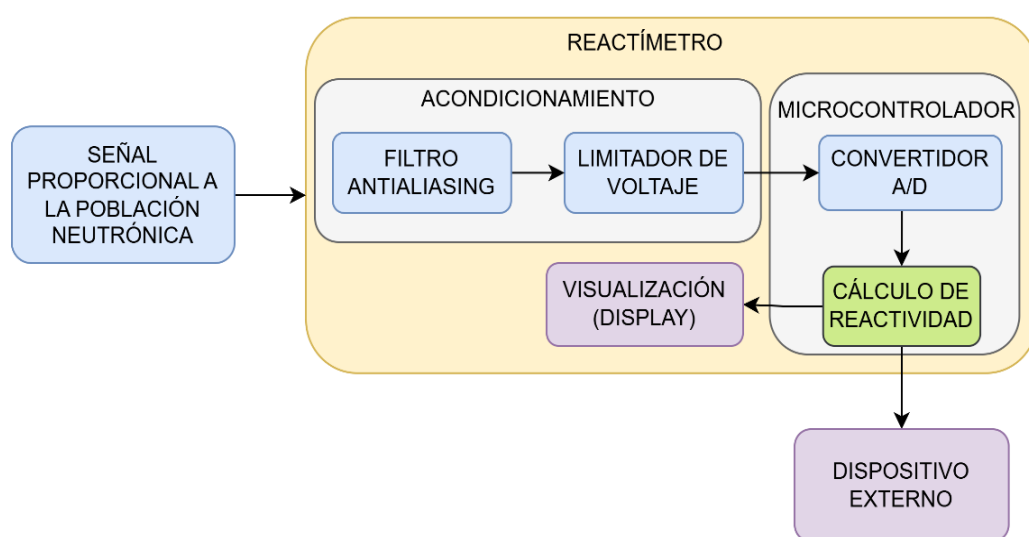


Figura 7 Esquema funcional de un reactímetro digital. Fuente.

Elaboración propia.

3.4.1.2 Monitoreo de reactividad

Fisión nuclear

En un reactor nuclear, un núcleo pesado como el uranio-235 (U-235) puede fisionarse en fragmentos más ligeros tras absorber un neutrón, liberando energía del orden de 200 MeV por fisión. En el caso del U-235, la probabilidad de fisión es mayor con neutrones de baja energía (neutrones térmicos), que típicamente generan dos fragmentos de fisión y la emisión de entre dos y tres neutrones adicionales por fisión (Tanarro *et al.*, 2008; Glasstone y Sesonske 1990).

La Figura 8 representa el proceso de fisión y el inicio de una reacción en cadena. Un neutrón lento es absorbido por un núcleo de U-235, que se excita y se divide en fragmentos más ligeros, liberando neutrones rápidos con energías del orden de MeV (promedio ≈ 2 MeV). Estos neutrones, al ser demasiado energéticos, tienen baja probabilidad de inducir nuevas fisiones; por ello deben perder energía cinética mediante colisiones elásticas con núcleos ligeros hasta alcanzar energías del rango térmico, alrededor de 0,025 eV (Glasstone y Sesonske, 1990).

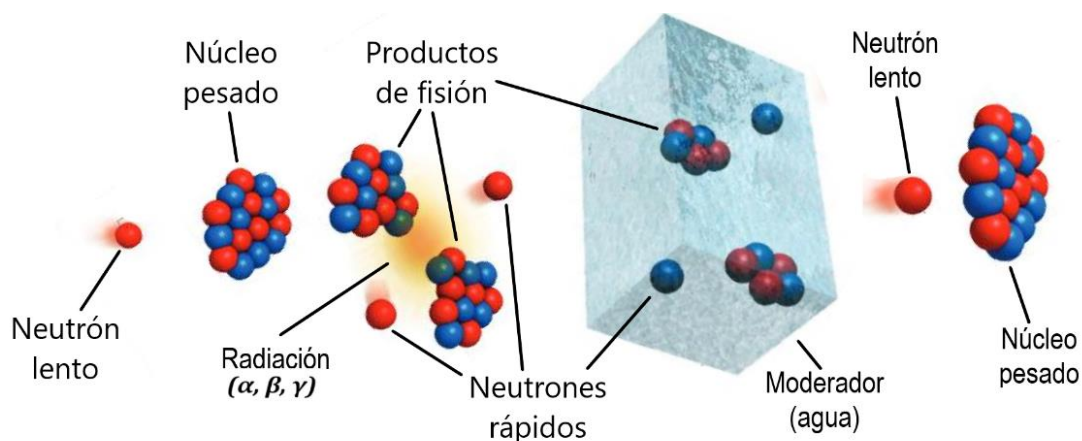


Figura 8 Representación esquemática del proceso de fisión nuclear.

Fuente. Adaptado de *El reactor peruano RP10*, por R. Rodríguez, El Comercio.

La posibilidad de sostener la reacción en cadena depende de que, en promedio, cada fisión origine al menos un neutrón térmico capaz de producir

otra fisión. Este balance se expresa a través del factor de multiplicación efectivo y de la reactividad, conceptos que se desarrollan en la siguiente sección.

Reactividad

La reactividad es un parámetro cinético del reactor nuclear que cuantifica la desviación del núcleo respecto de su estado crítico. Su definición se relaciona directamente con el estado de criticidad del reactor y con el factor de multiplicación efectivo k_{eff} .

El estado de criticidad de un reactor describe si la población de neutrones en el núcleo del reactor permanece constante, aumenta o disminuye en el tiempo, y se expresa en función del factor de multiplicación efectivo k_{eff} .

El factor de multiplicación efectivo, k_{eff} , se define como la relación entre el número de neutrones producidos por fisión en la generación actual y el número de neutrones presentes en la generación anterior (Glasstone y Sesonske, 1990; Zohuri, 2018).

$$k_{eff} = \frac{\text{Número de neutrones en la generación actual}}{\text{Número de neutrones en una generación anterior}} \quad (5)$$

De este modo, si $k_{eff} = 1$, el reactor está en estado crítico, donde la relación entre el número de neutrones de dos generaciones consecutivas no varía. De igual forma, si $k_{eff} > 1$, el reactor se encuentra en estado supercrítico; y si $k_{eff} < 1$, está en estado subcrítico.

La reactividad (ρ) se define como la medida de la desviación del reactor respecto del estado crítico y se expresa en función de k_{eff} mediante la relación:

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (6)$$

De acuerdo a esta relación, $\rho = 0$ corresponde al estado crítico, $\rho > 0$ indica un estado supercrítico y $\rho < 0$ indica un estado subcrítico (Tanarro *et al.*, 2008; Duderstadt y Hamilton, 1976). El esquema de la Figura 9 representa una reacción en cadena autosostenida, con $k_{eff} = 1$. La Figura 10 muestra la evolución temporal de la población neutrónica normalizada para estos tres casos.

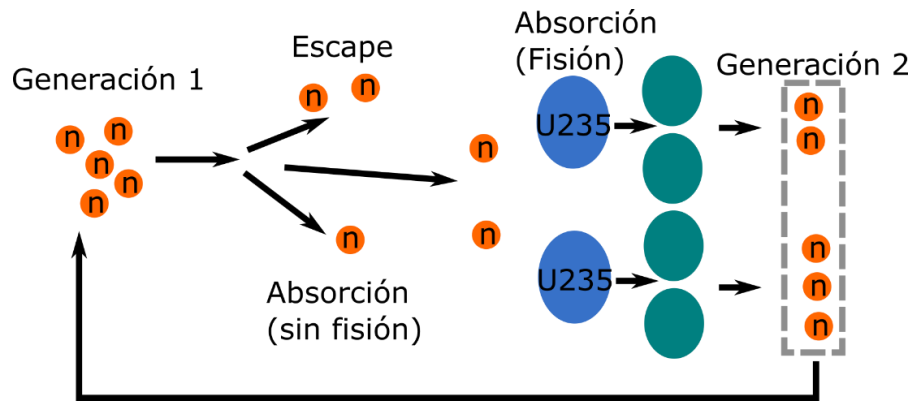


Figura 9 Reacción en cadena autosostenida. Para $k_{eff} = 1$, los neutrones de la generación 2 deben ser iguales a la generación 1. Fuente. Elaboración propia.

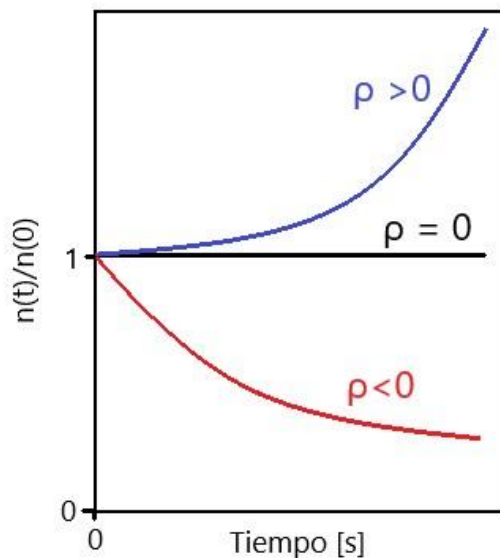


Figura 10 Evolución temporal de la población neutrónica normalizada para 3 condiciones de reactividad: crítico ($\rho = 0$), subcrítico ($\rho < 0$) y supercrítico ($\rho > 0$). Fuente. Adaptado de *Nuclear reactor analysis*, por J. J. Duderstadt y L. J. Hamilton, 1976, Wiley.

La reactividad se expresa en unidades de pcm (por ciento mil), de modo que $1 \text{ pcm} = 10^{-5}$. En la práctica, es común entre los físicos experimentales normalizar la reactividad respecto a la fracción efectiva de neutrones retardados β_{eff} (parámetro cinético característico del reactor que se define en la siguiente sección). De esta forma, se introduce el “dólar de reactividad”, definido por la relación

$$\$ = \frac{\rho}{\beta_{eff}} \quad (7)$$

Donde $1 \text{ dólar} = \beta_{eff}$.

Cinética de reactores

Se ocupa de predecir el comportamiento temporal de la población neutrónica en el núcleo de un reactor debido a cambios en la reactividad. Para este propósito, se emplea el modelo del reactor puntual (MRP), el cual constituye una simplificación matemática que permite describir la dinámica neutrónica del reactor.

El MRP asume que la forma espacial del flujo neutrónico permanece constante y que la población de neutrones $n(t)$ depende únicamente del tiempo. Con esta aproximación, el análisis del reactor se reduce a un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias en el tiempo, conocidas como ecuaciones de cinética puntual, que describen la variación de la población neutrónica en función de la reactividad y de los parámetros cinéticos característicos del reactor (Duderstadt y Hamilton, 1976; Lamarsh y Baratta, 2001; Cacuci, 2010).

Ecuaciones de cinética puntual (ECP)

Describen la evolución temporal de la población neutrónica y las concentraciones de precursores de neutrones retardados en función de parámetros cinéticos. Antes de presentar las ECP, es conveniente definir con precisión estos parámetros.

$n(t)$: Población neutrónica total en el reactor en el instante t . Incluye a los neutrones prontos, emitidos de manera inmediata en un evento de fisión, así como a los neutrones retardados, liberados posteriormente a partir del decaimiento radiactivo de núclidos precursores (productos de fisión). Su normalización es arbitraria y puede escalarse para representar la densidad neutrónica, el flujo neutrónico promedio o la potencia instantánea del reactor, magnitud directamente asociada a la señal obtenida con detectores de neutrones (Ball, 2017).

ρ : Reactividad, definida previamente en la Sección 2.2 como $\rho = \frac{k_{eff}-1}{k_{eff}}$.

β_{eff} : Fracción efectiva total de neutrones retardados, $\beta_{eff} = \sum_i^6 \beta_i$. Representa la proporción de neutrones que no se emiten de manera inmediata en la fisión, sino con cierto retraso debido al decaimiento de núclidos precursores (productos de fisión). Este retardo ralentiza la variación de la población neutrónica y permite que el reactor sea controlable en la práctica.

β_i : Fracción de neutrones retardados correspondiente al grupo i . Habitualmente se consideran seis grupos, definidos en función de la vida media de los precursores y de la rapidez con la que emiten neutrones.

Λ : Tiempo medio entre reproducciones, o tiempo promedio que tarda un neutrón en causar otra fisión.

λ_i : Constante de decaimiento del grupo i . Representa la velocidad a la que los productos de fisión de un grupo específico se desintegran para liberar neutrones retardados.

$c_i(t)$: Concentración de precursores del grupo i , que al decaer liberan neutrones retardados.

La derivación formal de las ecuaciones de cinética puntual se presenta en detalle en Duderstadt y Hamilton (1976). En su forma convencional, consisten en un sistema de siete ecuaciones diferenciales ordinarias que describen la dinámica neutrónica del reactor:

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta_{eff}}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) \quad (8)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n(t) - \lambda_i c_i(t) \quad (9)$$

En la primera ecuación, el término de la izquierda representa la tasa de cambio de la población neutrónica con el tiempo. El primer término del lado derecho corresponde a la contribución de los neutrones pronto a la variación de dicha población. El segundo término representa la contribución de los neutrones retardados, generados por el decaimiento de los precursores.

En la segunda ecuación, el término de la izquierda representa la tasa de cambio en la concentración de precursores del grupo i con el tiempo. El primer término del lado derecho indica la tasa de producción de precursores, proporcional a la población neutrónica. El segundo término corresponde a la tasa de decaimiento de los precursores, responsables de la emisión de neutrones retardados.

Ecuación hora inversa (*Inhour*)

Es posible resolver de forma analítica las ECP partiendo de condiciones iniciales conocidas. Un desarrollo detallado de esta solución se encuentra en Glasstone y Sesonske (1990) y Zohuri (2018). Se considera el reactor en estado crítico para $t < 0$, con $n(0)$ y $c_i(0)$ como condiciones iniciales, y se aplica una reactividad constante ρ_0 en $t = 0$. Bajo estos supuestos, se aplica la transformada de Laplace a las ecuaciones (8) y (9):

$$sN(s) - n(0) = \left(\frac{\rho_0 - \beta_{eff}}{\Lambda} \right) N(s) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(s) \quad (10)$$

$$(s + \lambda_i)C_i(s) = \left(\frac{\beta_i}{\Lambda} \right) N(s) + C_i(0) \quad (11)$$

El nuevo sistema de ecuaciones se resuelve para $N(s)$ y $C_i(s)$.

$$N(s) = \frac{\Lambda \left[n(0) + \sum_i^6 \frac{\lambda_i C_i(0)}{s + \lambda_i} \right]}{\Lambda s - (\rho_0 - \beta) - \sum_i^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{s + \lambda_i}} \quad (12)$$

$$C_i(s) = \frac{\beta_i N(s) / \Lambda + C_i(0)}{s + \lambda_i} \quad (13)$$

La expresión obtenida para $N(s)$ es el cociente de un polinomio de grado seis dividido por otro de grado siete, por lo que la transformada inversa de $N(s)$ produce una suma de exponenciales para $n(t)$:

$$n(t) = \sum_{j=1}^7 A_j e^{\omega_j t} \quad (14)$$

Para obtener una expresión de la reactividad, se iguala a cero el denominador (12) en $s = \omega$:

$$\Lambda \omega - (\rho_0 - \beta) - \sum_{i=1}^6 \frac{\lambda_i \beta_i}{\omega + \lambda_i} = 0 \quad (15)$$

Al reordenar los términos, se obtiene una expresión para la reactividad ρ_0 que generó la evolución de $n(t)$:

$$\rho_0 = \Lambda \omega + \sum_{i=1}^6 \frac{\omega \beta_i}{\omega + \lambda_i} \quad (16)$$

Esta relación constituye la base del método del periodo, el cual permite calcular la reactividad a partir de mediciones de una señal proporcional a la potencia del reactor.

Cálculo de reactividad

Las ecuaciones de cinética puntual describen la evolución temporal de la población neutrónica a partir de los parámetros cinéticos del reactor y de la reactividad. En la práctica, la reactividad no se conoce con anticipación; en cambio, sí se dispone de los parámetros cinéticos y de señales de detectores de neutrones que son proporcionales a la población neutrónica o a la potencia

del reactor. A partir de estas mediciones y del modelo puntual se derivan expresiones que permiten calcular la reactividad. En esta sección se presentan dos métodos complementarios: el método del periodo, basado en la ecuación Inhour, y el método de cinética inversa, que permite calcular $\rho(t)$ en tiempo real. En adelante, se utilizará el término “cálculo” para referirse al procedimiento numérico y el término “estimación” para el valor de reactividad reportado.

Método del periodo

En la sección previa, se obtuvo una solución para las ecuaciones de cinética puntual, en la cual la población neutrónica se expresa como una suma de exponenciales (ver ecuación (14)), donde ω_j son las raíces de la ecuación Inhour (ver ecuación (16)).

Las raíces ω_j de la ecuación (16) presentan el siguiente comportamiento: si la reactividad insertada es negativa ($\rho < 0$), todas las raíces son negativas; si la reactividad es positiva ($\rho > 0$), una raíz resulta positiva y las demás son negativas. En este último caso, los términos asociados a raíces negativas se atenúan rápidamente con el tiempo, de modo que domina la contribución de la raíz positiva ω_1 . Así, la expresión de la población neutrónica se aproxima a:

$$n(t) \approx A_1 e^{\omega_1 t} \equiv A_1 e^{\frac{t}{T}} \quad (17)$$

Donde $T = 1/\omega_1$ se denomina periodo asintótico reactor. Esta magnitud indica el crecimiento exponencial de la población neutrónica (proporcional a la potencia del reactor) debido a una inserción de reactividad positiva (Glasstone y Sesonske, 1990).

Al sustituir $\omega_1 = 1/T$ en la ecuación Inhour, se obtiene una relación explícita entre el periodo T del reactor y la reactividad ρ en unidades de pcm:

$$\rho = \frac{\Lambda}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{\beta_i}{1 + \lambda_i T} \quad (18)$$

La ecuación (18) puede reescribirse para expresarla en unidades de dólar, para lo cual dividimos ambos lados de la ecuación entre β_{eff} :

$$\$ = \frac{\Lambda^*}{T} + \sum_{i=1}^6 \frac{b_i}{1 + \lambda_i T} \quad (19)$$

$$\text{Donde } \$ = \frac{\rho}{\beta_{eff}}, \Lambda^* = \frac{\Lambda}{\beta_{eff}} \text{ y } b_i = \frac{\beta_i}{\beta_{eff}}.$$

En la práctica, se registra la evolución temporal de la señal de un detector de neutrones (proporcional a $n(t)$). Se ajusta la curva a una exponencial, según la ecuación (17), y se determina T . Finalmente, usando la ecuación (19), se obtiene el valor de la reactividad insertada que produjo la variación de la población neutrónica observada (Huaccho, 2017). La Figura 11 muestra el diagrama de flujo para el cálculo de reactividad mediante el método del periodo.

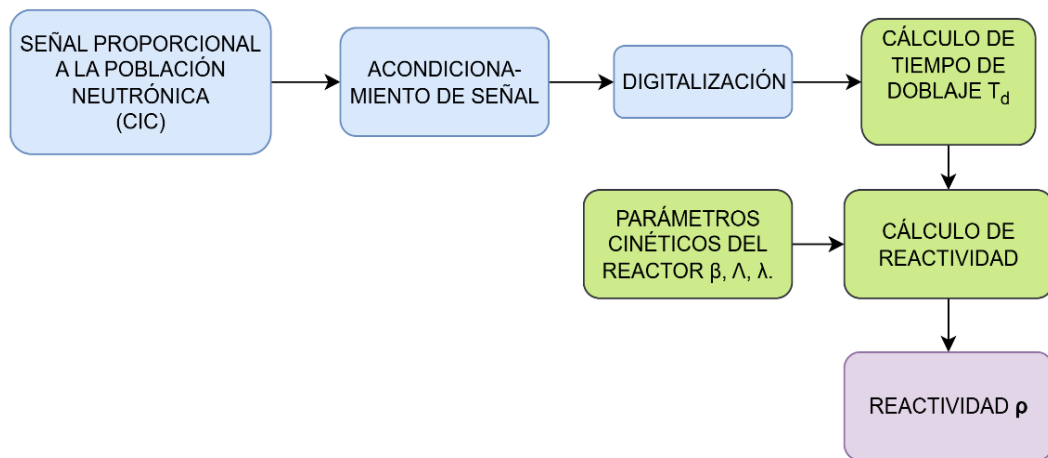


Figura 11 Diagrama de flujo de cálculo de reactividad por el método del periodo a partir de la población neutrónica. Fuente. Elaboración propia.

Método de cinética inversa

Es la técnica más general para calcular la reactividad $\rho(t)$ a partir de una señal proporcional a la población neutrónica o a la potencia del reactor. Este método se basa en el modelo del reactor puntual y reescribe las ECP (ecuación (8)) para despejar $\rho(t)$ en función de $n(t)$ y de los parámetros

cinéticos del reactor (Ott y Neuhold, 1985). Por lo tanto, al reordenar la ecuación (8) se obtiene una expresión para $\rho(t)$:

$$\rho(t) = \beta_{eff} + \frac{\Lambda}{n(t)} \left[\frac{dn(t)}{dt} - \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) \right] \quad (20)$$

De manera análoga a lo realizado con la ecuación (18), se obtienen las ecuaciones de cinética inversa (ECI) para la reactividad expresada en dólares, al dividir ambos lados de las ecuaciones (20) y (9) entre β_{eff} :

$$\$(t) = 1 + \frac{\Lambda^*}{n(t)} \left[\frac{dn(t)}{dt} - \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i(t) \right] \quad (21)$$

$$\frac{dc_i(t)}{dt} = \frac{b_i}{\Lambda^*} n(t) - \lambda_i c_i(t) \quad (22)$$

La resolución de estas ecuaciones requiere conocer los parámetros cinéticos del reactor, determinados previamente mediante cálculos o mediciones, así como una señal proporcional a $n(t)$. Este método presenta una ventaja frente a otros, ya que responde adecuadamente a diferentes tipos de transitorios de reactividad (Ott y Neuhold, 1985). Además, puede resolverse por métodos numéricos, lo que permite implementar algoritmos recursivos en computadoras o microcontroladores para calcular la reactividad en tiempo real. La Figura 12 muestra el diagrama de flujo para el cálculo de reactividad mediante el método de cinética inversa.

Monitoreo de reactividad en reactores nucleares

En un reactor nuclear, la reactividad puede variar por acciones deliberadas del operador, como la inserción o extracción de las barras de control, empleadas para regular la potencia del reactor. La reactividad también puede variar por mecanismos de realimentación, como cambios de temperatura o la formación de burbujas de vapor de agua. En este contexto, el monitoreo de reactividad se realiza a partir de señales neutrónicas medidas por los canales de instrumentación del reactor, y empleando los métodos de cálculo descritos en esta sección.

En este trabajo, el reactor de investigación RP-10 constituye el entorno de aplicación para el monitoreo de reactividad, utilizando señales neutrónicas disponibles en la instalación para la estimación de $\rho(t)$. Una descripción general del RP-10 y un esquema de sus principales elementos se presentan en el Anexo B.

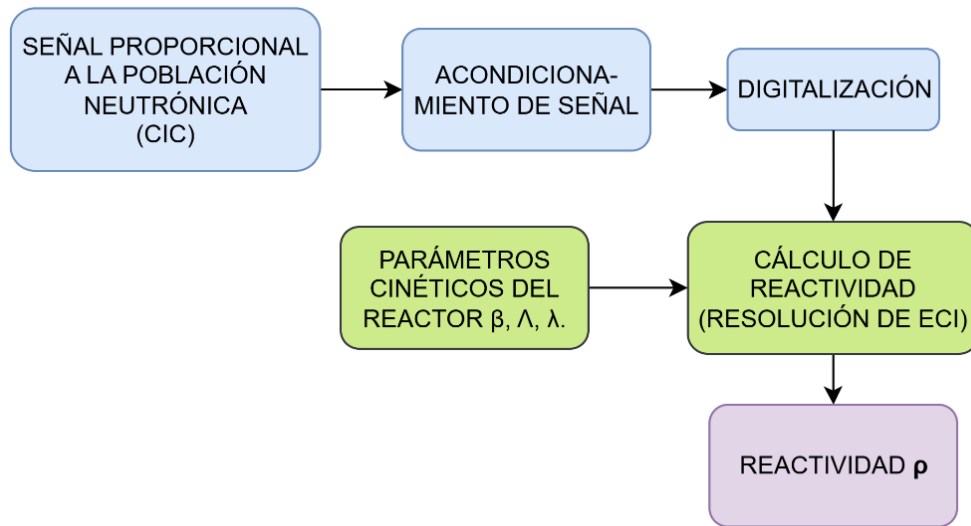


Figura 12 Diagrama de flujo de cálculo de reactividad por el método de cinética inversa a partir de la población neutrónica. Fuente. Elaboración propia.

3.4.2 Marco conceptual

Instrumentación nuclear: Conjunto de instrumentos que permite cuantificar la población de neutrones en un reactor nuclear (Wakabayashi *et al.*, 2023).

Reactímetro digital: Instrumento que estima la reactividad $\rho(t)$ en tiempo real mediante el método de cinética inversa (Huo *et al.*, 2019).

Detector de neutrones: Dispositivo sensible a neutrones que genera una señal eléctrica proporcional al flujo neutrónico, a partir de interacciones neutrón-núcleo en el interior del detector.

Cámara de ionización compensada (CIC): Detector gaseoso con dos secciones internas: una recubierta con boro-10, sensible a neutrones y gamma, y otra sin recubrimiento, sensible principalmente a gamma. Al

combinar ambas señales se compensa la contribución gamma, obteniéndose una señal proporcional al flujo neutrónico (Tsoulfanidis & Landsberger, 2015).

Amplificador de transimpedancia (TIA): Amplificador que toma una corriente de entrada y entrega una tensión de salida proporcional, su ganancia o sensibilidad se expresa en ohmios (V/A).

Flujo neutrónico (ϕ): Magnitud que expresa el número de neutrones que atraviesan una unidad de superficie por unidad de tiempo, con unidades de $m^{-2}\cdot s^{-1}$ (o $cm^{-2}\cdot s^{-1}$) (Tanarro *et al.*, 2008).

Población de neutrones: Número de neutrones en una determinada región (Tanarro *et al.*, 2008).

Críticidad: Estado en el que el reactor es crítico y la reacción en cadena se mantiene estable, de modo la reactividad $\rho = 0$ y la potencia del reactor permanece constante (Tanarro *et al.*, 2008).

Reactividad (ρ): Magnitud que mide la desviación del reactor respecto al estado crítico y se define como $\rho = (k_{eff} - 1) / k_{eff}$. Si $\rho = 0$ el reactor está crítico, si $\rho > 0$ es supercrítico y si $\rho < 0$ es subcrítico. Se expresa en unidades de pcm y β (Tanarro *et al.*, 2008).

Ecuaciones de cinética puntual (ECP): Conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias que describen la evolución temporal de la población neutrónica, en función de la reactividad y de los parámetros cinéticos característicos del reactor (Duderstadt y Hamilton, 1976).

Método del periodo: Método que permite estimar la reactividad a partir del periodo del reactor, utilizando la ecuación (19). Es el método de referencia usado en el RP-10.

Método de cinética inversa: Método que permite estimar la reactividad a partir de una señal proporcional a la población neutrónica. Se basa en las ecuaciones de cinética puntual (Ott y Neuhold, 1985).

Algoritmo recursivo: Método de cálculo numérico que actualiza una variable en pasos sucesivos, usando el resultado previo y la nueva entrada disponible.

Algoritmo de cinética inversa: Algoritmo recursivo que calcula la reactividad $\rho(t)$ en tiempo real mediante la discretización de las ecuaciones de cinética inversa. Utiliza como entrada una señal proporcional a la población neutrónica (o potencia) y los parámetros cinéticos del reactor.

Reactor RP-10: Reactor nuclear de investigación tipo piscina abierta, de hasta 10 MW térmicos, moderado y refrigerado por agua ligera (H_2O), con combustible U_3Si_2 enriquecido al 19,75 %, operado en el Centro Nuclear RACSO (Perú). Se emplea principalmente para la producción de radioisótopos y la irradiación de materiales para investigación y aplicaciones industriales.

Barras de control: Elementos absorbentes de neutrones que se insertan o extraen del núcleo del reactor para modificar la reactividad y, con ello, regular la potencia del reactor mediante la absorción de neutrones.

Calibración de barras de control: Procedimiento experimental para determinar el valor de reactividad asociado a una barra de control en función de su posición. Se realiza mediante la extracción sucesiva de porciones pequeñas de la barra, calculando la reactividad correspondiente en cada paso. El resultado es una curva de calibración que relaciona la reactividad con el porcentaje de extracción de la barra.

3.4.3 Requisitos del sistema

En esta sección se definen los requisitos del sistema conforme al estándar Nuclear Instrument Modules (NIM). Estos requisitos se establecen para asegurar el monitoreo continuo de la reactividad con la precisión requerida y la compatibilidad del sistema con la instrumentación existente del reactor RP-10. Además, sirven como base para el diseño, la implementación y la verificación del sistema.

El estándar NIM establece las dimensiones físicas de los módulos, los tipos de conectores y las tensiones de alimentación. De este modo, los módulos que conforman el sistema pueden ensamblarse en los bastidores y racks existentes, manteniendo la compatibilidad y el modularidad de la instrumentación del reactor RP-10 (NIM Committee (USA), 1990).

La reactividad se reporta en unidades de \$. La conversión a unidades de pcm se realiza utilizando la ecuación: $\rho[pcm] = \$ * \beta_{eff} * 10^5$. La frecuencia de muestreo se fija considerando las constantes de decaimiento λ_i (parámetros cinéticos del reactor). Con $\tau_{min} = 1/\lambda_{max} \approx 0.33 \text{ s}$, se usa un periodo de muestreo $T_s \leq \tau_{min}/20 \approx 16.5 \text{ ms}$, por lo que la frecuencia de muestreo mínima es $F_s \geq 60 \text{ Hz}$.

Los requisitos se agrupan en tres categorías mínimas:

- **Funcionales (F):** Describen qué hace el sistema (entradas, procesamiento y salidas).
- **Desempeño (D):** Establecen qué tan bien debe hacerlo (rango, resolución, exactitud, muestreo, actualización y rechazo de ruido).
- **Operativos (O):** Definen con qué y dónde debe operar/integrarse (formato NIM, alimentación e interconexión).

Tabla 1 Requisitos del sistema de monitoreo de reactividad.

ID	Categoría	Requisito	Especificación
F1	Funcional	Estimación de reactividad	Adquirir señal analógica, prefiltrar y calcular ρ en unidades [\$]
F2	Funcional	Visualización local	Mostrar ρ y valor ADC
F3	Funcional	Comunicación de datos	Trama serie: Tiempo relativo, valor ADC, ρ
F4	Funcional	Inicialización	Botón de inicio de medición ("reset")
F5	Funcional	Registro en PC	Archivo texto/CSV: timestamp, ADC, (ρ [\$])
D1	Desempeño	Rango de operación	(-1,5 \$) a (1,5 \$)
D2	Desempeño	Resolución	(0,001 \$)
D3	Desempeño	Exactitud relativa	Objetivo $E \leq 5 \%$; Límite $E \leq 10 \%$ (vs. método del período)
D4	Desempeño	Frecuencia de actualización	$\leq 1 \text{ s}$ (configurable por software)
D5	Desempeño	Frecuencia de muestreo mínimo (ADC)	$\geq 60 \text{ Hz}$
D6	Desempeño	Atenuación del filtro	Antialiasing: $\geq 3 \text{ dB}$ a 40 Hz ; $\geq 20 \text{ dB}$ a 100 Hz .

ID	Categoría	Requisito	Especificación
O1	Operativo	Formato e integración	Módulos NIM estándar; montaje en bastidor NIM; conectores BNC frente/detrás
O2	Operativo	Alimentación	± 12 V y ± 24 V desde bastidor NIM; bastidor a 220 V AC, 60 Hz
O3	Operativo	Interfaz de comunicación	Puerto serie para envío de datos

Fuente. Elaboración propia.

3.4.4 Diseño del sistema de instrumentación nuclear

Esta sección presenta el diseño conceptual y detallado del sistema de monitoreo de la reactividad $\rho(t)$, basado en los requisitos establecidos en la sección anterior y resumidos en la Tabla 1. Para la implementación del sistema se integra instrumentación existente en el reactor RP-10 con el desarrollo de un módulo reactímetro digital conforme al estándar NIM. Este enfoque simplifica el diseño y asegura la compatibilidad eléctrica y mecánica del sistema, al integrar componentes ampliamente utilizados como detectores, amplificadores, fuentes de alimentación y portamódulos NIM.

3.4.4.1 Arquitectura del sistema

En esta subsección se define la composición funcional y el flujo de señal. Se adopta una arquitectura modular que combina instrumentación comercial existente del RP-10 con el módulo reactímetro digital desarrollado. La Figura 13 ilustra el diagrama de bloques de la arquitectura del sistema, incluido el flujo de señal desde el detector hasta las salidas, cuya descripción detallada se presenta a continuación.

La CIC entrega una corriente proporcional a la población neutrónica en un instante y lugar específicos del reactor (flujo neutrónico). El TIA convierte esta corriente en un voltaje adecuado para su procesamiento en el reactímetro digital. En el reactímetro, la etapa de acondicionamiento se encarga del filtrado, así como de la limitación del voltaje para proteger a la etapa siguiente. El MCU digitaliza la señal a una frecuencia determinada y ejecuta el algoritmo que resuelve las ECI de forma recursiva para obtener $\rho(t)$. Los resultados se

muestran en el visualizador y se transmiten por UART para su registro en una PC mediante una aplicación.

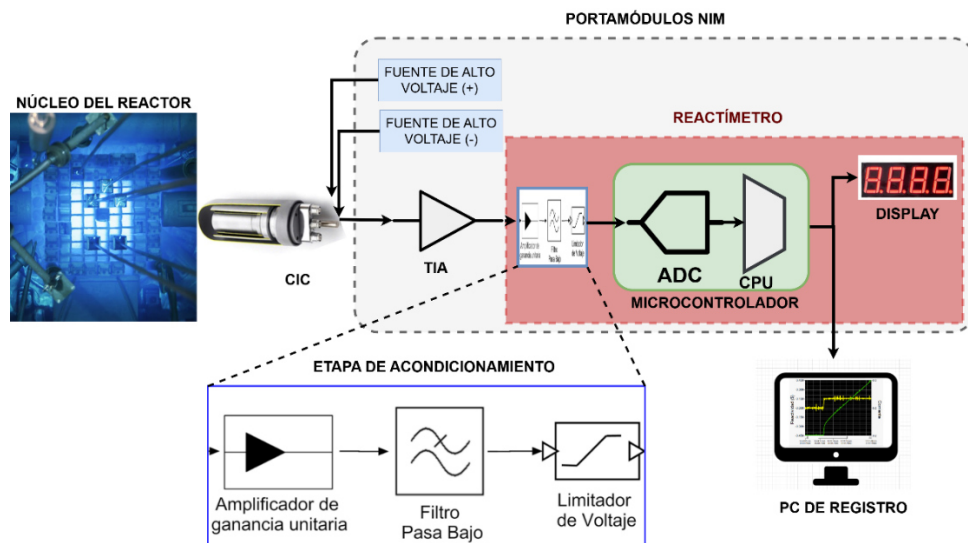


Figura 13 Diagrama de bloques del sistema de monitoreo de reactividad para el RP-10. Fuente. Elaboración propia.

Elementos del sistema

- **CIC (detector):** Genera una corriente proporcional al flujo neutrónico en el núcleo.
- **Fuentes de alto voltaje (HV):** Proporcionan los voltajes requeridos para la correcta polarización del detector.
- **TIA (transimpedancia):** Convierte la corriente a tensión y fija el rango dinámico útil.
- **Reactímetro digital:** Se encarga del acondicionamiento, digitalización y cálculo de reactividad.

Acondicionamiento de señal: Amplifica, filtra y limita la señal proveniente del TIA.

Digitalización: Realizada por un microcontrolador.

- **Cálculo de reactividad:** Realizado por el microcontrolador. Ejecución de algoritmo que resuelve las ECI, según requisitos funcionales.
- **Visualización local:** Los resultados se muestran en un visualizador a la frecuencia de actualización establecida en los requisitos.

- **Salido de datos:** Puerto serie del microcontrolador.
- **Porta módulos NIM:** Estructura que aloja y proporciona la alimentación necesaria para los módulos NIM del sistema.
- **PC de registro:** PC con la aplicación que recibe los datos por puerto serie para su visualización y almacenamiento en un archivo de texto.

3.4.4.2 Selección de módulos del sistema de monitoreo

A partir de los requisitos definidos en la Tabla 1 se procede a la elección de los módulos que formarán parte del sistema de monitoreo de reactividad, tomando como referencia el diagrama de bloques de la Figura 13. Esta selección prioriza componentes comerciales en formato NIM, equivalentes a los utilizados en el RP-10 y validados en operaciones previas, lo que garantiza compatibilidad con la instrumentación existente. De esta manera, se aprovecha la infraestructura del reactor, se reducen los riesgos de incompatibilidad y los costos de desarrollo, mientras se cumple con los requisitos establecidos.

Detector de neutrones

En las bases teóricas se describe el principio de funcionamiento de los detectores de neutrones, con énfasis en las cámaras de ionización compensada (CIC). Estos detectores se usan ampliamente en reactores por sus características de operación. Por su construcción, las CIC discriminan la señal de neutrones respecto de otras radiaciones, como la radiación gamma presente en el reactor. Esta capacidad es imprescindible para estimar correctamente la reactividad, pues los métodos de cálculo requieren una señal proporcional a la población neutrónica o a la potencia del reactor.

La elección de las CIC frente a los contadores de fisión (CF) se debe a que las primeras operan típicamente en modo corriente, entregando una señal continua proporcional a la población neutrónica, lo que permite su conexión directa a un amplificador de transimpedancia. En contraste, el CF entrega pulsos, por lo que requiere una etapa adicional para adaptar señal antes de poder utilizarlo en el sistema propuesto en la Figura 13.

En el RP-10 se emplean CIC para monitoreo de potencia, específicamente los modelos CIC-40 y CIC-41 de TECNOBROWN SRL e INVAP S.E. Los manuales de los equipos (TECNOBROWN, 2018; INVAP, 1983) detallan sus especificaciones técnicas:

- **Material convertidor:** Boro-10, ~92 % en abundancia isotópica.
- **Gas colector:** Nitrógeno. Los iones generados se colectan para formar una señal eléctrica proporcional a la intensidad de la radiación.
- **Resistencia de aislamiento entre electrodos:** $\geq 10 \text{ T}\Omega$.
- **Corriente propia (fondo):** $\leq 1 \text{ pA}$.
- **Rango de flujo neutrónico operativo:** 10^4 a $10^{11} \text{ n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$.
- **Sensibilidad (S):** $10^{-14} \text{ A}/(\text{n}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{s}^{-1})$.
- **Grado de compensación residual (compensación gamma):** $\leq 3 \%$, ajustable.
- **Tensión de polarización positiva:** +200 a +400 V (recomendado +400 V).
- **Tensión de polarización negativa:** -200 a -400 V (recomendado -200 V).

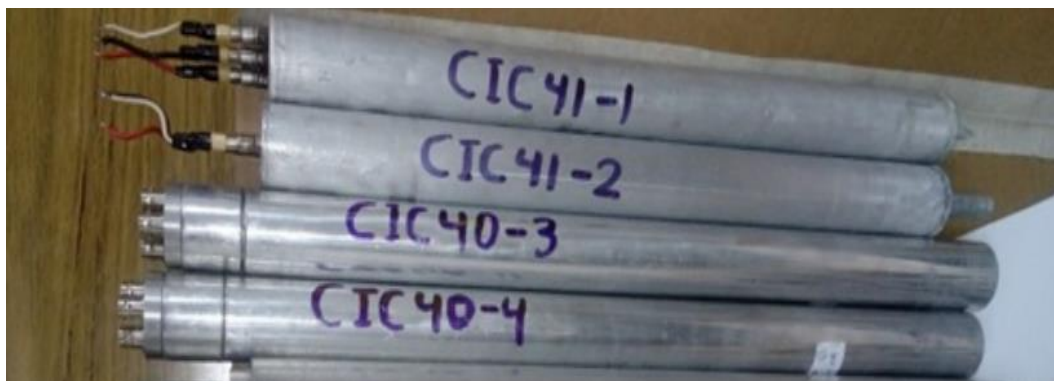


Figura 14 CIC del laboratorio de física experimental de reactores del RP-10. Fuente. Elaboración propia.

Las especificaciones técnicas permiten ajustar adecuadamente el detector, su ubicación y tensión de operación para cumplir los requisitos del sistema. El ajuste de tensiones de polarización mejora la compensación frente a radiación gamma, reduciendo el porcentaje de señal que no se debe a radiación de neutrones a $\leq 3 \%$. En la CIC empleada, este valor se logra

polarizando los electrodos positivo y negativo a +400 V y -200 V, respectivamente. Según las especificaciones de sensibilidad y rango de trabajo, se puede estimar el rango de la señal de corriente de salida del detector con la relación $I = S * \varphi$, donde I es la corriente de salida del detector, S es la sensibilidad, y φ es el flujo neutrónico en la posición del núcleo donde se ubica el detector. Para el rango de trabajo del detector, I se encuentra entre 1×10^{-10} A y 1×10^{-3} A.

Fuente de alto voltaje

La elección de las fuentes de alto voltaje se basa en dos requisitos principales: compatibilidad con el estándar NIM y provisión del voltaje y la corriente adecuados para las CIC-40 y CIC-41. El modelo 3002D de CANBERRA Industries cumple estos criterios (CANBERRA Industries, 2009). Especificaciones principales:

- **Formato:** Módulo NIM de dos anchos.
- **Tensión de salida:** 0 a $\pm 3\,000$ VDC, ajustable.
- **Corriente de salida:** 0 a ± 10 mA, ajustable.



Figura 15 Fuente de alto voltaje modelo 3002D de Canberra. Fuente. Canberra Industries.

Estas prestaciones cubren con amplio margen el rango de tensión de polarización requerida por las CIC, típicamente ± 400 V y corrientes del orden de μA), por lo que la fuente es adecuada para el sistema.

Amplificador de transimpedancia (TIA)

Los amplificadores de transimpedancia son esenciales para cámaras de ionización como las CIC, ya que estas entregan corrientes muy pequeñas (típicamente de pA a μA). Las CIC-40/41 usadas en este trabajo entregan corrientes en ese rango. El modelo elegido para la implementación del sistema es el K330 de INVAP (CNEA, 1998), construido específicamente para estos detectores, cuyas especificaciones principales se presentan a continuación:

- **Formato:** Módulo NIM de dos anchos.
- **Conexión:** Conectores BNC para entrada de corriente y salida de tensión.
- **Alimentación:** Mediante portamódulos NIM.
- **Sensibilidad (S):** Seleccionable entre 10^{-9} A/V y 3×10^{-4} A/V.
- **Exactitud:** 5 %.
- **Banda de trabajo:** 0 Hz a 1 500 Hz.
- **Rango de salida:** ± 10 V.
- **Offset de salida:** ≤ 15 mV.
- **Ruido de salida:** ≤ 15 mV.

Este módulo es compatible con el estándar NIM. La sensibilidad seleccionable del equipo permite trabajar en todo el rango de corriente de salida de la CIC. La relación para determinar la tensión de salida es $V_{\text{out}} = I_{\text{in}}/S$, de modo que, para una corriente mínima de entrada de 10^{-10}A , se espera un voltaje de salida de 0,1 V. A su vez, para una corriente máxima de entrada de 10^{-3}A , se puede ajustar el voltaje de salida a 3,3 V, o más, si se requiere. Además, el ancho de banda de trabajo de hasta 1 500 Hz supera ampliamente el rango de frecuencias de interés (decenas de Hertz), por lo que dichas frecuencias atraviesan el filtro sin atenuación apreciable y no se pierde información.



Figura 16 Amplificador de transimpedancia modelo K330 de INVAP.

Fuente. Elaboración propia.

3.4.4.3 Diseño del reactímetro digital

El reactímetro digital se implementa como un módulo NIM de un cuerpo, con una carcasa metálica de $34 \times 221 \times 246$ mm, conforme al estándar NIM (NIM Committee, 1990). Es compatible con portamódulos NIM, de donde obtiene la alimentación requerida para su funcionamiento. El esquema de la Figura 13 detalla las etapas o secciones que componen el reactímetro, cuyo diseño se desarrolla a continuación.

Fuentes de alimentación

Para el correcto funcionamiento, el reactímetro requiere etapas de alimentación que suministren energía a la electrónica analógica y digital que lo componen. Con este propósito, se integran y diseñan los circuitos necesarios para proveer al reactímetro de tres niveles de tensión: +10 V, +5 V y -5 V.

i) Conversor DC/DC a +10V

El microcontrolador elegido para el desarrollo del reactímetro es parte de una tarjeta de desarrollo, Arduino Due, cuyas especificaciones se detallan más adelante. Esta tarjeta de desarrollo requiere un voltaje de alimentación

de +7 V a +12 V. Los portamódulos NIM pueden proporcionar una tensión de alimentación de +5 V, la cual se utiliza para obtener los +10 V mediante un convertor DC/DC. Se elige un convertor DC/DC elevador comercial, basado en el integrado XL6009, que posee las siguientes especificaciones (XLSEMI, s. f.):

- Rango de voltaje de entrada: 3 V a 32 V
- Rango de voltaje de salida: 5 V a 35 V
- Corriente máxima de salida: 3 A
- Tensión de rizado en salida: 50 mVpp
- Eficiencia: 94 %
- Regulación de voltaje: $\leq 0,5$ %

Las especificaciones de este dispositivo son adecuadas para el reactímetro, ya que tiene una corriente de salida que supera ampliamente el consumo típico de un microcontrolador (800 mA). Además, el rizado máximo a la salida es de 50 mVpp, fluctuación que será atenuada por los reguladores de +5 V.

ii) **Regulador de tensión de +5V.**

La etapa de acondicionamiento requiere un voltaje de alimentación que permita trabajar con la señal de tensión que proporciona la etapa previa, y sea compatible con etapas posteriores (ADC del microcontrolador). Se elige una tensión de operación positiva de +5 V para la etapa de acondicionamiento, compatible con los niveles de tensión del TIA, y de amplificadores operacionales comerciales.

La regulación a +5 V se realiza con el integrado AMS1117, un LDO (Low Dropout Regulator) para posregular la salida de convertidores DC/DC. Reduce el rizado del convertor, evitando que este se acople a las señales analógicas en la etapa de acondicionamiento. Especificaciones clave (Advanced Monolithic Systems, s. f.):

- Salida fija: 5,0 V con precisión típica 1,5 %.
- Corriente de salida: Hasta 1 A.

- Ripple rejection (RR): $\geq 45\text{dB}$

El RR cuantifica la atenuación del rizado entre entrada y salida del LDO. El rizado pico a pico en la salida del regulador se estima mediante: $V_{\text{rizado_out}} = V_{\text{rizado_in}} * 10^{-(RR/20)}$. Con $V_{\text{rizado_in}} = 50\text{ mVpp}$ (salida del convertor DC-DC) y $RR = 45\text{ dB}$, $V_{\text{rizado_out}} \approx 0.3\text{ mVpp}$. Debido a que este regulador alimentará a los amplificadores operacionales (AO) de la etapa de acondicionamiento, el rizado puede acoplarse a la señal útil. Cabe mencionar, su efecto se evalúa considerando RR del AO. La Figura 17 muestra el esquema de la etapa de regulación de +5 V basado en el integrado AMS1117.

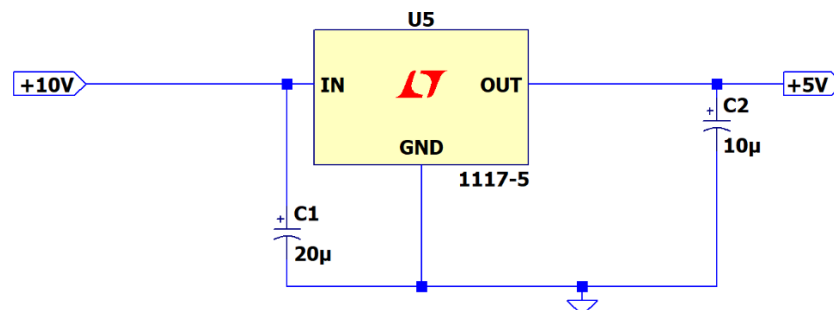


Figura 17 Esquema del regulador de +5 V basado en el integrado AMS1117. Fuente. Elaboración propia.

iii) Convertor de tensión -5 V

Los amplificadores operacionales requieren una tensión negativa para su correcto funcionamiento. Esto se puede obtener mediante un convertor de tensión que opera como inversor. El ICL7660 es un convertidor conmutado por capacitores (“charge pump”) que genera una tensión negativa aproximadamente igual a $-V_{in}$ sin inductores. Este integrado es adecuado para aplicaciones de bajo consumo donde se requieren fuentes duales, ya que permite obtener -5 V a partir de $+5\text{ V}$ con solo dos capacitores externos. Las especificaciones clave son (Renesas Electronics, 2010):

- Rango de trabajo: $1,5\text{ V}$ a 10 V
- Tensión de salida: $\approx -V_{in}$
- Eficiencia: 98%
- Requisitos: 2 capacitores externos.

La hoja de datos del ICL7660 muestra una ecuación para calcular el rizado a la salida del inversor:

$$V_{ripple} \approx \left[\frac{1}{(2f_{pump}C_2)} + 2 * ESR_{C2} \right] * I_{out} \quad (23)$$

Se puede estimar la tensión de rizado V_{ripple} a la salida del inversor considerando los siguientes valores: $f_{pump} = 10 \text{ kHz}$, $C_2 = 10 \mu\text{F}$, $ESR_{C2} = 2\Omega$, $I_{out} = 2 \text{ mA}$. Con estos datos, se obtiene $V_{rizado} \approx 18 \text{ mVpp}$.

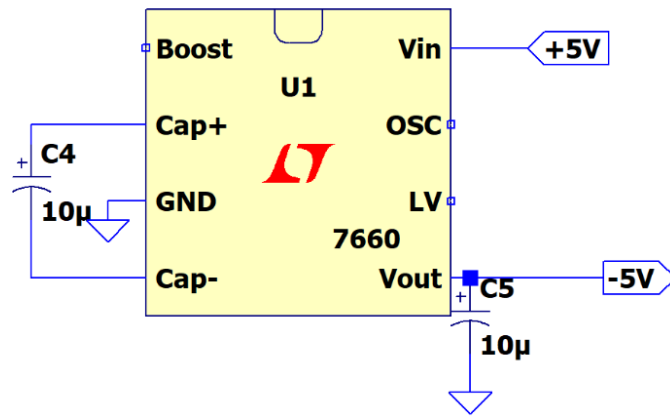


Figura 18 Esquema de la etapa de regulación de -5 V basado en el integrado ICL7660. Fuente. Elaboración propia.

Las tensiones de rizado de las fuentes de +5 V y -5 V permiten estimar el efecto que produce en la etapa de acondicionamiento. La etapa de acondicionamiento cuenta con amplificadores operacionales, específicamente el LM358. Según la hoja de datos del fabricante, este amplificador presenta un rechazo al rizado de la fuente $PSRR = 55 \text{ dB}$, hasta 1 kHz (Texas Instruments, 2024). La tensión de rizado acoplada a la salida puede aproximarse mediante la expresión: $V_{rizado_señal} \approx V_{rizado_fuente} * 10^{-\left(\frac{PSRR}{20}\right)} A_{CL}$; donde A_{CL} es la ganancia en lazo cerrado del LM358 (≈ 1), y V_{rizado_fuente} es la suma de las tensiones de rizado de las dos fuentes, $V_{rizado_fuente} = 18,3 \text{ mVpp}$. Como resultado, el rizado acoplado a la señal proveniente del TIA es $V_{rizado_señal} \approx 0,033 \text{ mVpp}$ ($\approx 33 \mu\text{Vpp}$). Este valor es mucho menor que la resolución del ADC; por lo tanto, puede considerarse despreciable, lo que justifica la elección de los componentes de las fuentes de alimentación.

Etapa de acondicionamiento

La etapa de acondicionamiento se encarga de adaptar la señal proveniente del amplificador de transimpedancia (TIA) a niveles adecuados para la etapa de digitalización con el microcontrolador (placa de desarrollo Arduino Due). Esta etapa consta de tres bloques principales: un amplificador de ganancia unitaria, un filtro antialiasing y un limitador de voltaje. Estas subetapas tienen como componente principal el amplificador operacional LM358 de Texas Instruments. Las características que justifican la elección de este componente son su bajo costo y su disponibilidad en el mercado local. Además, en el diseño de la fuente de alimentación se señaló que el parámetro PSRR de este amplificador contribuye a atenuar el ruido presente en las fuentes. Las principales características del integrado son (Texas Instruments, 2024):

- PSRR: ≥ 55 dB @ 1 kHz.
- Tensión de alimentación: 3–32 V (simple) o $\pm 1,5$ a ± 16 V (dual).
- GBW: 1 MHz típico (0,7 MHz mínimo).
- Tensión de offset de entrada: ± 3 mV (típico).

El rango de tensión de trabajo de este amplificador es adecuado, ya que se diseñó una fuente dual de ± 5 V. El parámetro GBW, asociado al ancho de banda de ganancia unitaria del amplificador, tiene un valor típico de 1 MHz, que supera ampliamente el ancho de banda mínimo requerido para la etapa de acondicionamiento. Finalmente, la tensión de offset de entrada se traduce en un error a la salida del amplificador; para una señal proveniente del TIA en el rango 0,5–3,3 V; el error relativo debido al offset ($\approx \pm 3$ mV) estaría en el rango de $\approx 0,6$ % (a 0,5 V) y $\approx 0,09$ % (a 3,3 V), valores aceptables.

i) Amplificador de ganancia unitaria

El amplificador de ganancia unitaria (seguidor de voltaje) tiene como objetivo acoplar la salida del TIA al resto del acondicionamiento sin alterar su amplitud, fase ni polaridad. Su alta impedancia de entrada y baja impedancia de salida evitan sobrecargar el TIA y mantienen la señal dentro del rango útil ($\approx 0,5$ –3,3 V), asegurando el correcto funcionamiento del filtro pasabajos y del

ADC. La *Figura 19* muestra el esquema del seguidor implementado con el amplificador LM358 (Boylestad, 2009).

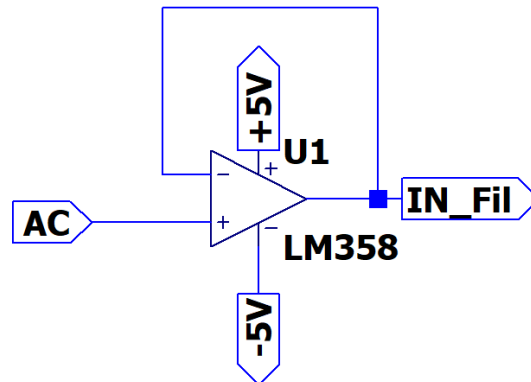


Figura 19 Esquema del amplificador de ganancia unitaria. Fuente. Elaboración propia.

ii) Filtro pasabajos (Antialiasing)

El filtro pasabajos implementado corresponde a una topología Sallen-Key, descrita detalladamente en las bases teóricas. Su objetivo es doble. Por un lado, atenuar el ruido eléctrico que puede acoplarse a la cadena de medición, como la componente de 60 Hz de la red eléctrica o el ruido de alta frecuencia producido por otros equipos e instrumentos en el reactor. Por otro lado, funciona como filtro antialiasing previo a la digitalización. El filtro antialiasing reduce las componentes de alta frecuencia por encima de la mitad de la frecuencia de muestreo, evitando el solapamiento de señales de alta y baja frecuencia que las vuelve indistinguibles (Proakis y Manolakis, 2007).

En la Tabla 1 se establecen especificaciones para el reactímetro que corresponden a la etapa de acondicionamiento, incluida la frecuencia de corte F_c , definida como la frecuencia en la que la señal que ingresa al filtro se atenúa 3 dB. La elección de esta frecuencia de corte se justifica a partir del análisis de la transformada de Fourier de la señal de interés. Se puede simular una señal proporcional a la población de neutrones en el reactor a partir de la solución de las ecuaciones de cinética puntual (ecuación 10). La Figura 20 representa la evolución de la población de neutrones debida a una inserción de reactividad de 0,100 \$ en el RP-10.

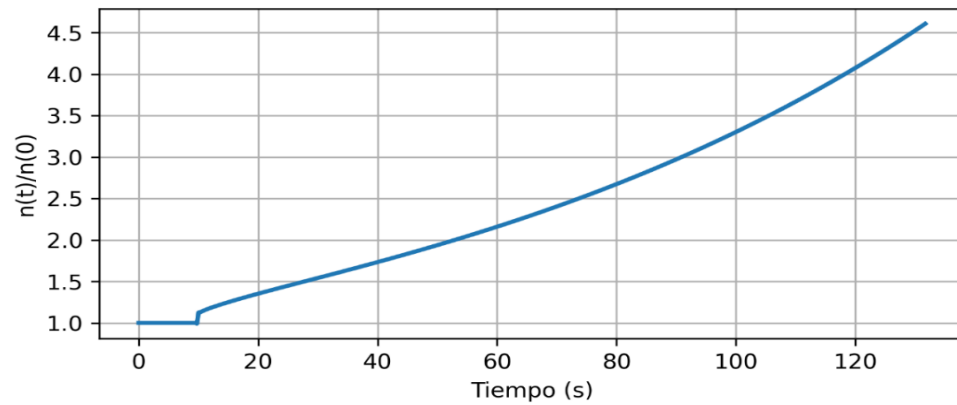


Figura 20 Evolución de la población de neutrones simulada, para una inserción de reactividad de 0,100 \$. Fuente. Elaboración propia.

A partir de estos datos se puede calcular la transformada rápida de Fourier (Fast Fourier Transform, FFT) con el objetivo de analizar las componentes de frecuencia de la señal. La Figura 21 muestra el espectro. En el eje X se tienen las componentes de frecuencia y en el eje Y la amplitud relativa para cada componente de frecuencia. Esta gráfica muestra que la señal que queremos analizar tiene sus principales componentes en el orden de unidades de Hz. Las componentes superiores a 3 Hz tienen una amplitud relativa menor a -100 dB y representan menos del 0,1 % de las componentes de mayor amplitud, por lo que son despreciables.

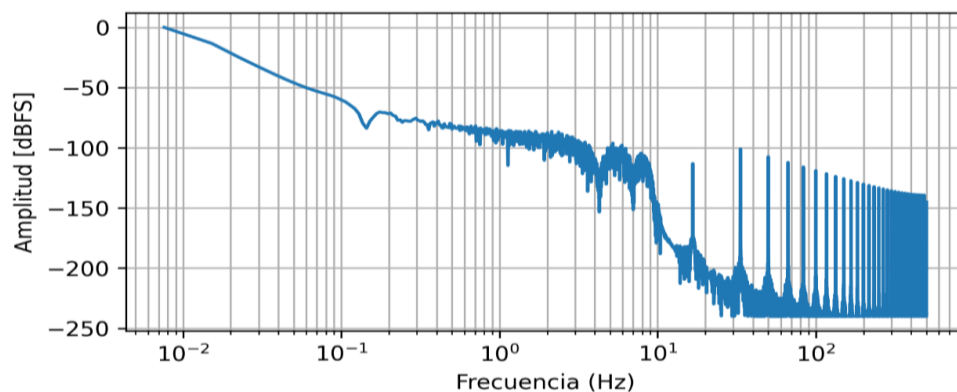


Figura 21 Espectro de $n(t)$ para una inserción de reactividad de 0,100 \$. Fuente. Elaboración propia.

Estos datos justifican la implementación de un filtro pasabajos con frecuencia de corte de 40 Hz, dado que permite el paso de la señal de interés sin modificaciones. A su vez, elimina ruido de alta frecuencia que puede acoplarse al sistema, como el ruido de 60 Hz.

El esquema de la Figura 22 muestra el filtro Sallen-Key implementado. Los valores de los componentes elegidos son estándar y están disponibles en el mercado. La función de transferencia del filtro en el dominio de Laplace se determina sustituyendo los valores de los componentes en la ecuación (4), obteniéndose:

$$H(s) = \frac{59848.430}{s^2 + 348.797s + 59848.430} \quad (24)$$

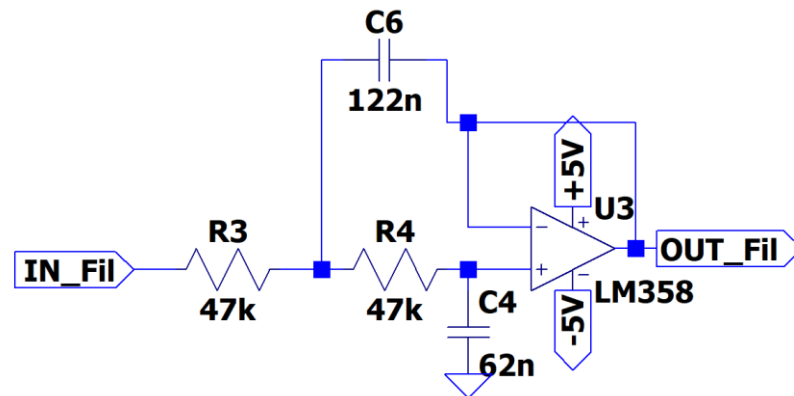


Figura 22 Esquema del filtro Sallen-Key implementado. Fuente. Elaboración propia.

La Figura 23 muestra el diagrama de Bode para el filtro diseñado, donde se observa que la frecuencia de corte obtenida para los valores de los componentes elegidos es aproximadamente $F_c = 38.9 \text{ Hz}$.

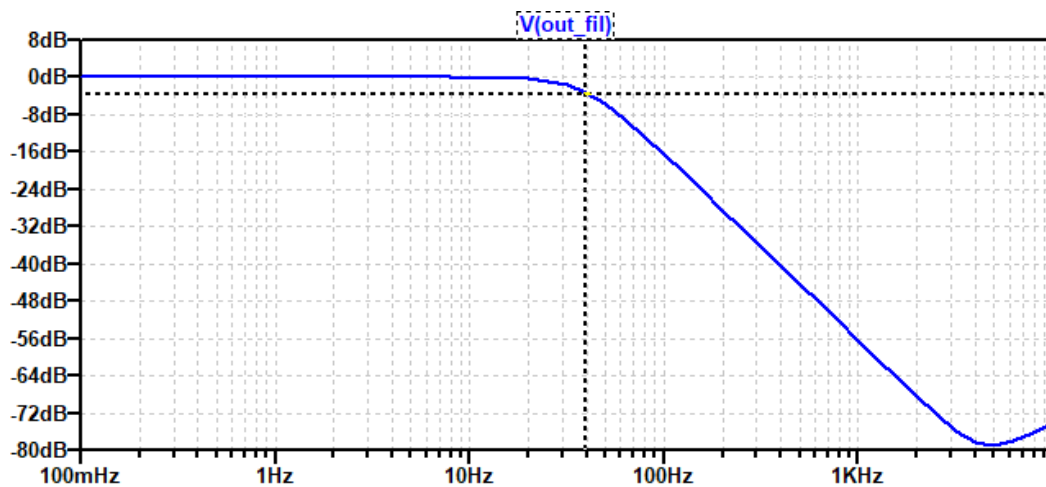


Figura 23 Respuesta en frecuencia del filtro implementado. Fuente. Elaboración propia.

iii) Limitador de voltaje

Tiene como objetivo evitar que la señal proveniente del filtro supere el límite máximo de tensión soportado por el ADC del microcontrolador empleado en el sistema. La placa de desarrollo Arduino Due posee un microcontrolador que opera con una tensión de 3,3 V, por lo que el limitador se ajusta a esta tensión. La Figura 24 muestra el esquema del limitador de voltaje implementado. Una resistencia limita la corriente que pueda circular en caso de que el voltaje que entrega el filtro sea mayor a +3,3 V o menor a 0 V. Los diodos rápidos LL4148 son adecuados para esta tarea debido a su velocidad de respuesta. Los componentes elegidos se seleccionaron en encapsulado SMD, tipo SOD-28 para el diodo y encapsulado 1206 para la resistencia. Estos encapsulados son suficientes ya que la corriente máxima que puede circular está limitada a 40 mA por el amplificador LM358, muy por debajo de los límites de los componentes.

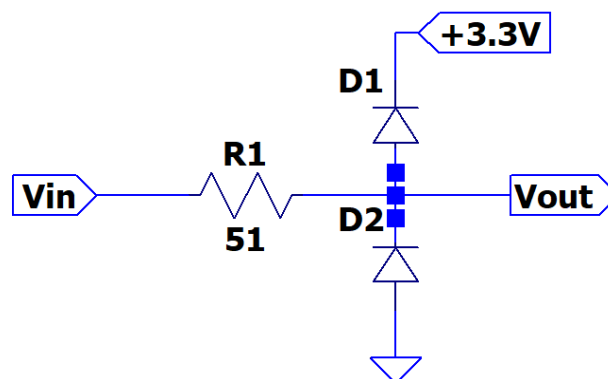


Figura 24 Esquema del limitador de voltaje implementado para el reactímetro. Fuente. Elaboración propia.

Microcontrolador

El microcontrolador es un componente clave para el funcionamiento del reactímetro, dado que permite la adquisición de la señal y el procesamiento necesario para estimar la reactividad en tiempo real. La opción elegida fue la placa de desarrollo Arduino Due, basada en el microcontrolador ARM Cortex-M3 ATSAM3X8E (Arduino, 2025). La elección de esta placa se justifica por la variedad de periféricos y especificaciones que cumplen con los requisitos establecidos en la Tabla 1, que se resumen a continuación:

- **Conversor analógico-digital (ADC):** Posee un conversor con capacidad de hasta un millón de muestras por segundo y 12 bits de resolución, lo que equivale a una resolución de 0,8 mV aproximadamente. Esto supera ampliamente el requisito de 60 muestras/s.
- **CPU:** ARM Cortex-M3 (ATSAM3X8E) de 32 bits y 84 MHz. Garantiza que el microcontrolador pueda realizar millones de operaciones por segundo, cumpliendo holgadamente el requisito de procesar las 60 muestras/s obtenidas con el ADC.
- **Temporizador:** Cuenta con temporizadores de 16 bits, que permiten fijar tiempos de muestreo con resolución de microsegundos.
- **Comunicación:** Interfaz UART de alta velocidad y USB CDC, lo que permite enviar los resultados (tiempo, ADC y reactividad) en menos de 2 ms, por lo que puede procesar hasta 500 muestras/s y enviar los resultados.
- **Pines de E/S:** Posee más de 50 pines de entrada/salida (E/S), adecuados para controlar el visualizador, pulsadores e interruptores necesarios para el manejo del reactímetro.

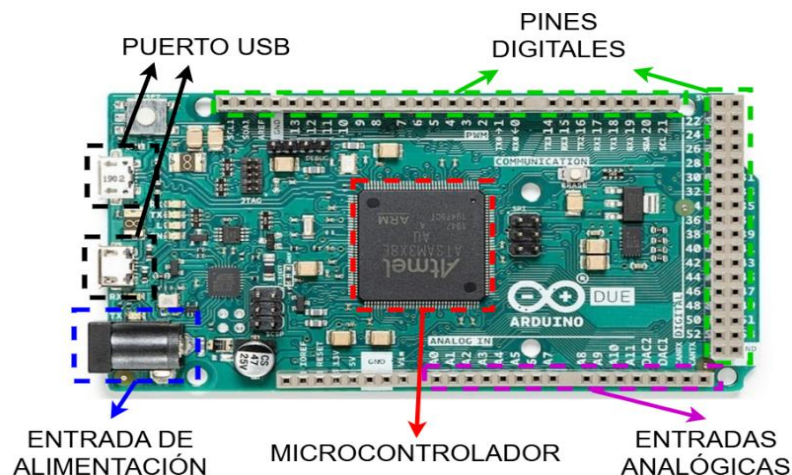


Figura 25 Arduino Due. Fuente. Adaptado de Arduino Due Specifications/Functions, (Spiceman, 2022).

El Arduino Due integra todo lo necesario para su correcto funcionamiento, por lo que solo requiere una entrada de alimentación entre 5 y 12 V, proporcionada por el convertidor DC/DC de 10 V del reactímetro.

Interfaz de visualización

Tiene como propósito mostrar el valor de reactividad calculado en tiempo real, así como el valor del ADC, que es proporcional a la potencia del reactor.

En la Tabla 1 se establecieron las siguientes especificaciones:

- Dimensiones: Formato NIM de un cuerpo, el panel frontal del reactímetro tiene un ancho de 34 mm.
- Rango y resolución: $-1,500 \$$ a $+1,500 \$$, con resolución de $0,001 \$$.
- Magnitudes a mostrar: Reactividad y valor del ADC, seleccionados mediante selector.
- Botón de reset: Permite establecer el inicio de la medición.
- Comunicación: Envío de datos por puerto serie.

Para la visualización se elige un visualizador led de siete segmentos y cuatro dígitos, de 30 mm de ancho, controlado directamente por los pines digitales del Arduino Due. La selección de la magnitud a visualizar se realiza con un interruptor de dos posiciones, que indica al microcontrolador qué magnitud mostrar (reactividad o valor del ADC), según la posición del interruptor. Para el reinicio se utiliza un pulsador que envía la señal RESET directamente al microcontrolador.



Figura 26 Visualizador de 7 segmentos para la visualización de reactividad. Fuente. Tomado de Display 7 Segmentos 4 Dígitos Rojo Ánodo / Cátodo, (s.f., Tecneu).

Aplicación de escritorio para visualización y registro de datos

Se implementa una aplicación para el almacenamiento y visualización de los datos en una computadora con sistema operativo Windows. La aplicación

se diseña para cumplir las especificaciones de la *Tabla 1*, que se resumen a continuación:

- Recepción continua datos desde el reactímetro por puerto serie. Los datos son recibidos en intervalos de 1 a 0,1 s.
- Visualización de reactividad en \$, valor del ADC convertido a corriente y marca de tiempo.
- Almacenamiento de los datos en un archivo de texto con el formato: tiempo; ADC; reactividad.
- Botones de control: Seleccionar dispositivo, conectar, iniciar, pausar, detener adquisición.

La aplicación se implementa utilizando el software LabWindows/CVI, el cual permite crear interfaces interactivas basadas en eventos. La Figura 27 muestra el diagrama de flujo de la aplicación creada.

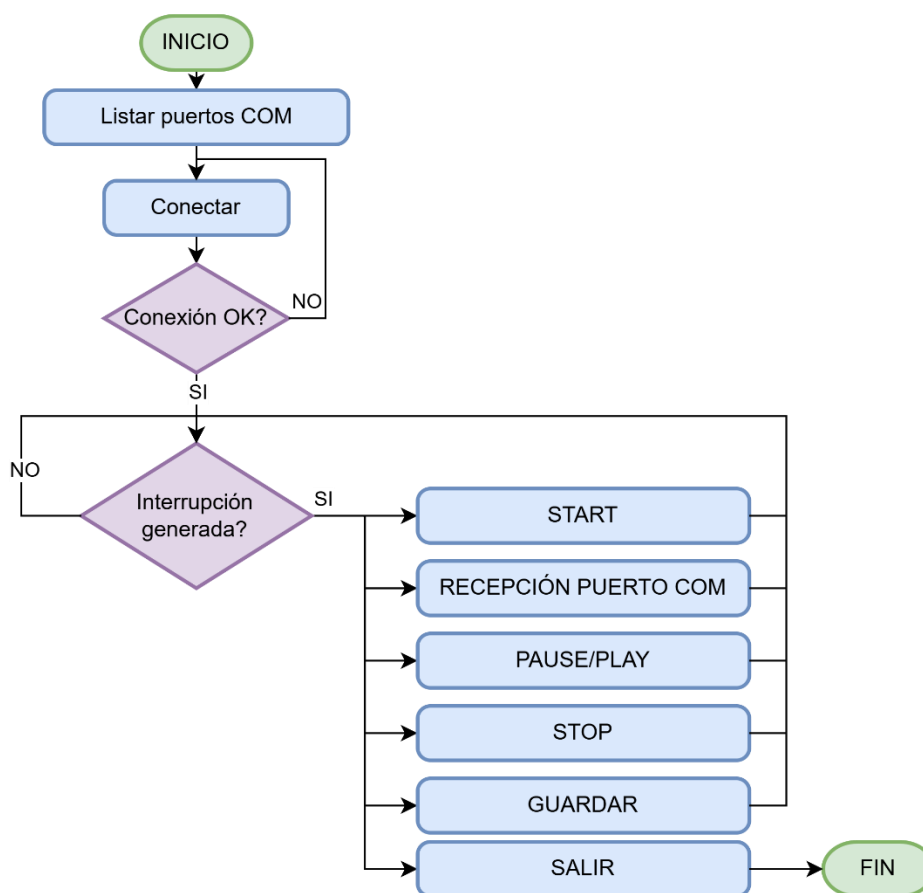


Figura 27 Diagrama de flujo de la aplicación de adquisición y registro de datos. Fuente. Elaboración propia.

3.4.4.4 Diseño del Firmware del reactímetro

El firmware del reactímetro, diseñado para el Arduino Due, complementa el hardware descrito en la sección previa de diseño. Este firmware comprende varias etapas (digitalización, algoritmo de cálculo, visualización y comunicación por puerto serie), y se diseña en función de los requisitos establecidos en la *Tabla 1*.

Un parámetro crítico para el correcto funcionamiento del algoritmo es la frecuencia de muestreo, que define cuántas muestras se toman por segundo y se procesan para obtener la reactividad. En función de los parámetros cinéticos del reactor se definió una frecuencia mínima de muestreo de 60 Hz. Por otro lado, el filtro pasabajos se diseñó con una frecuencia de corte de 38 Hz, por lo que la frecuencia de muestreo debe ser al menos el doble de ese valor, es decir, 76 Hz. Finalmente, Dulla *et al.* (2014) estiman el error en el cálculo de la reactividad en función de la frecuencia de muestreo, indicando que, para una frecuencia de 100 Hz, el error es menor a 0,1 pcm ($\approx 0,0002 \$$), muy inferior a la resolución del reactímetro (0,001 \$). Lo anterior justifica la elección de la frecuencia de muestreo $F_s = 100 \text{ Hz}$.

La Figura 28 presenta el esquema general del firmware del reactímetro. Cada bloque indica una función: adquisición con el ADC a la frecuencia establecida, configuración de los parámetros del reactor y de las condiciones iniciales, monitoreo de las señales de control, cálculo de la reactividad y salida de datos.

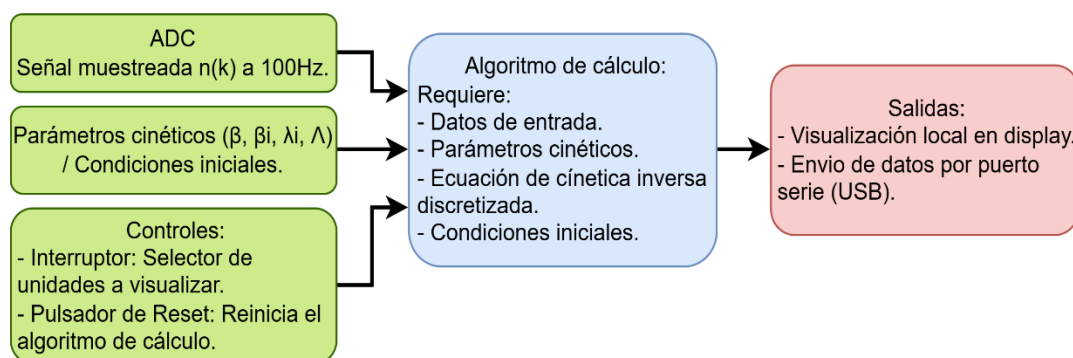


Figura 28 Esquema general del firmware del reactímetro. Fuente.

Elaboración propia.

La Figura 29 muestra el diagrama de flujo del firmware implementado en el Arduino Due, ilustrando la secuencia lógica. El proceso comienza con la configuración de los periféricos, que incluye la inicialización del ADC de 12 bits, el temporizador para muestreo a 100 Hz y los pines de control. A continuación, se establecen los parámetros cinéticos del reactor y las condiciones iniciales, dando paso al algoritmo principal. El bucle de cálculo se inicia tomando datos del ADC y calculando la reactividad mediante las ecuaciones de cinética inversa con los datos proporcionados. Posteriormente, los resultados se promedian para mostrarse en el visualizador de siete segmentos o se envían por puerto serie en una trama con el formato [tiempo, ADC, ρ] a 115 200 baudios. El firmware vigila el período de muestreo de 10 ms para sincronizar el cálculo del siguiente dato, asegurando la operación en tiempo real.

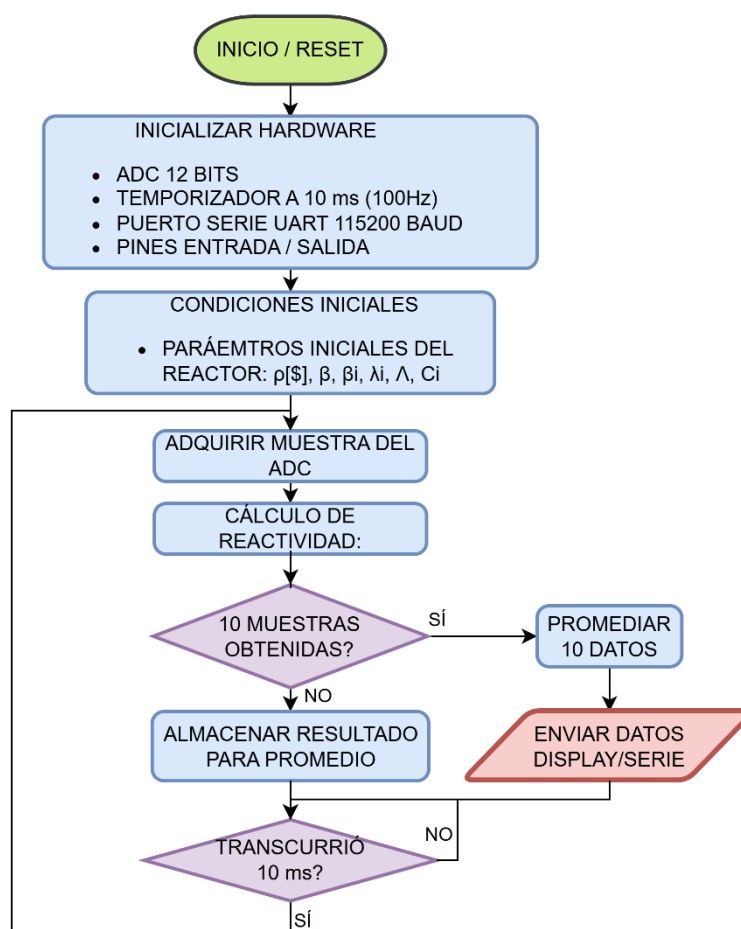


Figura 29 Diagrama de flujo del firmware del reactímetro. Fuente. Elaboración propia.

Algoritmo basado en cinética inversa para cálculo de reactividad

El algoritmo de cálculo de reactividad utiliza el método de cinética inversa, un enfoque estándar para calcular la reactividad en tiempo real a partir del flujo neutrónico medido con un detector de neutrones. El método de cinética inversa se describió detalladamente en las bases teóricas; se resolvieron analíticamente las ecuaciones de cinética puntual y se obtuvieron las ecuaciones de cinética inversa (ver ecuaciones (21) y (22)). La implementación del método en un dispositivo digital requiere la aplicación de métodos numéricos para la resolución y discretización de las ecuaciones.

El método de Euler implícito es adecuado para resolver ecuaciones diferenciales ordinarias (EDO) y resulta apropiado para discretizar las ecuaciones de cinética inversa, como se observa en Benhaim *et al.* (2012) y Ball (2017). Este método ofrece alta estabilidad numérica, por lo que permite utilizar pasos de tiempo relativamente grandes ($h = 0,01$ s) sin oscilaciones. El método también requiere un cálculo previo implícito que se resuelve estableciendo condiciones iniciales ($\rho = 0$), y posteriormente utiliza los resultados previos de forma recursiva.

La aplicación del método se detalla a continuación: a partir de las ecuaciones (21) y (22), se pueden aproximar las derivadas por relación de diferencias hacia atrás (método de Euler implícito):

$$\frac{dn(t)}{dt} \approx \frac{n^k - n^{k-1}}{h}, \quad \frac{dc(t)}{dt} \approx \frac{c^k - c^{k-1}}{h} \quad (25)$$

Donde k es el índice de iteración que se refiere al valor medido o calculado actualmente, y $k - 1$ corresponde al valor anterior; h es el paso de tiempo discreto, igual al período de muestreo (0,01 s, correspondiente a 100 Hz).

Las condiciones iniciales se establecen para simplificar el cálculo: se asume que, en el estado inicial, la reactividad $\rho = 0$ (reactor en estado crítico); por lo tanto, para $k \leq 0$ los valores de n^k y n^{k-1} son conocidos y se consideran iguales al valor medido por el ADC. Por otro lado, las diferencias

$n^k - n^{k-1}$ y $c_i^k - c_i^{k-1}$ son cero, lo que permite determinar c_i^0 . De esta forma, se obtiene un conjunto de ecuaciones discretas y recursivas, que pueden implementarse en un microcontrolador para el cálculo de reactividad en tiempo real:

$$\rho_{\$}^k = 1 + \frac{\Lambda^*}{n^k} \left[\frac{n^k - n^{k-1}}{h} - \sum_{i=1}^6 \lambda_i c_i^k \right] \quad (26)$$

$$c_i^k = \frac{c_i^{k-1} + \left(b_i h n^k / \Lambda^* \right)}{1 + \lambda_i h} \quad (27)$$

Donde $\rho_{\$}^k$ se expresa en dólares [\$]. Los valores de las constantes y parámetros del reactor se listan en el Anexo A. La Figura 30 muestra el diagrama de flujo del algoritmo diseñado para el cálculo de reactividad.

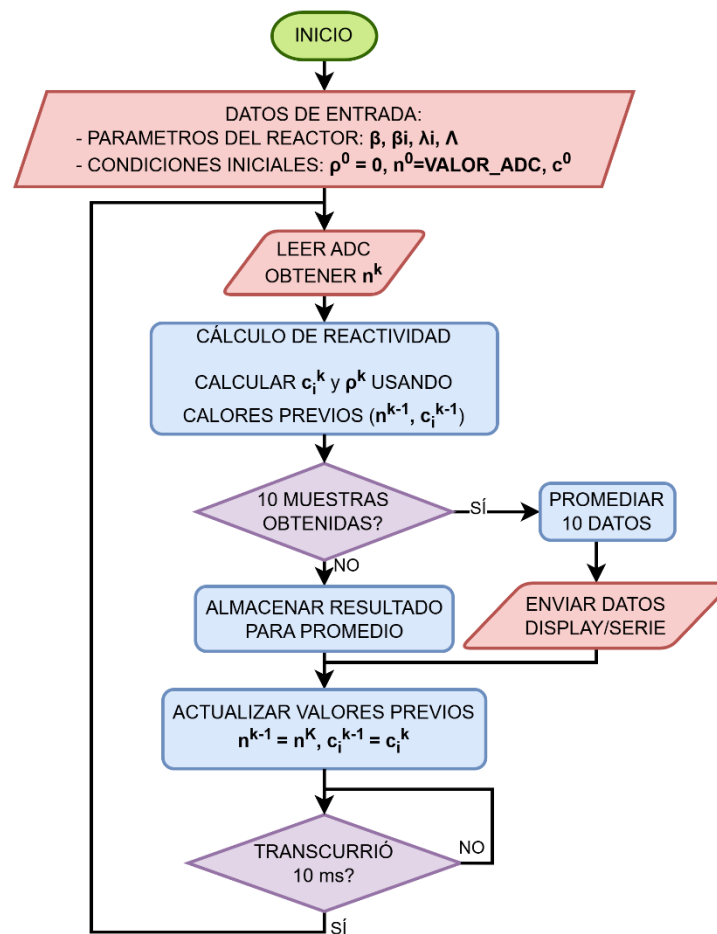


Figura 30 Diagrama de flujo del algoritmo diseñado para el cálculo de reactividad. Fuente. Elaboración propia.

3.4.5 Implementación del sistema

Esta sección describe el proceso de implementación del sistema, integrando hardware, firmware y software. Incluye el montaje físico del reactímetro, la codificación del algoritmo de cálculo de reactividad y el desarrollo de la aplicación de visualización en PC. Es así que culmina con la integración de los módulos que conforman el sistema de monitoreo de reactividad.

Implementación del reactímetro

En la sección de diseño del reactímetro digital se describieron los componentes requeridos para las diferentes etapas y se presentaron los esquemas eléctricos. A partir de estos esquemas, se elaboró en un software CAD el diseño de la PCB, generando una vista 3D con los componentes seleccionados para verificar su disposición y montaje. La Figura 31 muestra el diseño 3D de la placa.

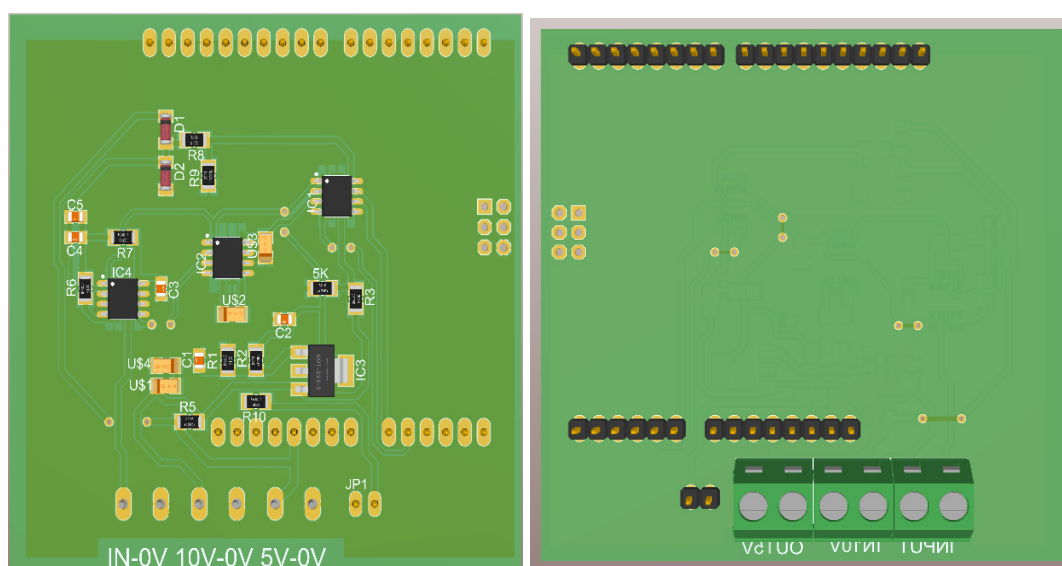


Figura 31 Vista 3D de la PCB de la etapa de acondicionamiento. Fuente. Elaboración propia.

A partir del diseño implementado, se fabricó la PCB y se ensambló el prototipo con los componentes definidos. El montaje incluyó la soldadura y verificación visual de las uniones. La Figura 32 muestra la placa de circuito impreso fabricada.

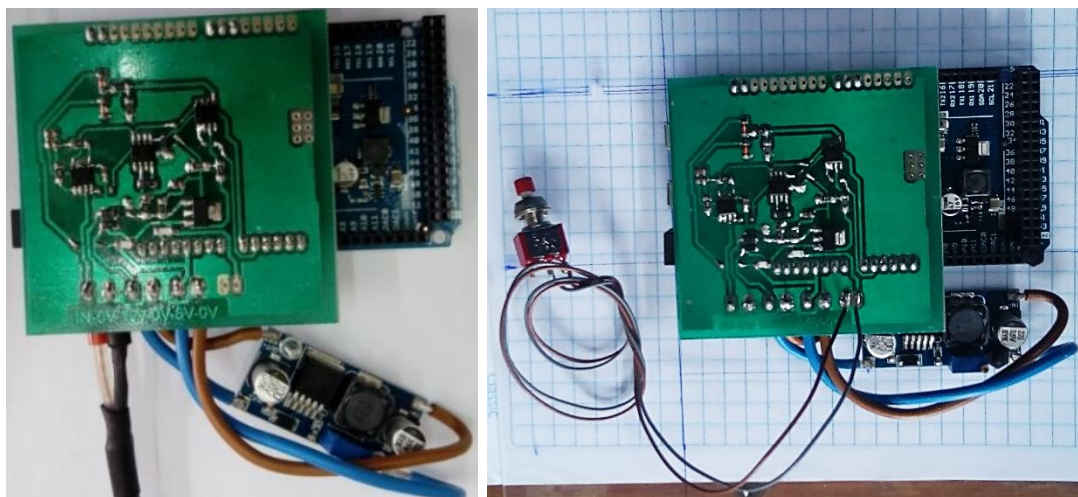


Figura 34 Integración de la PCB de acondicionamiento con el conversor DC/DC y el Arduino Due. Fuente. Elaboración propia.

Finalmente, la electrónica se monta en un módulo NIM de un cuerpo, donde se integra en el frente el visualizador de siete segmentos y el interruptor de selección de unidades. La Figura 35 muestra una animación 3D del reactímetro digital, la Figura 36 muestra el reactímetro ensamblado.



Figura 35 Vista 3D del reactímetro digital en formato NIM. Fuente. Elaboración propia.

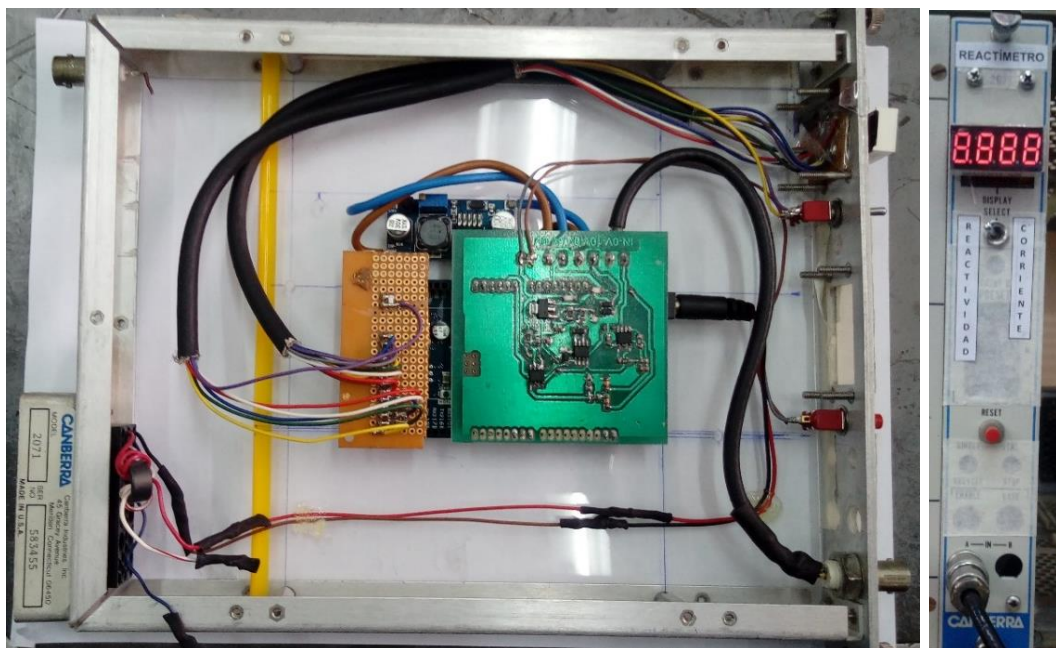


Figura 36 Módulo reactímetro digital ensamblado en formato NIM.

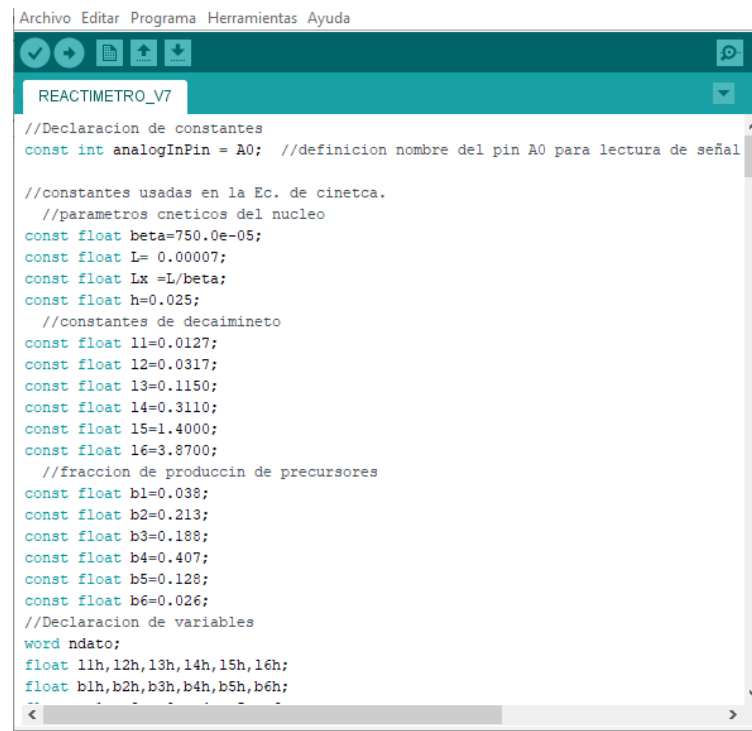
Fuente. Elaboración propia.

La programación del Arduino Due se realiza con el IDE de Arduino (entorno de desarrollo), que permite escribir el firmware en lenguaje C/C++. El código inicia con la declaración de constantes (parámetros cinéticos del reactor) y variables. Luego, en la función **setup()** se configuran los periféricos del microcontrolador, como el puerto serie/USB, el temporizador, el ADC, y se inicializan las variables declaradas. La función **loop()** es el bucle principal, encargado de realizar los cálculos recursivos para determinar la reactividad en tiempo real, según se planteó en el diagrama de flujo (ver Figura 30). La Figura 37 muestra la sección inicial del código fuente (firmware) del reactímetro.

Implementación de la aplicación de escritorio

La aplicación de escritorio, desarrollada en LabWindows/CVI, abre el puerto serie a 250 000 baudios (8-N-1, sin control de flujo), recibe tramas del tipo $[t, \text{ADC_A}, \rho (\$)]$, grafica en tiempo real y guarda los datos en un archivo de texto. La interfaz opera mediante eventos (recepción de datos por puerto serie y acciones de los botones START/PAUSE/STOP, GUARDAR y SALIR), de acuerdo con la lógica del diagrama de bloques de la Figura 27. La Figura

38 y Figura 39 muestran la interfaz gráfica de la aplicación, y la Figura 40 muestra el archivo de salida.



```

Archivo  Editar  Programa  Herramientas  Ayuda

REACTIMETRO_V7

//Declaracion de constantes
const int analogInPin = A0; //definicion nombre del pin A0 para lectura de señal

//constantes usadas en la Ec. de cinetica.
//parametros cneticos del nucleo
const float beta=750.0e-05;
const float L= 0.00007;
const float Lx =L/beta;
const float h=0.025;
//constantes de decaimineto
const float l1=0.0127;
const float l2=0.0317;
const float l3=0.1150;
const float l4=0.3110;
const float l5=1.4000;
const float l6=3.8700;
//fraccion de produccion de precursores
const float b1=0.038;
const float b2=0.213;
const float b3=0.188;
const float b4=0.407;
const float b5=0.128;
const float b6=0.026;
//Declaracion de variables
word ndato;
float l1h,l2h,l3h,l4h,l5h,l6h;
float b1h,b2h,b3h,b4h,b5h,b6h;
  
```

Figura 37 IDE de Arduino. Se muestra la sección inicial del firmware.

Fuente. Elaboración propia.

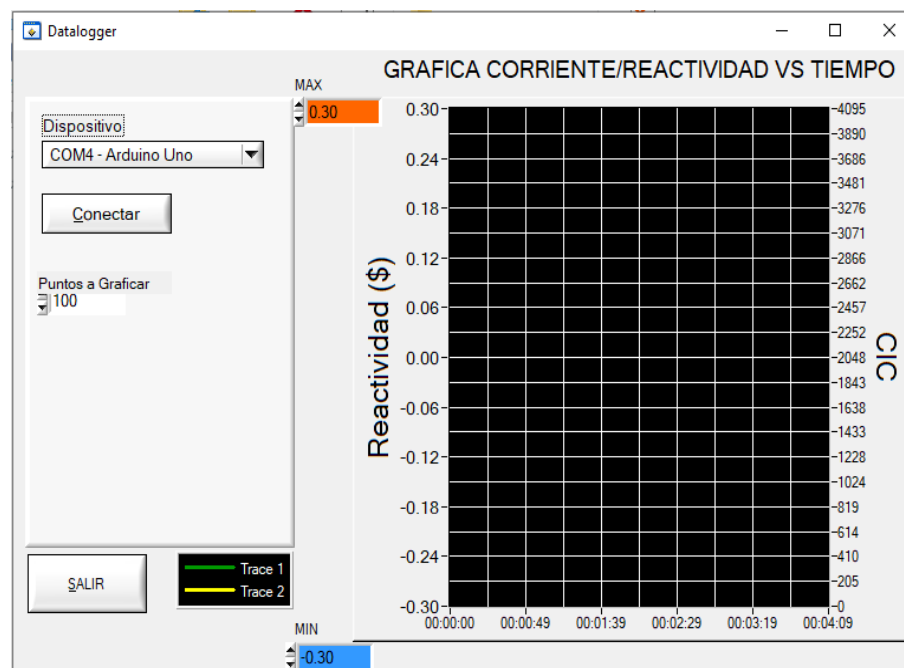


Figura 38 Ventana de configuración de la aplicación de escritorio.

Fuente. Elaboración propia.

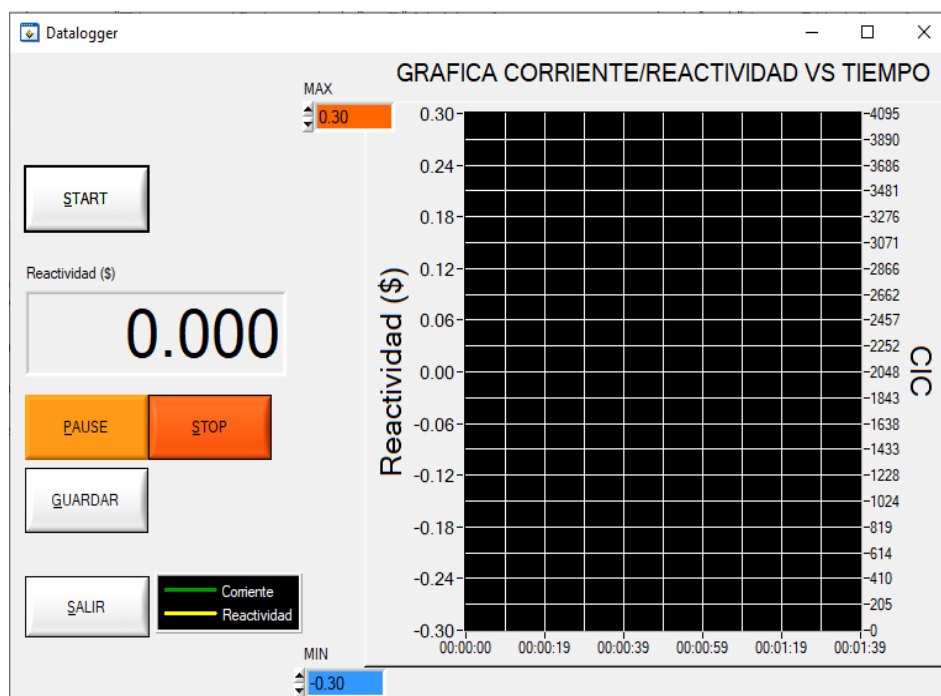


Figura 39 Ventana de control y visualización de la aplicación. Fuente. Elaboración propia.

bc1_51-0.xls			
	N°_de_Dato	Corriente	Reactividad
1			
2	3380.000000	600.000000	-0.873000
3	3390.000000	607.000000	-0.815000
4	3400.000000	614.000000	-0.762000
5	3410.000000	621.000000	-0.716000
6	3420.000000	628.000000	-0.670000
7	3430.000000	635.000000	-0.630000
8	3440.000000	642.000000	-0.592000
9	3450.000000	649.000000	-0.558000
10	3460.000000	657.000000	-0.526000
11	3470.000000	665.000000	-0.494000
12	3480.000000	672.000000	-0.467000
13	3490.000000	679.000000	-0.440000
14	3500.000000	687.000000	-0.415000
15	3510.000000	685.000000	-0.410000
16	3520.000000	670.000000	-0.426000
17	3530.000000	653.000000	-0.445000
18	3540.000000	634.000000	-0.464000
19	3550.000000	613.000000	-0.486000
20	3560.000000	592.000000	-0.508000
21	3570.000000	571.000000	-0.530000

Figura 40 Archivo de texto generado con el aplicativo de escritorio. Fuente. Elaboración propia.

La cadena de instrumentación se presenta en la Figura 41, con los módulos montados en un portamódulos NIM. De derecha a izquierda se puede encontrar: amplificador de corriente CNEA K330, panel de conectores BNC,

fuentes de alto voltaje Canberra 3002D positiva, fuente 3002D negativa y reactímetro digital. La Figura 42 muestra la cadena montada en un rack de la sala de control del RP-10 para las pruebas de funcionamiento.

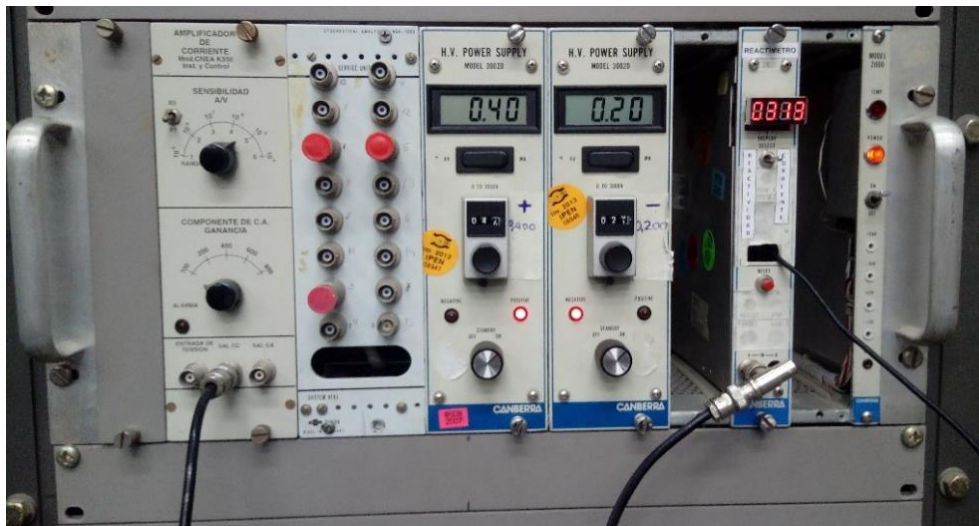


Figura 41 Cadena de instrumentación del sistema de monitoreo de reactividad. Fuente. Elaboración propia.

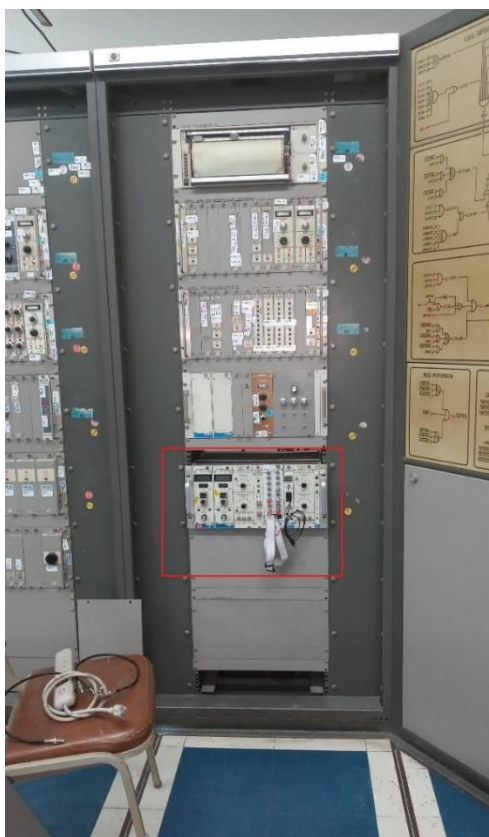


Figura 42 Cadena de instrumentación montada en un rack de la sala de control del RP-10. Fuente. Elaboración propia.

3.5 Resultado de la actividad

A continuación, se presentan los resultados de las pruebas del sistema realizadas en el laboratorio y en el reactor RP-10. Estos ensayos permitieron caracterizar su desempeño y verificar el cumplimiento del objetivo específico, validándolo mediante pruebas controladas y ensayos en condiciones reales. Además, se incluye evidencia fotográfica, esquemas de configuración y tablas de resultados.

3.5.1 Pruebas en el laboratorio

Las pruebas se llevaron a cabo en el laboratorio de física experimental del centro nuclear, con el objetivo de validar la respuesta del reactímetro a señales de flujo neutrónico conocidas. Para ello, se resolvieron numéricamente las ecuaciones de cinética puntual para un modelo de seis grupos de precursores retardados (ver ecuación (14)). Ello genera series temporales de flujo neutrónico que simulan una inserción de reactividad positiva constante de 0,200 \$ en el reactor.

Los datos obtenidos se convirtieron en una señal eléctrica mediante un convertidor digital-analógico (DAC) de 12 bits. Esta señal se inyectó directamente a la entrada del reactímetro digital, con lo cual se replicó la salida de un detector de neutrones y un amplificador de corriente (TIA) (ver Figura 43). El proceso permitió evaluar las funcionalidades del reactímetro digital: acondicionamiento de la señal, adquisición mediante el ADC y cálculo de reactividad en tiempo real.

La Figura 44 muestra la señal generada por el DAC (gráfica de color verde) y la reactividad calculada por el reactímetro (gráfica de color amarillo). Los resultados muestran un valor promedio de reactividad de 0,201 \$, consistente con el valor esperado de 0,200 \$. Se observaron fluctuaciones ($\pm 0,002$ \$ aproximadamente), atribuibles a la discretización del DAC. Estos resultados confirman la correcta implementación del método de cinética inversa, validando el firmware y el hardware en condiciones ideales antes de las pruebas en campo.

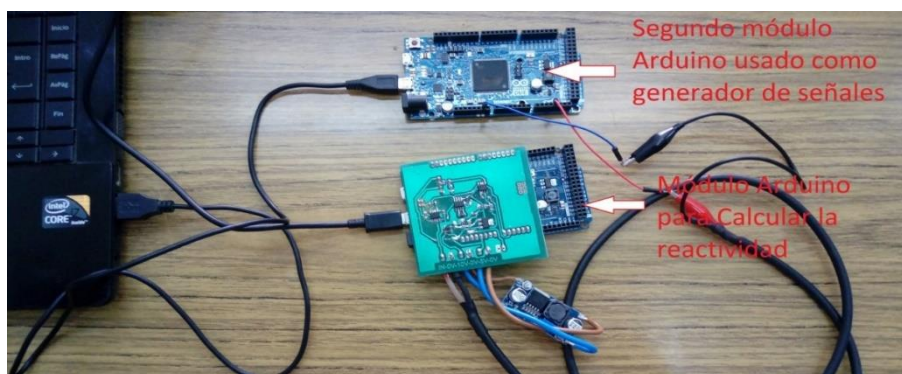


Figura 43 Simulación de la señal de un detector de neutrones. Fuente. Elaboración propia.

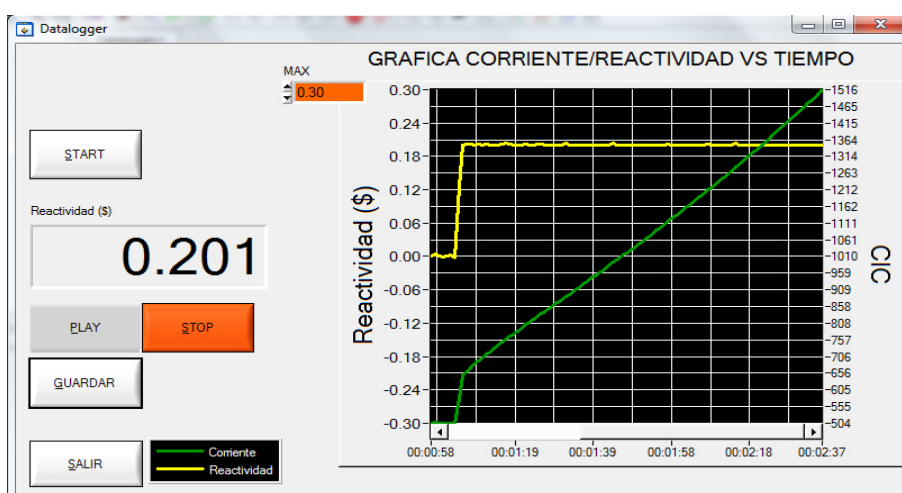


Figura 44 Simulación de una inserción de reactividad de 0,200 \$. Fuente. Elaboración propia.

3.5.2 Pruebas en el Reactor

Las pruebas en el reactor RP-10 se realizaron para validar el reactímetro en condiciones operativas reales. Se empleó la configuración definitiva del sistema, la misma prevista para ensayos futuros, lo que permitió una comparación directa con el método del período. Se dividieron en tres etapas principales: preparación y montaje de la configuración experimental (setup); ejecución del ensayo de calibración de barras de control; y, registro paralelo de datos con los métodos del periodo y cinética inversa (sistema implementado).

Para las pruebas en el reactor, el detector de neutrones (CIC) se ubicó dentro del núcleo, en una caja de irradiación libre, con el fin de lograr la mayor

exposición al flujo neutrónico y mínima influencia de las barras de control. Para proteger la CIC del agua del tanque, se encapsuló en un contenedor cilíndrico de aluminio. Los cables de señal y de polarización se extendieron, desde el detector ubicado en el interior del núcleo hasta el borde del tanque, a través de una manguera flexible; lo que permitió minimizar los riesgos de inundación del contenedor. Luego, el cableado se extendió hasta la sala de control del reactor, donde se instaló la cadena de instrumentación.

En la sala de control se interconectó la cadena de instrumentación: amplificador de corriente (TIA), dos fuentes de alto voltaje para la CIC y el reactímetro digital, montados en un portamódulos NIM. La laptop ejecutó la aplicación de adquisición y almacenamiento en tiempo real. Antes de iniciar los ensayos, se verificaron continuidad, aislamiento y polaridad de las fuentes de alto voltaje. La Figura 45 muestra una representación en 3D de la configuración experimental implementada, no a escala.

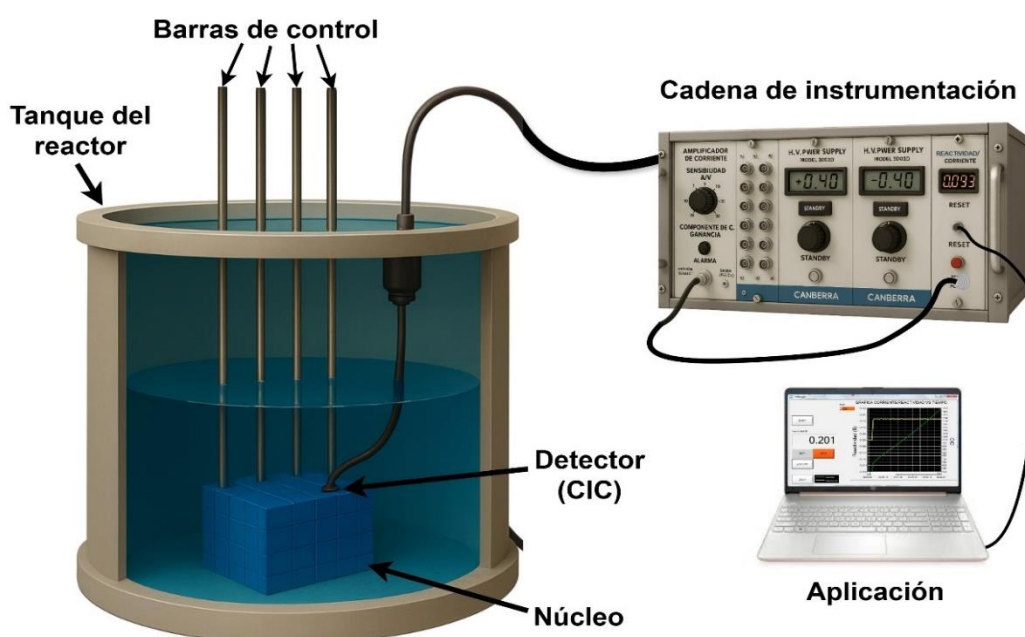


Figura 45 Montaje experimental del reactímetro en el reactor RP-10.

Fuente. Elaboración propia.

La validación experimental del sistema de medición de reactividad se realizó mediante ensayos de calibración de barras de control del reactor RP-10, empleando simultáneamente el método del período como referencia y el sistema propuesto (basado en el método de cinética inversa). El

procedimiento seguido en los ensayos se basó en los lineamientos establecidos por el área de Cálculo, Análisis y Seguridad (CASE) del Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN), específicamente el documento *Procedimiento experimental para medir reactividad en el RP-10* (IPEN, 2022) y el informe interno *Calibración de barras al inicio del núcleo 11 y determinación del exceso de reactividad* (Zúñiga y Viera, 2023).

El ensayo se inició llevando el reactor a estado crítico a una potencia baja y controlada. Se define a partir de la corriente de la cámara de ionización de marcha cuatro del reactor (IM4), con $IM4 = 0,5 \times 10^{-9}$ A, equivalente a 950 W. La configuración del núcleo correspondió al arreglo N° 11, con la CIC ubicada en la posición 17 del núcleo. La barra de control del reactor seleccionada para ser calibrada fue la BC2 (barra de control 2), mientras que su extracción se compensó con las barras BS3 y BC1 (barra de seguridad 3 y barra de control 1, respectivamente). El procedimiento realizado para la calibración de las barras de control se resume en los siguientes pasos:

- i. Se llevó el reactor a crítico (reactividad igual a cero), a una potencia de 950 W, tomando como referencia la corriente de la IM4 y la configuración de barras indicada.
- ii. En crítico, se reinicia el reactímetro (RESET) y se dejó estabilizar durante al menos 10 s.
- iii. Se realizó la extracción de un porcentaje de la barra bajo prueba (BC2), en incrementos sucesivos equivalentes a inserciones de reactividad de 0,150 \$.
- iv. Luego de cada extracción de la barra, se inicia la toma de datos del reactímetro, y se registran cinco lecturas en los 20 segundos posteriores a la extracción de la barra.
- v. Se espera a que el flujo neutrónico del reactor evolucione hasta ser adecuado para la toma de datos por el método del período, según el procedimiento RENU-CASE-PO-002, que implica esperar por lo menos 2 minutos adicionales.
- vi. Se repiten los pasos i a v hasta extraer la totalidad de la barra a calibrar.

La Figura 46 muestra la evolución temporal típica del flujo neutrónico, debido a una inserción de reactividad. En esta figura, la curva de color rojo representa el flujo neutrónico en función del tiempo, escalado de forma arbitraria. La curva de color azul corresponde a la reactividad en tiempo real determinada por el reactímetro digital. En esta gráfica se identifican cuatro intervalos de interés.

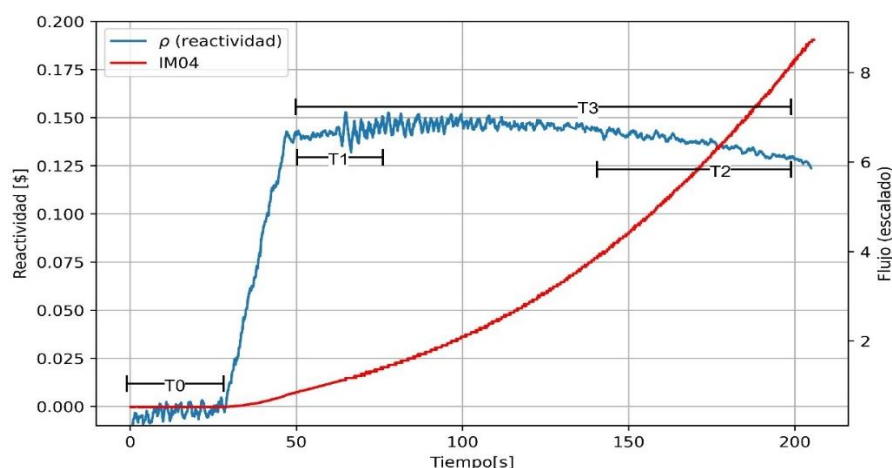


Figura 46 Evolución temporal de la reactividad y el flujo neutrónico en el reactor RP-10. Fuente. Elaboración propia.

T0: Corresponde al tiempo antes de la inserción de reactividad, es decir antes de extraer la barra. En este intervalo, se busca que el reactor esté lo más cerca al estado crítico, es decir, $\rho \approx 0,000 \$$. T0 puede durar entre cinco y seis minutos, según se observó en las pruebas realizadas.

T1: Corresponde a los 20 s posteriores a la extracción de la barra de control a calibrar. La lectura del reactímetro se estabiliza casi de inmediato, por lo que este es el intervalo adecuado para tomar datos. Las oscilaciones observadas se asocian a cambios de escala del amplificador (TIA).

T2: Intervalo dedicado al método del período; se observa una lenta disminución de ρ , coherente con el incremento progresivo de los tiempos de doblaje. T2 puede durar entre 30 y 60 s.

T3: Corresponde a la ventana completa de adquisición común para ambos métodos. Se extiende debido al tiempo requerido por el método del periodo.

T3 depende de la reactividad insertada y puede extenderse hasta los 200 s para inserciones de reactividad de 0,100 \$.

La Tabla 2 muestra los resultados obtenidos con el método del período y reactímetro digital en **T1** y **T2** para la **BC2**. En la Figura 47 se grafican los datos obtenidos. Se observa que ambas gráficas son consistentes y mantienen una diferencia mínima, menor al 3 %.

Tabla 2 Resultados de la calibración de la barra de control BC2.

BC2 [%]	Periodo (T2) [\$]	Reactímetro (T1) [\$]
0,000	0,000	0,000
8,200	0,159	0,156
13,500	0,322	0,318
17,700	0,493	0,492
21,300	0,673	0,669
24,300	0,855	0,851
26,800	1,014	1,013
29,300	1,178	1,181
31,700	1,350	1,354
34,200	1,529	1,537
36,000	1,669	1,679
38,200	1,809	1,827
40,600	1,965	1,987
42,800	2,099	2,132
45,400	2,258	2,298
47,800	2,390	2,437
50,600	2,537	2,591
53,600	2,691	2,754
56,600	2,839	2,911
59,600	2,998	3,077
63,300	3,159	3,246
66,900	3,334	3,420
70,400	3,501	3,584
74,800	3,643	3,737
79,500	3,801	3,898
86,200	3,964	4,064
100,000	4,104	4,205

Fuente. Elaboración propia.

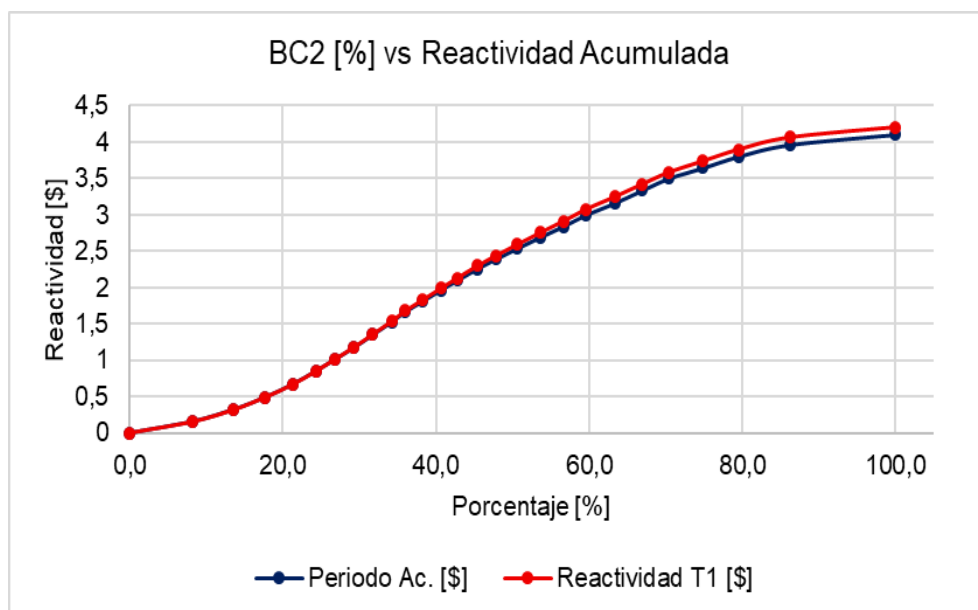


Figura 47 Reactividad acumulada para la barra de control BC2, obtenida con el método del periodo y el reactímetro digital. Fuente. Elaboración propia.

El monitoreo en tiempo real de la reactividad permitió identificar eventos o comportamientos cuya observación con otros métodos resulta poco práctica. En primer lugar, se observó que la reactividad insertada no se mantiene constante, sino que disminuye lentamente con el tiempo. Ello se muestra en la Figura 48 y la Figura 49, lo que difiere del comportamiento teórico esperado (ver Figura 44).

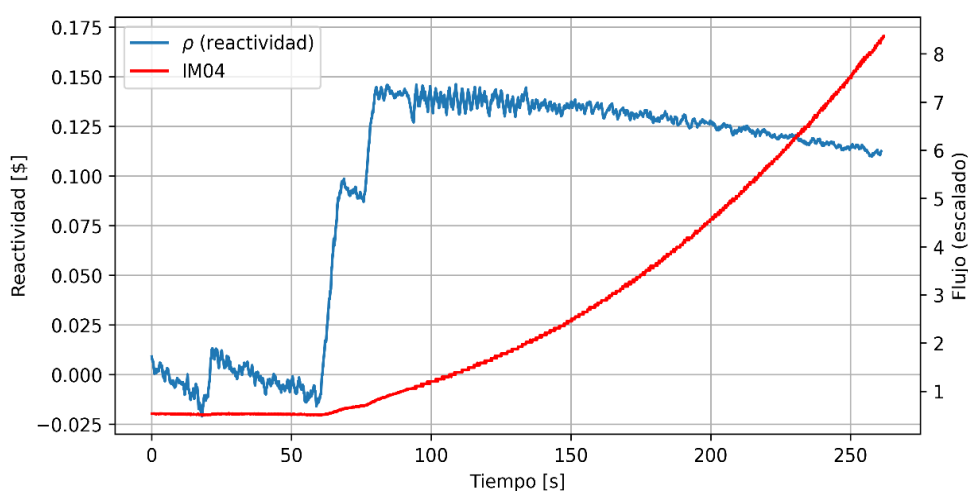


Figura 48 Fluctuaciones de reactividad durante el ensayo de calibración. Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 48, se observa que la reactividad presenta fluctuaciones alrededor de 0,0 \$. Lo anterior, debido a las maniobras que realiza el operador para llevar el reactor a estado crítico. En contraste, la señal proporcionada por el detector (curva roja), no muestra cambios perceptibles a simple vista.

Estos resultados permitieron identificar fuentes de error en los ensayos. La Figura 49 muestra que antes de la extracción de la barra de control, el flujo neutrónico (curva roja), permaneció aproximadamente constante, indicando que el reactor estaba en estado crítico. Sin embargo, el reactímetro mostraba una reactividad negativa de -0,025 \$, es decir, que el reactor se estaba apagando lentamente.

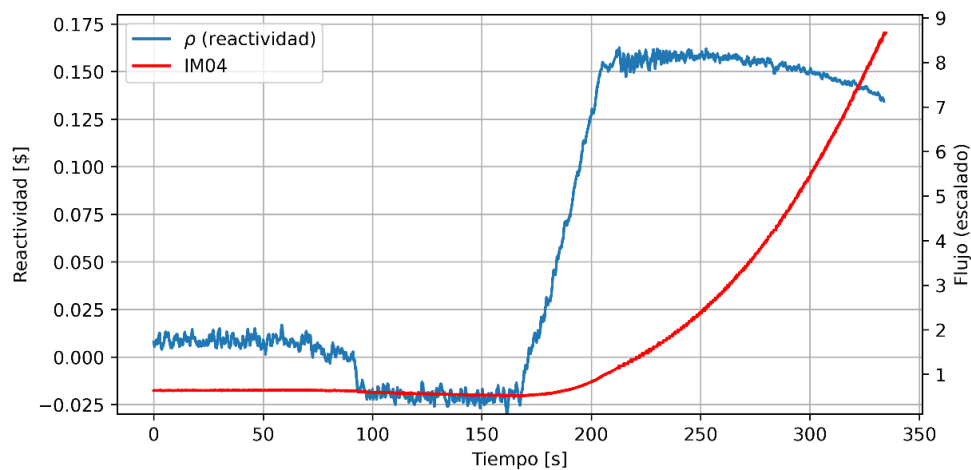


Figura 49 Desviación del estado crítico durante el ensayo de calibración.
Fuente. Elaboración propia.

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Descripción de la implementación

El sistema de instrumentación nuclear desarrollado en el RP-10 emplea el método de cinética inversa para calcular la reactividad en tiempo real a partir de la señal de un detector de neutrones. El método de cinética inversa analiza continuamente la variación de la potencia nuclear para calcular la reactividad instantánea, a diferencia del método del periodo, que requiere esperar que la población evoluciones el tiempo suficiente hasta tener un comportamiento exponencial.

Evaluación de la resolución y precisión

El sistema implementado presenta resultados con mayor resolución que el método del período, al detectar variaciones del orden de 0,001 \$, lo que permite un control más fino del reactor. En particular, identifica inserciones pequeñas (aproximadamente 0,020 \$) que, según la Figura 48 y Figura 49, resultan difíciles de distinguir con el método del período basado en la observación de la curva de flujo neutrónico. En estos casos, el efecto puede tardar varios minutos (o decenas) en hacerse medible mediante el período.

Esta mayor resolución también evidencia fuentes de error en los ensayos. Si el operador se guía solo por el flujo neutrónico para asumir criticidad, puede existir una reactividad de hasta $\pm 0,025$ \$ sin ser perceptible. Con el reactímetro es posible aproximarse al estado crítico con un error menor a $\pm 0,005$ \$, mejorando la repetibilidad de los ensayos.

En la calibración en reactividad de la barra BC2, ambos métodos fueron consistentes (ver Figura 47 y Tabla 2). Tomando el método del período como

referencia, el peso en reactividad de la barra de control (es decir la cantidad de reactividad que se inserta si se extrae toda la barra de control), fue de 4,104 \$. A su vez, el reactímetro obtuvo 4,205 \$, con un error relativo de 2,5 %, dentro del requisito establecido.

Ventajas operativas de tiempo y recursos

El sistema implementado entrega valores de reactividad a los 20 s posteriores a la inserción, mientras que el método del período requiere observar la evolución del flujo neutrónico durante 100 a 200 s. En estos ensayos, el método del período demanda aproximadamente 10 min por medición; con el reactímetro se ahorran de dos a tres minutos (aproximadamente un 25 %). En una calibración de barras que puede durar hasta 3,5 h, esto representa un ahorro de 50 min, aumentando la disponibilidad del reactor.

Por otro lado, al ser automático, el sistema puede operarse por una persona, mientras que el método del período suele requerir dos para reducir errores de registro. Además, disponer del valor de reactividad en tiempo real permite anticipar el comportamiento del reactor con decenas a cientos de segundos y facilita la toma de decisiones.

Finalmente, su uso junto con el método del período aporta redundancia en el monitoreo de un parámetro crítico, fortaleciendo la defensa en profundidad en línea con las recomendaciones del IAEA.

Evaluación económica

Se estima el costo directo de implementación del sistema desarrollado y se ilustra el potencial de ahorro por reducción de tiempo de uso del reactor en ensayos típicos. Para la implementación del sistema se ha reutilizado la instrumentación disponible en el reactor, por lo que se asume un costo cero para estos equipos. La Tabla 3 resume el costo de todos los componentes utilizados, así como un costo estimado para la implementación. El costo del desarrollo del reactímetro digital, se estima en S/. 9 000, significativamente

menor que el costo de un módulo de instrumentación nuclear comercial, que superan los \$ 5 000 por módulo.

Con datos del costo de operación anual del reactor RP-10, se puede estimar el ahorro por reducción de tiempo de uso del reactor en los ensayos para determinar reactividad usando el reactímetro digital. El costo estimado por hora de uso del reactor RP-10 es de S/. 1 400. El uso del reactímetro puede reducir el tiempo de los ensayos en un 25 %. Los ensayos para calibrar barras de control tardan 3,5 horas, por lo que se espera un ahorro de 50 minutos. La calibración de todas barras de control del reactor suele realizarse en dos o tres ensayos. La Tabla 4 presenta el ahorro económico estimado por ensayos de calibración de barras de control.

Tabla 3 Costo estimado de materiales y componentes.

Componente / Recurso	Condición	Costo (S/)
Carcasa NIM (vacía)	Reutilizado	0,00
Detector, cableado, TIA, fuentes HV, portamódulos, laptop	Reutilizados	0,00
Arduino Due	Compra	150,00
Display 7 segmentos	Compra	5,00
Interruptor	Compra	2,00
Pulsador	Compra	2,00
Fabricación de PCB	Compra	30,00
Componentes SMD	Compra	10,00
Convertidor DC/DC	Compra	10,00
Desarrollo e implementación	Personal del IPEN	9000
Total		9209,00

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 4 Estimaciones de reducción de tiempo y costo operativo en el RP-10.

Evento	Tiempo ahorrado	Equivalente (h)	Ahorro (S/)
1 ensayo	50 min	0,8333 h	1166,67
3 ensayos	150 min	2,4999 h	3499,86

Fuente. Elaboración propia.

El ahorro de tiempo en el uso del reactor no solo se traduce en un ahorro económico directo, sino que también permite una mayor disponibilidad del reactor para otras actividades con un beneficio económico potencialmente mayor, como la producción de radioisótopos.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES

El presente trabajo permitió diseñar un sistema de monitoreo de la reactividad en tiempo real para el reactor RP-10, utilizando el método de cinética inversa aplicado a la señal de un detector de neutrones. La arquitectura propuesta, integrada por el detector de neutrones, el amplificador de corriente, las fuentes de alto voltaje y el reactímetro, permitió cumplir los requisitos planteados para la estimación de este parámetro. Para la realización de las pruebas experimentales, el sistema fue instalado en la sala de control del reactor. Su empleo conjunto con el método del período añadió redundancia al monitoreo de un parámetro crítico y fortaleció la defensa en profundidad, en concordancia con las recomendaciones del IAEA.

El algoritmo desarrollado, discretizado mediante el método de Euler implícito, permitió calcular la reactividad a partir de la señal del detector de neutrones y mostró un comportamiento estable durante los ensayos realizados. Asimismo, su capacidad para detectar variaciones pequeñas de reactividad permitió efectuar un monitoreo continuo en situaciones donde los métodos convencionales presentan limitaciones.

La automatización de la adquisición, el procesamiento y el registro de los datos redujo la probabilidad de errores asociados a la medición manual. El sistema desarrollado presentó una respuesta más rápida que el método del período, lo que permitió reducir la duración de los ensayos y mejorar la eficiencia de las operaciones del reactor. La comparación de los resultados obtenidos con ambos métodos mostró una buena correspondencia, lo que respalda la exactitud del sistema propuesto y su utilidad como herramienta complementaria. En conjunto, los resultados evidencian que la solución

desarrollada constituye un aporte significativo a la modernización de la instrumentación del RP-10.

CAPÍTULO VI: RECOMENDACIONES

La señal de reactividad puede usarse como entrada para otros sistemas que requieren conocer la reactividad en tiempo real. Esto puede lograrse generando una señal eléctrica analógica proporcional a $\rho(t)$ mediante un conversor DAC, para luego ingresarla a los sistemas que lo requieran (por ejemplo, el sistema de medición de potencia del reactor).

Con fines académicos, se recomienda implementar una plataforma web para publicar datos de reactividad y flujo neutrónico en tiempo real e históricos. Esta plataforma permitirá realizar prácticas remotas para cursos de física e instrumentación nuclear que incluyan análisis de datos del reactor en modalidad síncrona y asíncrona.

Se puede optimizar la operación del reactor implementando un sistema de asistencia para el operador, que recomiende acciones de control y genere alarmas predictivas a partir del valor de reactividad en tiempo real. Esto permitiría reducir aún más los tiempos de ejecución de los ensayos, mejorar la repetibilidad de las maniobras y facilitar la toma de decisiones por parte del operador.

CAPÍTULO VII: BIBLIOGRAFÍA

- Adimir dos Santos. (2024). A reactivity meter with uncertainties. *Annals of Nuclear Energy*, 202. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2024.110463>
- Advanced Monolithic Systems. (n.d.). *AMS1117: 1A low dropout voltage regulator [Hoja de datos]*.
- Anaya, O., Arrieta, R., Castillo, W., Villanueva, J., & Urcia, A. (2002). Operación y usos del reactor RP-10. *Informe Científico Tecnológico*, 15(2), 246–249. <https://repositorio.ipen.gob.pe/backend/api/core/bitstreams/fe298421-3c69-438e-a3fc-c292393a75fd/content>
- Ansari, S. A. (1991). Development of on-line reactivity meter for nuclear reactors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 38(4), 946–952. <https://doi.org/10.1109/23.83857>
- Arduino. (2025). *Arduino Due: User manual*. <https://docs.arduino.cc/resources/datasheets/A000062-datasheet.pdf>
- Auerbach, J. M., & Carpenter, S. G. (1978). A Microprocessor Controlled Reactivity Meter for Real Time Monitoring of Reactors. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 25(1), 98–100. <https://doi.org/10.1109/TNS.1978.4329284>
- Ball, T. A. (2017). *The Inverse Kinetics Method and Its Application to the Annular Core Research Reactor* [University of New Mexico]. https://digitalrepository.unm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1067&context=ne_etds

- Benhaim, A., Bellino, P., & Gomez, A. (2012). *Determinación de la reactividad mediante la cinética inversa para reactores en estado crítico y subcrítico*. <https://doi.org/10.11606/D.85.2012.tde-07112012-080911>
- Boylestad, R. L. (2009). *Electrónica: Teoría de Circuitos y Dispositivos Electrónicos* (10th ed.). Pearson.
- Bradley, E. (2008). *Optimization of research reactor availability and reliability: recommended practices*. International Atomic Energy Agency.
- Cacuci, D. G. (Ed.). (2010). *Handbook of nuclear engineering* (1st ed.). Springer.
- Canberra Industries. (2009). *Model 3102D HV Power Supply [Manual de usuario]*.
- Castro, J., Zapata, M., & Bruna, R. (2005). Validación del programa FERCIN para la calibración de las barras de control del reactor RP-10. *Informe Científico Tecnológico*, 4, 87–92. <https://repositorio.ipen.gob.pe/item/25ac9f5d-1b14-4e79-8f3d-031cf9fb7d9b>
- CNEA. (1998). *Amplificador de ruido Mod. CNEA K330 [Manual de usuario]*.
- Czibók, T., Dezső, Z., Horváth, Cs., Lipcsei, S., Végh, J., & Pós, I. (2006). A modernized and versatile startup reactivity measuring system installed at NPP Paks and its application for subcritical systems. *Nuclear Engineering and Design*, 236(22), 2356–2364. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2006.01.012>
- Duderstadt, J. J., & Hamilton, L. J. (1976). *Nuclear reactor analysis* (1st ed.). Wiley.
- Dulla, S., Nervo, M., & Ravetto, P. (2014). A method for on-line reactivity monitoring in nuclear reactors. *Annals of Nuclear Energy*, 65, 433–440. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2013.11.039>

- Fitzgerald, R., Bergeron, D. E., Giblin, S. P., Jarrett, D. G., Judge, S. M., Michotte, C., Scherer, H., & Zimmerman, N. M. (2020). The next generation of current measurement for ionization chambers. *Applied Radiation and Isotopes*, 163, 109216. <https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2020.109216>
- Floyd, T. (2008). *Dispositivos Electrónicos* (8th ed.). Pearson Educación.
- Glasstone, S., & Sesonske, A. (1990). *Ingeniería de reactores nucleares* (Editorial Reverté, Ed.; 1st ed.).
- Grachev, A. v., Kanunnikov, Yu. S., Kulabukhov, Yu. S., Matveenko, I. P., Milovanov, Yu. L., Shipilov, E. N., & Shokod'ko, A. G. (1986). A digital reactimeter for nuclear reactors. *Soviet Atomic Energy*, 61(2), 611–614. <https://doi.org/10.1007/BF01123728>
- Huaccho, G. (2017). *Implementación de un software para el cálculo de reactividad en el reactor RP-10 [Informe interno]*. Instituto Peruano de Energía Nuclear.
- Huo, X., Fan, Z., Xu, L., Chen, X., Hu, Y., & Yu, H. (2019). A new and efficient method to measure reactivity in a nuclear reactor. *Annals of Nuclear Energy*, 133, 455–457. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2019.05.047>
- Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). (2018). *Estructura orgánica [Organigrama]*. <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/6520997/5686440-organigrama-ipen.jpg?v=1719247761>
- Instituto Peruano de Energía Nuclear (IPEN). (2022). *Procedimiento experimental para medir reactividad en el RP-10 (RENU-CASE-PO-002)*.
- International Atomic Energy Agency. (1992). *The role of automation and humans in nuclear power plants* (IAEA-TECDOC-668). International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_668_web.pdf

- International Atomic Energy Agency. (1997). Research Reactor Instrumentation and Control Technology. In *IAEA-TECDOC-973*. International Atomic Energy Agency.
- International Atomic Energy Agency. (2016). *Design of instrumentation and control systems for nuclear power plants (IAEA Safety Standards Series No. SSG-39)*. International Atomic Energy Agency. https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/PUB2045_web.pdf
- International Atomic Energy Agency. (2023). *Core Management and Fuel Handling for Research Reactors*. International Atomic Energy Agency.
- INVAP S.E. (1983). *Manual de procedimientos de control de calidad de la cámara de ionización compensada (CIC), modelo CI168/2 [Manual del fabricante]*.
- Jahan, N., Rahman, M. M., & Huda, M. Q. (2017). Neutron Flux Signal Acquisition from Plant Instrumentation Channel of Research Reactor for Reactivity Calculation. *World Journal of Nuclear Science and Technology*, 07(03), 145–154. <https://doi.org/10.4236/wjnst.2017.73013>
- Jawerth, N., & Mattar, E. (2019). Los reactores de investigación y su uso. *IAEA Bulletin*, 60(4), 4–5. <https://www.iaea.org/sites/default/files/6040405es.pdf>
- Jones, K. A. (1977). *The design, construction, and testing of a reactimeter (Master's thesis)*. Virginia Polytechnic Institute and State University.
- Karplus, Kevin. (2020). *Applied analog electronics : a first course in electronics* (1st ed.). World Scientific.
- Khalafi, H., Mosavi, S. H., & Mirvakili, S. M. (2011). Design & construction of a digital real time reactivity meter for Tehran research reactor. *Progress in Nuclear Energy*, 53(1), 100–105. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2010.08.001>

- Knoll, G. F. (2010). *Radiation detection and measurement* (4th ed.). John Wiley.
- Koshelev, A. S., Arapov, A. v., & Ovchinnikov, M. A. (2016). Feasibility of creating a specialized reactimeter based on the inverse solution to kinetics equation with a current-mode neutron detector. *Physics of Atomic Nuclei*, 79(8), 1340–1348. <https://doi.org/10.1134/S1063778816080093>
- Lamarsh, J. R., & Baratta, A. J. (2001). *Introduction to nuclear engineering* (3rd ed.). Prentice Hall. https://www.engr.psu.edu/conedmat/courses/nuce497a/lamarsh_baratta-introduction_to_nuclear_engineering_textbook_3rd_edition.pdf
- Maeda, R. de M. (2012). *Determinação experimental de parâmetros de Física de Reatores utilizando refletor de água pesada no Reator IPEN/MB-01* [Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo]. <https://doi.org/10.11606/D.85.2012.tde-07112012-080911>
- Malkawi, S., Sweidan, F., & Khalifeh, H. (2021). Reactivity determination in a subcritical reactor: Computational, analytical and experimental methods. *Annals of Nuclear Energy*, 161, 108432. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2021.108432>
- Marie, N., Lecouey, J. L., Lehaut, G., Chevret, T., Billebaud, A., Chabod, S., Doligez, X., Kochetkov, A., Krása, A., Lecolley, F. R., Mellier, F., Uyttenhove, W., Vittiglio, G., & Wagemans, J. (2019). Reactivity monitoring of the accelerator driven VENUS-F subcritical reactor with the “current-to-flux” method. *Annals of Nuclear Energy*, 128, 12–23. <https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.12.033>
- May, L., & Werz, M. (2025). A State-of-the-Art Review on Nuclear Reactor Concepts and Associated Advanced Manufacturing Techniques. *Energies*, 18(16), 4359. <https://doi.org/10.3390/en18164359>

- Messai, A., Abdellani, I., & Mellit, A. (2022). FPGA-based real-time implementation of a digital reactivity-meter. *Progress in Nuclear Energy*, 150, 104313. <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2022.104313>
- Nuclear Instrument Modules (NIM) Committee (USA). (1990). *Standard NIM instrumentation system*.
- Ott, K. O., & Neuhold, R. J. (1985). *Introductory nuclear reactor dynamics*. American Nuclear Society.
- Proakis, J. G., & Manolakis, D. G. (2007). *Tratamiento digital de señales* (4th ed.). PRENTICE HALL.
- Quispe, J. (2016). *Determinación de la variación del exceso de reactividad por modificación en la configuración de barras de control y posición de elementos combustibles del reactor nuclear RP10* (Tesis de licenciatura⁹). Universidad Nacional del Altiplano.
- Renesas Electronics. (2010). *ICL7660, ICL7660A: CMOS voltage converters [Hoja de datos]*.
- Rodríguez, R. (n.d.). El reactor peruano RP10. In *El Comercio*.
- Solís, R. D. P. (2023). Análisis estratégico en la gestión de un reactor de investigación. *Ingeniería Industrial*, 44, 207–235. <https://doi.org/10.26439/ing.ind2023.n44.6187>
- Spiceman. (2022, 11 de diciembre). *Arduino Due Specifications/Functions* [Imagen]. <https://spiceman.net/wp-content/uploads/2021/09/arduino-due.jpg>
- Suescún-Díaz, D., Espinosa-Paredes, G., & Escobar, F. H. (2021). Inverse method to obtain reactivity in nuclear reactors with P1 point reactor kinetics model using matrix formulation. *Nuclear Engineering and Technology*, 53(2), 414–422. <https://doi.org/10.1016/j.net.2020.07.003>

- Suzuki, E., & Tsunoda, T. (1964). A Reactivity Meter and Its Application. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 1(6), 210–218. <https://doi.org/10.1080/18811248.1964.9732112>
- Tanarro, A., Agustín, S., & Onrubia, T. (2008). *Diccionario inglés-español sobre tecnología nuclear: Glosario de términos* (Foro de la Industria Nuclear Española, Ed.). <https://www.foronuclear.org/wp-content/uploads/2020/05/diccionario-tecnologia-nuclear-2a-edicion.pdf>
- TECNOBROWN SRL. (2018). *Manual de operación del detector neutrónico, modelo CIC-40 [Manual del usuario]*.
- Tecneu. (s. f.). *Display 7 Segmentos 4 Dígitos Rojo Ánodo / Cátodo [Imagen]*. <https://www.tecneu.com/cdn/shop/files/display-7-segmentos-4-digitos-rojo-anodo-catodo-219244.jpg?v=1747674648&width=400>
- Texas Instruments. (2024). *LM158, LM158A, LM258, LM258A, LM2904, LM2904B, LM2904BA, LM2904V, LM358, LM358A, LM358B, LM358BA: Industry-standard dual operational amplifiers [Hoja de datos]*.
- Tsoufanidis, Nicholas., & Landsberger, Sheldon. (2015). *Measurement & detection of radiation* (4th ed.). CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Vegh, J., Kiss, S., Lipcsei, S., Horvath, C., Pos, I., & Kiss, G. (2010). Implementation of New Reactivity Measurement System and New Reactor Noise Analysis Equipment in a VVER-440 Nuclear Power Plant. *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 57(5), 2689–2696. <https://doi.org/10.1109/TNS.2010.2053384>
- Vo, V.-T., Nguyen, V.-K., Le, V.-D., Phan, Q.-M., Phan, L.-S., Nguyen, H.-B., & Nguyen, N.-D. (2023). A Digital Controller for Reactivity Monitoring and Power Control. *Science and Technology of Nuclear Installations*, 2023, 1–12. <https://doi.org/10.1155/2023/2839654>

- Wakabayashi, G., Yamada, T., Endo, T., & Pyeon, C. H. (2023). *Introduction to nuclear reactor experiments*. Springer.
- Wan, B., Zhou, Q., Chen, L., Ma, F., Ge, H., Zhang, Y., Zhang, H., Ju, Y., Li, Y., Zhang, L., Liu, Y., Liang, S., Zhang, W., Jin, J., Luo, P., Xu, H., Zhu, Q., Shi, Y., & Zhang, X. (2018). Reactivity measurement at VENUS-II during control rods drop based on inverse kinetics method. *Nuclear Engineering and Design*, 338, 284–289. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2018.08.019>
- XLSEMI. (n.d.). *XL6009: 400 kHz 42 V 5 A switching current boost DC/DC converter [Hoja de datos]*.
- Zohuri, B. (2018). *Neutronic analysis for nuclear reactor systems* (2nd ed.). Springer.
- Zúñiga, A., Bruna, R., Paredes, P., & Oré, J. (2002). Solución analítica y numérica de la ecuación cinética puntual de un reactor para 1 y 6 grupos. *Instituto Peruano de Energía Nuclear*. <https://repositorio.ipen.gob.pe/backend/api/core/bitstreams/cf029fcc-f634-418d-a823-3d89c056c96a/content>
- Zúñiga, A., & Viera, V. (2023). *Calibración de barras al inicio del núcleo 11 y determinación del exceso de reactividad [Informe interno, IPEN]*.

CAPÍTULO VIII: ANEXOS

Anexo A: Parámetros y constantes cinéticas del reactor RP-10

Los parámetros y constantes del reactor son calculados por códigos de cálculo para configuraciones específicas del núcleo. Para este caso, se utilizan las constantes para seis grupos de neutrones retardados, correspondiente a la configuración número 11 del reactor RP-10, del 2023.

Tabla A1 Parámetros cinéticos del núcleo del reactor.

	$\beta[\text{pcm}]$	$\Lambda[\mu\text{s}]$
Núcleo 11 RP-10	724	53,5

Fuente. Adaptado de *Calibración de barras al inicio del núcleo 11 y determinación del exceso de reactividad* [Informe interno, IPEN], Zúñiga y Viera, 2023.

Tabla A2 Constantes cinéticas usadas.

GRUPO	b_i	$\lambda_i[1/\text{s}]$
1	0,032464083	0,0124905
2	0,169419599	0,0317794
3	0,160311108	0,109455
4	0,455468753	0,317431
5	0,135128848	1,35269
6	0,047208022	8,67648

Fuente. Adaptado de *Calibración de barras al inicio del núcleo 11 y determinación del exceso de reactividad* [Informe interno, IPEN], Zúñiga y Viera, 2023.

Anexo B: Reactor nuclear RP-10

Un reactor nuclear de fisión es un dispositivo construido para mantener una reacción nuclear en cadena de forma sostenida y controlada. Estos dispositivos pueden tener diferentes diseños, aunque poseen elementos

comunes como el elemento combustible, elemento moderador, elemento reflector, sistema de refrigeración y la instrumentación de monitoreo y control (Tanarro *et al.*, 2008).

El RP-10 es un reactor de investigación de piscina abierta, de hasta 10 MW térmicos, refrigerado y moderado por agua ligera (H_2O), con combustible U_3Si_2 enriquecido al 19,75 %. Opera desde 1988 en el Centro Nuclear RACSO (Perú) y se emplea principalmente para la producción de radioisótopos médicos y la irradiación de materiales para investigación y aplicaciones industriales. La

Figura B1 muestra un esquema del RP-10 con sus principales elementos e instalaciones.

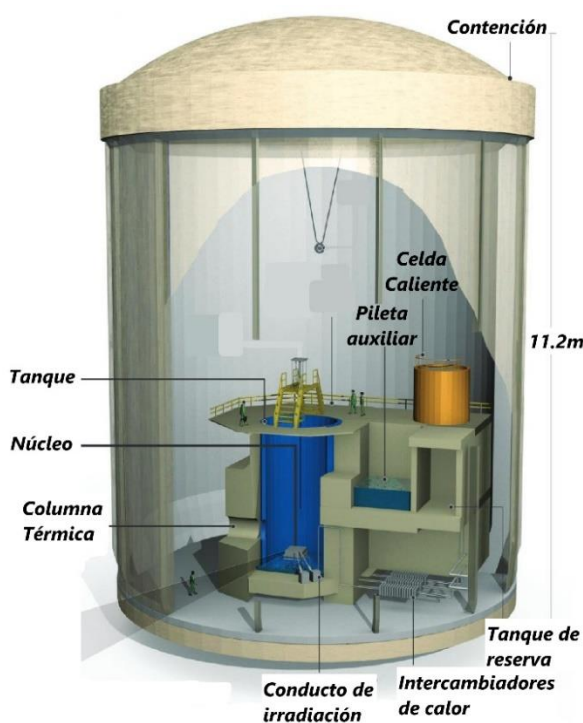


Figura B1 Esquema del reactor nuclear RP-10. Fuente. Adaptado de *El reactor peruano RP10*, por R. Rodríguez, El Comercio.

El esquema de la Figura B2 ilustra el proceso de fisión que tiene lugar en el núcleo del RP-10. En él se representan los principales componentes que permiten sostener y controlar la reacción en cadena, entre los que se encuentra el elemento combustible de U_3Si_2 , en el cual los neutrones inducen

la fisión del U-235, liberando energía y nuevos neutrones. El sistema incluye agua ligera, que actúa como moderador y refrigerante; un reflector de grafito, que devuelve parte de los neutrones al núcleo; y barras de control, que absorben neutrones para regular la potencia. Así mismo, el esquema también señala procesos característicos como la dispersión en el agua, la captura en los elementos de control, el reflejo en el grafito y el inevitable escape de algunos neutrones.

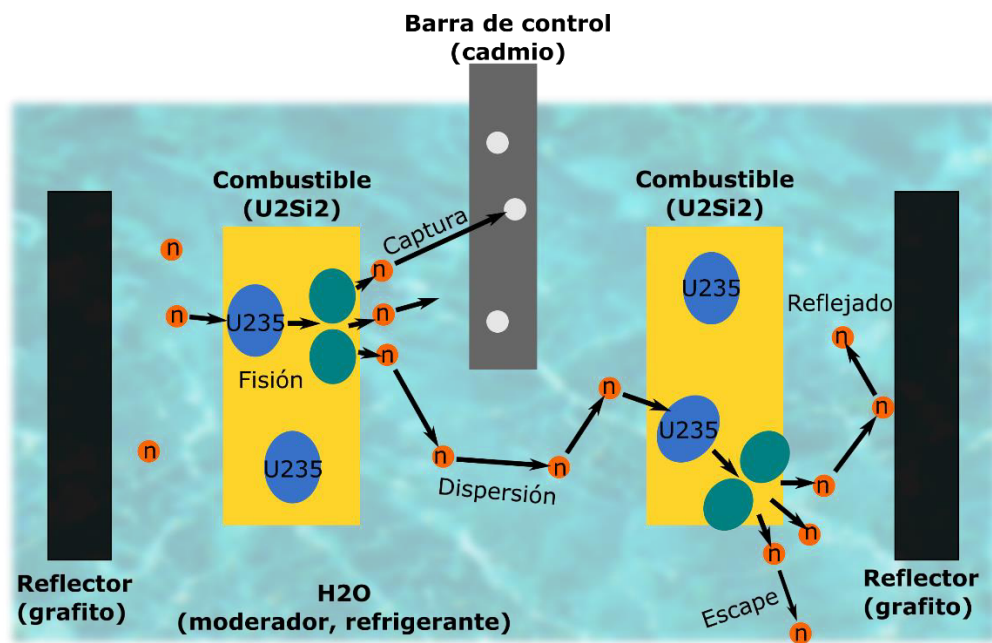


Figura B2 Esquema de la reacción en cadena en el núcleo del reactor RP-10. Fuente. Elaboración propia.