

PROYECTO INTEGRADOR CARRERA DE
INGENIERÍA NUCLEAR

**EXPANSIÓN DE LAS CAPACIDADES DEL SISTEMA
DE ADQUISICIÓN Y PUBLICACIÓN DE DATOS “RA6
EN RED”**

Gaspar Ariel Iglesias
Ingeniería Nuclear

Mgter. Dante Mangiarotti
Director

Ing. Sebastián Vaucheret
Co-director

Miembros del Jurado
Ing. Félix Maciel (Instituto Balseiro)
Ing. Pablo Cantero (Instituto Balseiro)

31 de Mayo de 2024

RA6 – Centro Atómico Bariloche

Instituto Balseiro
Universidad Nacional de Cuyo
Comisión Nacional de Energía Atómica
Argentina

(Biblioteca Leo Falicov CAB-IB)

A mi mamá y mi papá,
a mi hermano,
a mis abuelos,
a mis tíos y primos.

Índice de símbolos

RA6: Reactor Argentino número 6

RA6-ER: RA6 en Red

OIEA: Organismo Internacional de Energía Atómica

CRIO: CompactRIO

FPGA: Field Programmable Gate Array

EC: Elemento Combustible

SQL: Structured Query Language

VI: Virtual Instrument

PHP: PHP Hypertext Preprocessor

Log M-i: Logarítmico de marcha i

JSON: JavaScript Object Notation

CIC: Cámara de Ionización Compensada

SEAD: Sistema Electrónico de Adquisición de Datos

Índice de contenidos

Índice de símbolos	v
Índice de contenidos	vii
Índice de figuras	ix
Índice de tablas	xi
Resumen	xiii
Abstract	xv
1. Introducción al RA6-ER	1
1.1. Propósito	1
1.2. Estructura	2
1.3. GIT	5
1.4. Propuesta	5
2. Reactímetro digital	7
2.1. Marco teórico	7
2.2. Algoritmo de cálculo	9
2.3. Implementación	10
2.4. Calibración y verificación	13
2.5. Página Web	14
2.6. Resultados	16
3. Práctica de determinación de caudal por Elemento Combustible	21
3.1. Introducción	21
3.2. Desarrollo para la calibración	24
3.3. Desarrollo para la práctica in-core	26
3.4. Página Web	28
3.5. Resultados	32

4. Práctica de Coastdown	33
4.1. Introducción	33
4.2. Estado actual y limitaciones	34
4.3. Implementación en RA6-ER	36
4.4. Página Web	38
5. Potencia	41
5.1. Introducción	41
5.2. Implementación en RA6-ER	44
5.3. Calibración	45
5.4. Resultados	47
5.5. Página Web	49
6. Conclusiones	51
7. Trabajo futuro	55
A. Código adquisición y procesamiento para calibración de dummy caudalímetro	59
B. Código de lectura de entradas digitales en FPGA	61
C. Algoritmos desarrollados para la página del dummy caudalímetro	63
D. Gráficos de mediciones de potencia y calibraciones	67
E. Justificación de horas de proyecto integrador	69
Bibliografía	71
Agradecimientos	73

Índice de figuras

1.1. Etapas del sistema RA6 en red	2
2.1. Implementación en LabView del algoritmo de cálculo de reactividad. . .	11
2.2. VI encargado de invocar al reactímetro y manejar señales.	11
2.3. Detalle de la grilla del reactor correspondiente al núcleo 17.	13
2.4. Página web asociada al reactímetro implementado en el RA6-ER. . . .	15
2.5. Señal de reactividad en la página de señales del sistema RA6-ER. . . .	15
2.6. Evolución de la población neutrónica por la CIC en I7 en función del tiempo para la operación de calibración.	17
2.7. Evolución de la reactividad calculada en la señal obtenida por la CIC en I7 en función del tiempo para la operación de calibración.	17
2.8. Calibración de las señales de población neutrónica.	18
2.9. Comparaciones entre señales de reactividad y la referencia.	18
3.1. Composición de sistemas del dummy caudalímetro.	22
3.2. Circuito eléctrico que compone el caudalímetro de turbina utilizado. . .	22
3.3. Señal eléctrica generada por el caudalímetro de turbina.	23
3.4. Diagrama de bloques de LabView para el post procesamiento de la señal del caudalímetro.	25
3.5. Panel frontal de la aplicación de LabView desarrollada para la calibración del caudalímetro.	26
3.6. Diagrama de bloques de LabView para el procesamiento de la señal del caudalímetro en el sistema RA6-ER.	27
3.7. Fragmento de código de LabView para el procesamiento de la señal del caudalímetro en el sistema RA6-ER.	27
3.8. Página web para la visualización de los datos del dummy caudalímetro. .	28
3.9. Datos y calibración del caudalímetro de turbina resultantes de práctica de Laboratorio II [1].	32
4.1. Elementos de medición y filtrado de caudal primario.	34

4.2. Circuito eléctrico del amplificador de instrumentación utilizado en la práctica de Coastdown.	35
4.3. Esquema de adquisición de datos de la práctica de Coastdown.	35
4.4. Algoritmo de adquisición de la señal digital en la práctica de Coastdown.	37
4.5. Algoritmo de calibración y escritura de caudal de la práctica de Coastdown.	37
4.6. Interfaz de usuario de la página web de la práctica de Coastdown. . . .	38
5.1. Tanque de decaimiento de nitrógeno 16	42
5.2. Esquema de ubicación de las cámaras de ionización compensadas en la grilla del núcleo del reactor, marcadas en rojo.	43
5.3. Potencia por EC para distintas configuraciones de barras de seguridad .	44
5.4. Algoritmo de selección de calibración de señales de marcha	45
5.5. Captura de video de calibración	46
5.6. Mapeo de mediciones de cámara 2 con potencia en W y su ajuste lineal.	47
5.7. Gráfico de mediciones de cámara 2 con potencia en W y su ajuste lineal.	49
5.8. Visualizador numérico de potencia en la página de señales, en la esquina superior derecha.	50
5.9. Visualizador numérico de potencia en la página de reactividad, en la esquina inferior derecha.	50
B.1. Código en LabView para la adquisición de señales digitales.	61
D.1. Gráficos de calibración de potencia correspondientes al logarítmico de marcha 1.	67
D.2. Gráficos de calibración de potencia correspondientes al logarítmico de marcha 2.	68
D.3. Gráficos de calibración de potencia correspondientes al logarítmico de marcha 3.	68

Índice de tablas

2.1. Constantes recomendadas por Tuttle [2]	10
5.1. Resultados de calibraciones de señales de marcha por configuración de barras de seguridad	48
5.2. Resultados de calibraciones de señales de marcha por método 2.	49

Resumen

En este trabajo se realizaron diversos desarrollos que aumentan las capacidades del sistema de adquisición y publicación de datos RA6 en red.

En primera instancia, se desarrolló, implementó y validó un algoritmo de cálculo de reactividad por cinética inversa, así como su posterior implementación y visualización web.

Por otro lado, se desarrolló la implementación completa que da soporte a dos prácticas de hidráulica de la materia Laboratorio II de Ingeniería Nuclear, permitiendo la adquisición y publicación de datos de manera remota. Estas prácticas son la determinación de caudal por elemento combustible y la curva de coastdown de bomba de primario.

Además se implementó la adquisición de la señal de nitrógeno 16 en el sistema RA6 en red, dejando la estructura necesaria para resolver el problema de ruido que impide la medición de la señal.

Por último, se propuso y utilizó un método de calibración de las señales de marcha en potencia, que permitió obtener una referencia de potencia en el reactor RA6 en circulación natural, y se desarrolló un algoritmo de selección y calibración de señales de marcha, que permite escribir en base de datos una estimación de la potencia térmica del reactor. También se muestra la potencia térmica en diversos visualizadores de la página web del RA6 en red.

Palabras clave: RA6 EN RED, REACTÍMETRO, CAUDALÍMETRO, COASTDOWN, POTENCIA

Abstract

In this work, several developments were made that increase the capabilities of the RA6 on line data acquisition and publication system.

First, an inverse kinetics reactivity calculation algorithm was developed, implemented, and validated, as well as its subsequent web implementation and visualization.

On the other hand, the complete implementation that supports two hydraulics practices of the Nuclear Engineering Laboratory II course was developed, allowing remote data acquisition and publication. These practices are the determination of flow by fuel element and the primary pump coastdown curve.

In addition, the acquisition of the nitrogen 16 signal in the RA6 on line system was implemented, leaving the necessary structure to solve the noise problem that prevents the measurement of the signal.

Finally, a calibration method for the ionization chamber's signal was proposed and used, which allowed obtaining a thermal power reference in the RA6 reactor in natural circulation, and a signal selection and calibration algorithm was developed, which allows writing an estimate of the thermal power of the reactor in the database. The thermal power is also shown in various visualizers on the RA6 on line website.

Keywords: RA6 EN RED, REACTIMETER, FLOWMETER, COASTDOWN, THERMAL POWER

Capítulo 1

Introducción al RA6-ER

“The only way out of Hell is through.”

— Hades

1.1. Propósito

Como parte de la culminación de los estudios en Ingeniería Nuclear en el Instituto Balseiro, tiene lugar la materia “Laboratorio II”, que se desarrolla de manera íntegra en el reactor RA6. Dicha facilidad es del tipo reactor escuela, diseñado para la enseñanza y la investigación. En la materia tienen lugar múltiples prácticas que ponen en juego los conocimientos adquiridos a lo largo de la carrera, y que permiten a los estudiantes familiarizarse con la aplicación de los mismos en un reactor nuclear.



Dado que muchas otras universidades y centros de investigación no cuentan con una facilidad de estas características, usualmente se hace uso de simuladores para la enseñanza de estos tópicos. Es en este contexto que se propone el desarrollo de un sistema de adquisición y publicación de datos en la web que permita a los estudiantes de otras instituciones tener acceso al desarrollo de prácticas en un reactor nuclear, a través de internet.

En la web oficial del gobierno nacional[3] se detalla el sistema de la siguiente manera:

Como parte del programa Internet Reactor Laboratory del OIEA, se desarrolló una plataforma de educación a distancia con el objetivo de contribuir a la formación de recursos humanos en las áreas de diseño y operación de reactores nucleares. Esta plataforma posibilita que estudiantes universitarios de países de la región que no cuentan con un reactor nuclear de investigación puedan acceder en forma remota al RA6 para la realización de experimentos de física de reactores y prácticas de operación del reactor.

Las distintas funcionalidades y componentes del sistema se detallan en profundidad en la tesis de maestría del Mgtr. Mangiarotti [4], que fue el encargado de llevar adelante el desarrollo del sistema y de dirigir el presente trabajo.

Actualmente el sistema cuenta con soporte para el desarrollo de distintas prácticas de la materia de “Laboratorio II”, así como secciones de visualización de variables de operación del reactor y de la instrumentación de la planta.

1.2. Estructura

El sistema RA6 en red tiene una estructura modular y escalable, por lo que se puede expandir funciones existentes y generar nuevos módulos funcionales. Esta estructura es la que permite llevar las mediciones de campo a la web, pasando por diferentes etapas de procesamiento y almacenamiento. Esto es llevado a cabo a través de una lógica como la que se muestra en la figura 1.1, donde se muestran las distintas etapas del sistema.

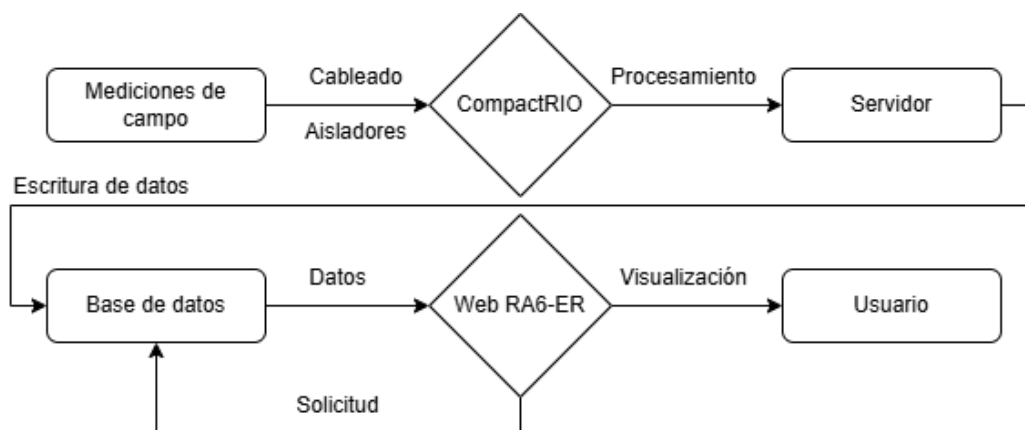


Figura 1.1: Etapas del sistema RA6 en red

Cada una de las etapas será detallada en los apartados siguientes, entrando en el detalle necesario para poder tener una visión clara de la estructura del sistema.

CompactRIO

El sistema de adquisición de datos se basa en un CompactRIO de National Instruments, que es un sistema embebido de adquisición de datos y control. Este dispositivo cuenta con un procesador embebido, un FPGA programable y módulos de adquisición de datos analógicos y digitales. En el caso del RA6 en red, estos módulos son dos del tipo NI9205[5], de adquisición de datos analógicos, y dos NI9403[6], de adquisición de datos digitales.

Las señales son adquiridas a través de un módulo de aisladores de señal y una bornera dedicada a la conexión de las entradas del CompactRIO.

En el CompactRIO se ejecuta un programa de LabVIEW que se encarga de llevar a cabo cada una de las tareas necesarias para poder obtener la información de relevancia. Esto incluye pero no se limita a: lectura de entradas, filtrado, calibración, procesamiento y cálculo de variables de interés, escritura de variables.

La programación de este componente se realiza desde un proyecto de LabVIEW, que contiene tanto los algoritmos utilizados en el CompactRIO como los ejecutados a nivel local en el servidor.

LabVIEW

LabVIEW[7] es un lenguaje de programación gráfico, que permite la programación de sistemas de control y adquisición de datos de manera intuitiva y sencilla. Permite la programación de sistemas en tiempo real, y cuenta con una amplia variedad de herramientas y funciones que facilitan la programación de sistemas complejos, incluso programación en FPGA.

Servidor local

En el proyecto de LabVIEW antes mencionado, se incluyen variables locales que copian las variables de interés del CompactRIO a través del “Aliasing” de variables, opción que permite la comunicación directa entre el CompactRIO y el servidor local.

Es en esta etapa donde la escritura en base de datos se lleva a cabo, a través de un script que permite operaciones sobre una base de datos de SQL. También es en esta etapa donde se pueden implementar VI's de testeo y de debug de las distintas funcionalidades del sistema debido a la simplicidad para la lectura de variables.

Base de datos - SQL

A través de la utilización del VI de escritura de base de datos, el servidor local recopila y almacena la información histórica de las variables de interés en SQL.

El SQL[8] es un lenguaje específico de dominio diseñado para administrar y recuperar información de sistemas de gestión de bases de datos relacionales. En el caso del RA6 en red, se utiliza principalmente el objeto tipo “Table” para la creación de tablas y la inserción de datos en las mismas.

Cada tabla de la base de datos se encuentra englobada en el esquema “Históricos” y existe una tabla por cada variable local del servidor, que cuenta con los valores de la variable y una estampa de tiempo relacionada a ellos. Además, se cuenta con una tabla instantánea de información llamada “Listado”, que posee el último valor de cada una de las variables. Esto facilita la lectura en tiempo real de la base de datos ya que no es necesario recorrer todas las tablas para obtener la última información.

Web RA-6 ER

La web del RA6 en red es la interfaz de usuario del sistema, y es a través de ella que los usuarios pueden acceder a la información de interés. La misma se compone de un front-end desarrollado enteramente utilizando el framework bootstrap[9] y el sistema de gráficos de Google charts[10].

JavaScript

Cada página de la web cuenta con un archivo de JavaScript asociado, que se encarga simultáneamente de ejecutar las peticiones al servidor, procesar la información recibida y mostrarla en la página, ya sea de forma gráfica o numérica, cumpliendo así funciones de front y back end.

En particular, para las peticiones de información se invocan scripts de PHP, que se detallan a continuación.

PHP

El lenguaje de programación PHP[11] es de uso general para el desarrollo de páginas web dinámicas. A diferencia de JavaScript, PHP se ejecuta en el lado del servidor, permitiendo que información sensible de la base de datos permanezca oculta al usuario.

Cada página de la web cuenta con un archivo de PHP asociado, que es la interfaz entre la web y la base de datos, permitiendo la lectura de la información almacenada en la misma y la devolución de la información a la web en un formato adecuado para su utilización.

1.3. GIT

El sistema de control de versiones GIT[12] permite gestionar y rastrear cambios en el código fuente de un proyecto. Debido a la facilidad que ofrece este sistema de trabajo en versiones paralelas llamadas “branches”, se puede trabajar en distintas funcionalidades del sistema, en solitario o en equipo, sin afectar la versión principal.

Debido a que el sistema RA6 en red es un proyecto en constante desarrollo, para que el trabajo se desarrolle de una manera eficiente, tenga la posibilidad de retrotraer cambios y sea posible el trabajo en asíncrono sin afectar al funcionamiento de la web, se establece el uso de GIT con su repositorio en GitHub[13] como sistema de control de versiones. En el repositorio online, se encontrarán todos los cambios realizados en el sistema.

1.4. Propuesta

En este marco es donde tiene lugar el presente trabajo, el cual tiene como objetivo principal la expansión de las capacidades del sistema de adquisición y publicación de datos del RA6 en red, a través de la implementación de nuevas funcionalidades. Estas nuevas funcionalidades son detalladas en los apartados siguientes.

Reactímetro digital

Un reactímetro se basa en un algoritmo que resuelve las ecuaciones de cinética puntual tomando como entrada la población neutrónica. Es de interés en el RA6 en red ya que actualmente no hay ningún desarrollo que permita estimar la reactividad en operación, variable de importancia en la operación de un reactor nuclear.

El desarrollo, detallado en profundidad en el capítulo 2, debe realizarse utilizando las señales de instrumentación neutrónica ya adquiridas por el sistema, como ser las señales logarítmicas de marcha o lineal de marcha 4.

Prácticas de hidráulica

En el marco de la materia de “Laboratorio II” se realizan dos prácticas de hidráulica, que actualmente no se encuentran implementadas en el sistema, por lo que no se puede dar apoyo a las prácticas presenciales ni brindarlas remotamente.

Estas prácticas son:

- Práctica de determinación de caudal por Elemento Combustible: a través de la utilización de un elemento combustible dummy sin carga físil y modificado, se

logra medir el caudal que circula a través de él. Detalles del desarrollo en el capítulo 3.

- Práctica de Coastdown: realizando apagados intencionales de la bomba del circuito primario de refrigeración del reactor RA6 se logra medir el caudal de núcleo en este evento de interés para la seguridad del reactor y la actuación del sistema de protección. Detalles del desarrollo en el capítulo 4.

Potencia

La potencia del reactor es una variable de interés en la operación de un reactor nuclear y, al igual que la reactividad, no se encuentra implementada en el sistema. La potencia se puede estimar a través de la utilización de un sistema de medición de nitrógeno 16 o de la instrumentación neutrónica del reactor. Se debe realizar el cableado y las calibraciones necesarias para poder llevar a cabo la medición de la potencia. Esto se explora en profundidad en el capítulo 5

Capítulo 2

Reactímetro digital

*“My son, the day you were born, the very forests of Lordaeron
whispered the name, Arthas”*

— Therenas Menethil II

2.1. Marco teórico

Ecuación de transporte

El comportamiento de un reactor nuclear es gobernado por la distribución en espacio, energía y tiempo de los neutrones en el sistema, y uno de los problemas centrales de la teoría de reactores es predecir esta distribución [14]. En principio, esto puede hacerse resolviendo la ecuación de transporte neutrónico 2.1

$$\begin{aligned} \frac{1}{v} \frac{\partial \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t)}{\partial t} = & (1 - \beta) \frac{\chi_p(E)}{4\pi} \int_0^\infty \nu \Sigma_f(\vec{r}, \vec{\Omega}, E) dE + \frac{\chi_r(E)}{4\pi} \sum_i \lambda_i C_i(\vec{r}, t) \\ & - \vec{\Omega} \cdot \nabla \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) - \Sigma_t \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}, E, t) \\ & + \iint \Sigma_s(\vec{r}, \vec{\Omega}' \rightarrow \vec{\Omega}, E' \rightarrow E, t) \phi(\vec{r}, \vec{\Omega}', E', t) dE' d\Omega' \end{aligned} \quad (2.1)$$

Esto si bien es teóricamente posible, en la realidad es impracticable debido a la complejidad del problema, de la geometría y la dinámica acoplada del comportamiento de todos los materiales con diversos factores externos como por ejemplo, la temperatura de los mismos. Por lo tanto, para simplificar el problema, se recurre a diversos métodos y aproximaciones que permiten obtener soluciones aproximadas en tiempos razonables dependiendo de la aplicación que se necesita resolver. En este caso, se precisa de la aproximación de cinética puntual, ya que se busca resolver la evolución temporal de la población neutrónica en el reactor en su totalidad.

Factor de multiplicación efectivo y Reactividad

El factor de multiplicación efectivo 2.2 es una cantidad adimensional que pesa de manera relativa la producción de neutrones de una generación, contra las absorciones y fugas del sistema de la generación anterior.

$$k_{eff} = \frac{\text{Neutrones producidos en la generación actual}}{\text{Absorciones} + \text{Fugas generación anterior}} \quad (2.2)$$

Cuando este vale 1, el reactor se encuentra en estado “crítico”, y desviaciones de este valor por debajo o por encima indican un estado de sub o súper criticidad, respectivamente. Para pequeñas desviaciones de este valor, se define la reactividad 2.3 como:

$$\rho = \frac{k_{eff} - 1}{k_{eff}} \quad (2.3)$$

Esta nueva variable, permite cuantificar y amplificar desviaciones de la criticidad, volviéndose una variable de interés en muchos aspectos de la ingeniería nuclear, pero en particular y para lo que será usada en este trabajo, es de suma utilidad para el control en operación de los reactores nucleares.

Cinética puntual

En la presentación de la ecuación de transporte neutrónico se mencionó que dependiendo de la aplicación, se pueden realizar diversas aproximaciones para simplificar el problema. Una de estas aproximaciones es la cinética puntual, que busca resolver la distribución temporal de la población neutrónica y de precursores del reactor en todo su volumen. Para ello, se realizan diversas aproximaciones e integraciones para obtener un conjunto de ecuaciones diferenciales ordinarias 2.4, solo dependientes del tiempo, que describen la cinética de los reactores.

$$\begin{aligned} \frac{dn(t)}{dt} &= \frac{\rho(t) - \beta}{\Lambda} n(t) + \sum_i \lambda_i C_i(t) \\ \frac{dC_i(t)}{dt} &= -\lambda_i C_i(t) + \beta_i n(t) / \Lambda \end{aligned} \quad (2.4)$$

En este sistema, queda evidenciada la relación directa entre la reactividad y la población neutrónica, y la importancia de la cinética puntual en el control de los reactores.

Cinética inversa

La cinética inversa se refiere a la resolución de las ecuaciones de cinética 2.4, pero con el objetivo de encontrar la evolución temporal de la reactividad en función de una evolución conocida de la población neutrónica. Esto es de interés ya que en la práctica, la población es una variable que puede ser medida con cierta precisión y así determinar la reactividad asociada a distintas evoluciones y eventos.

2.2. Algoritmo de cálculo

Medición de la población neutrónica

Para poder utilizar el método de cinética inversa se debe disponer de una medición de la población neutrónica en función del tiempo. Esta debe necesariamente ser desde un punto exterior y lo suficientemente lejano al núcleo del reactor, ya que de no ser de esta manera se pueden observar efectos y no linealidades espaciales, que no se encuentran en las consideraciones del modelo de cinética puntual.

Por otro lado, las mediciones deben ser lo suficientemente rápidas, ya que debe captar evoluciones temporales del grupo más rápido de precursores para que el modelo sea válido. Teniendo esto en cuenta, dependiendo la velocidad de la adquisición de datos, se determinará el conjunto de precursores a utilizar.

Algoritmo

Para la discretización temporal se utiliza un modelo de diferencias finitas a orden dos, que aproxima derivadas temporales de orden uno como el cociente de las variaciones entre un paso y el siguiente.

De la discretización mencionada para las derivadas, se resuelve primero los precursores en función de un n^k (paso k-ésimo), y estos son utilizados en el paso ρ^k . El algoritmo entonces resulta como en la ecuación 2.5.

$$\begin{aligned} C_i^{k+1} &= \frac{C_i^k + \frac{\beta_i n^{k+1} \Delta t}{\Lambda}}{1 + \Delta t \lambda_i} \\ \rho^{k+1} &= \left(\frac{n^{k+1}}{\Delta t} - \sum \lambda_i C_i^k \right) \frac{\Lambda}{n^k} + \beta - \frac{\Lambda}{\Delta t} \end{aligned} \quad (2.5)$$

Para el paso inicial de este algoritmo iterativo, se propone una concentración de precursores de equilibrio para la lectura de n^0 . Esta concentración del grupo sub- i , se presenta en la ecuación 2.6.

$$C_i^0 = \frac{\beta_i n^0}{\lambda_i \Lambda} \quad (2.6)$$

En cuanto a las constantes neutrónicas a utilizar, se propone utilizar las constantes recomendadas por Tuttle [2], detalladas en la tabla 2.1 las correspondientes a los precursores y un $\beta = 764$ [pcm] y $\Lambda = 42 \mu s$.

Grupo	Tuttle			
	b_i		λ_i	
1	0.038	0.004	0.0127	0.00003
2	0.213	0.007	0.0317	0.0012
3	0.188	0.0024	0.115	0.004
4	0.407	0.01	0.311	0.012
5	0.128	0.012	1.4	0.12
6	0.026	0.004	3.87	0.55

Tabla 2.1: Constantes recomendadas por Tuttle [2]

Este algoritmo, debido a la semilla inicial propuesta, converge en aproximadamente 200 iteraciones, hasta que los precursores son correctamente calculados.

Por otro lado, surge una limitación evidente del mismo y es su imposibilidad de aplicación en la puesta a crítico del reactor, ya que el mismo no admite la presencia de una fuente externa de neutrones en el sistema.

2.3. Implementación

Hardware

Las señales utilizadas para el cálculo de reactividad ya son adquiridas por el sistema RA6-En Red, y estas son:

- Phi M4
- Log M1
- Log M2
- Log M3

Servidor

Se crean dos variables denominadas “Reactividad inter” y “Reactividad Log inter”, en las que se almacenará el valor de la reactividad del paso actual calculado por el algoritmo. El primero, será la reactividad calculada con la señal de población neutrónica

de Phi M4, y el segundo, será un valor correspondiente a las tres señales logarítmicas de marcha.

El algoritmo presentado en 2.5 se programa en LabView en un VI dentro del entorno del CompactRIO utilizado por el sistema, de la manera presentada en 2.1

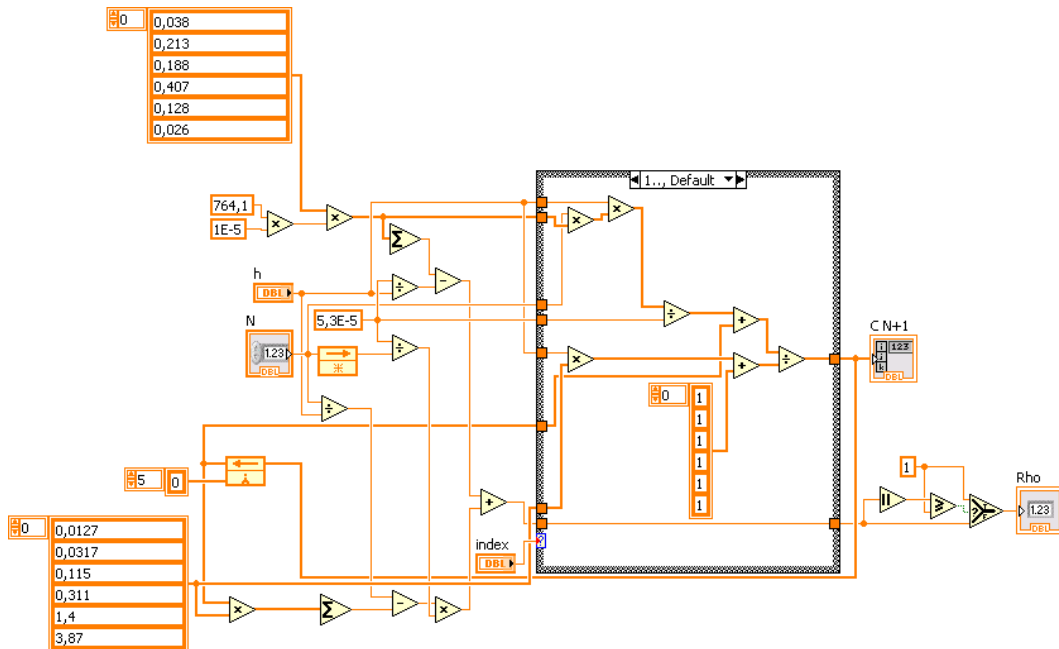


Figura 2.1: Implementación en LabView del algoritmo de cálculo de reactividad.

Este VI tiene como input cualquier señal de población neutrónica, una variable denominada “index” que sirve para inicializar los precursores con su valor semilla, y el paso de tiempo del paso a calcular. Como output, se tienen los precursores, en caso de ser necesarios en un futuro, y la reactividad del paso actual.

A su vez, este VI es instanciado por otro VI que es el encargado de escribir las variables de reactividad en el sistema RA6-ER. Este VI se presenta en la figura 2.2.

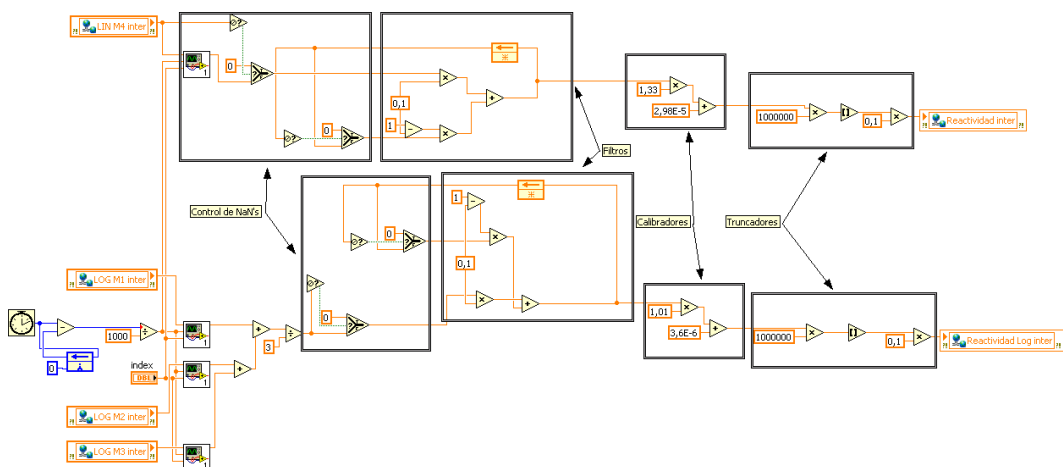


Figura 2.2: VI encargado de invocar al reactímetro y manejar señales.

Este VI recolecta las señales de población neutrónica junto con la diferencia entre

tiempos de ejecución actual y anterior para poder ser pasados como inputs de las instancias del VI de reactímetro. A su vez, se encarga de escribir las salidas de estos en las variables del CRIO.

Como se puede observar, en ambos VIs se encuentran ciertos controles sobre los valores que toma la reactividad, esto se debe a que en el funcionamiento del CRIO como standalone, no todos los programas se ejecutan en orden luego de cargar y leer todas sus entradas, por lo que esto genera que se ejecute el algoritmo con entrada nula por ejemplo. Esto genera diversos errores en los outputs, como reactividad infinita o NaN, que son filtrados por los mencionados controles.

También se observa como es calculada la reactividad logarítmica, como el promedio de las reactividades calculadas con las tres señales logarítmicas de marcha.

En cuanto a filtrado, se pueden apreciar los filtros exponenciales que se aplican previamente a almacenar el valor de reactividad en las respectivas variables. Este filtro pasa bajo se encuentra detallado en la ecuación 2.7 y permite suavizar las variaciones rápidas de la reactividad, utilizando un $\alpha = 0,10$. También se aplica un truncado a la décima de pcm, logrando de esta manera que la escritura en base de datos sea más eficiente y no se almacenen valores con precisión innecesaria.

$$\rho^{k+1} = \alpha \cdot \rho^k + (1 - \alpha) \cdot \rho^{k+1} \quad (2.7)$$

Por último, se observa la sección de calibración, donde a cada señal se le asigna sus propios factores de calibración, que permiten convertirlas en una señal de reactividad representativa de evoluciones del reactor. Los valores de estos factores son obtenidos a través del método explicado en la sección 2.4.

Este VI que ejecuta estas funciones es llamado por el VI llamado “Loop determinista”, que a su vez es llamado por “RTPPrincipal”, el programa principal de ejecución cuando el CRIO se utiliza en modo standalone. Estos VI forman parte de la estructura pre existente del sistema RA6-ER, y se encuentran detallados en la referencia [4]. Cuando el CRIO se ejecuta en el modo mencionado, estos algoritmos son invocados cada 70 ms, permitiendo entonces utilizar la aproximación a seis grupos propuesta.

Estas variables “inter”, ya filtradas y truncadas para escritura eficiente, son leídas a través del “aliasing” en un nuevo set de variables, esta vez en el servidor en sí, llamadas “Reactividad M4” y “ReactividadLog”. A través de un script que se ejecuta en el servidor llamado “Escribe SQL”, estas variables se guardan en la base de datos del sistema RA6-ER, para ser luego recolectadas por la página web y ser mostradas de diversas maneras.

2.4. Calibración y verificación

Para la verificación y/o eventual corrección del algoritmo propuesto, se utiliza una serie de mediciones de campo Ad-Hoc en el núcleo del reactor RA6, que permiten obtener resultados independientes de reactividad y de la evolución del reactor en general.

Método alternativo

El método propuesto consiste de una cámara de ionización compensada instalada en la caja de agua ubicada en la posición I7 de la grilla del reactor, mostrada en la figura 2.3. Esta cámara, polarizada con ± 500 V, es adquirida con un electrómetro Keithley 6517B y se obtiene una señal de corriente en función del tiempo. Esta señal es proporcional a la población del reactor, por lo tanto se utiliza como input para un algoritmo de cálculo de reactividad.

El algoritmo utilizado no difiere del detallado en la sección 2.2, pero en este caso se evitarán alinealidades derivadas de las múltiples etapas de amplificación de señal, como pasa con las señales adquiridas por el sistema RA6-ER.

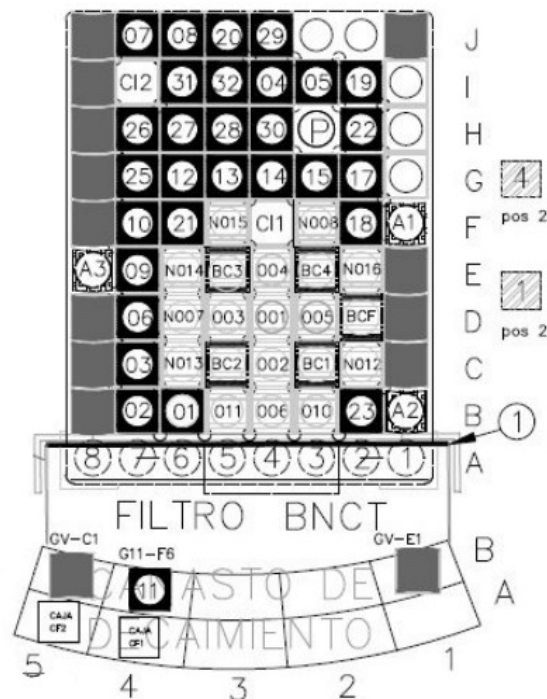


Figura 2.3: Detalle de la grilla del reactor correspondiente al núcleo 17.

La caja de agua en I7 se considera lo suficientemente lejos del núcleo y de la barra fina en particular, por lo que tampoco será sensible a efectos espaciales que puedan tener lugar en el núcleo, correspondientes a movimientos de barras.

Operación

Para la calibración del reactímetro, se realizan una serie de subidas y bajadas de población neutrónica utilizando la barra de regulación, manteniéndose el reactor siempre en potencias menores a 500 W, y en refrigeración por circulación natural. La condición impuesta sobre la potencia es para evitar realimentaciones en el sistema, y poder observar las evoluciones de la reactividad de manera más clara.

Durante la operación se realizan subidas y bajadas de potencia, a diferentes tasas y con distintas duraciones, a fin de también observar las limitaciones de velocidad del algoritmo propuesto, puesto que se utiliza como input de los mismos las señales filtradas de población, que por el filtrado no tienen una respuesta instantánea a cambios.

Las señales a adquirir por parte del RA6-ER serán entonces las señales de población neutrónica disponibles en el sistema ($\Phi M4$ y señales de marcha logarítmicas) y las reactividades calculadas por el algoritmo propuesto correspondientes a las señales de población antes mencionadas. Por parte del sistema Ad-Hoc utilizado, se adquirirá la señal de corriente de la cámara de ionización compensada, y la reactividad calculada.

2.5. Página Web

Se desarrolló en el entorno del servidor web del sistema RA6-ER una página enteramente dedicada al reporte de reactividad del reactor, de fácil acceso y con diversas funciones que aumentan el valor didáctico del sistema.

Front-End

La página web asociada al reactímetro implementado en el RA6-ER fue desarrollada en el marco de este trabajo. La misma se encarga de mostrar la evolución de la reactividad en tiempo real, junto a la evolución de la población y una referencia de potencia del reactor. Una muestra de la misma se encuentra en la figura 2.4

La página cuenta con un sistema selector de unidades de reactividad, así como selección de señales a visualizar, para poder obtener la información necesaria en el formato requerido. El gráfico se actualiza en tiempo real a través de un script en javascript, que se detallará más adelante.

Además, utiliza un sistema propio del framework utilizado, que permite redimensionar los bloques que componen la interfaz en función de la resolución del dispositivo utilizado, permitiendo que sea accesible y utilizable desde cualquier dispositivo.

Reactividad

La reactividad describe la desviación de un factor de multiplicación efectivo de la unidad. Para condiciones críticas, la reactividad es igual a cero. Cuanto mayor sea el valor absoluto de la reactividad en el núcleo del reactor, más alejado estará el reactor de la criticidad. La reactividad puede utilizarse como medida de la diferencia relativa de un reactor con respecto a la criticidad.

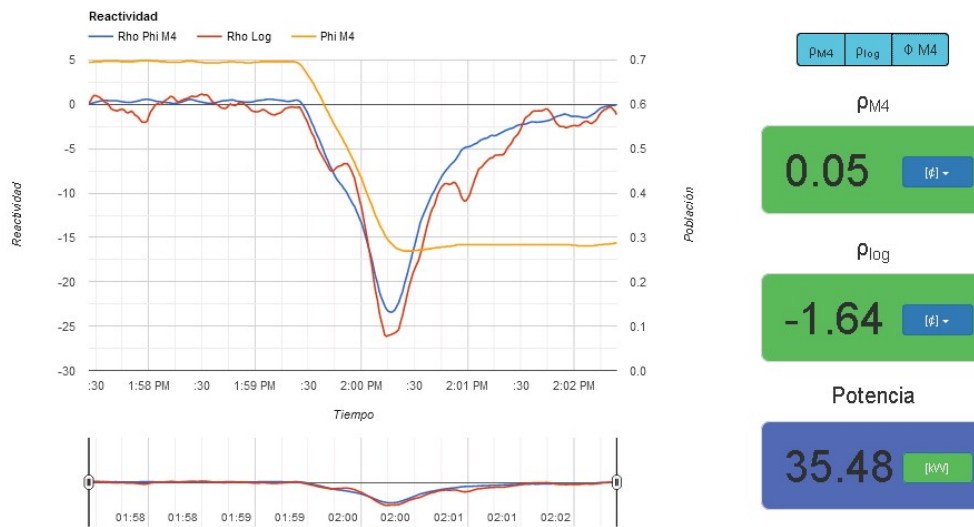


Figura 2.4: Página web asociada al reactímetro implementado en el RA6-ER.

Por último, se añadió la señal de reactividad en la página de “Señales”, que es utilizada para prácticas de operación del reactor, ya que es una variable de interés en la operación del mismo. El añadido se muestra en la figura 2.5, en la esquina superior derecha.

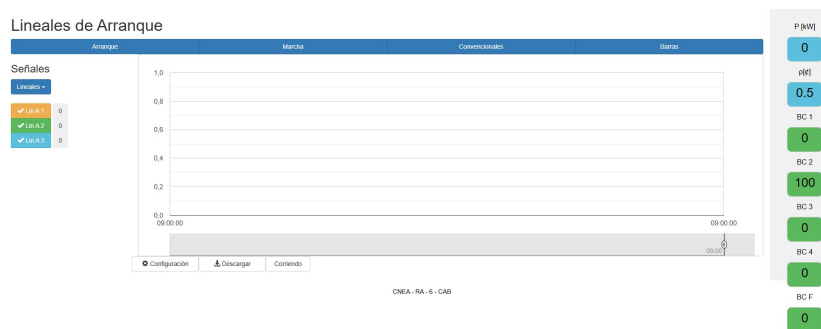


Figura 2.5: Señal de reactividad en la página de señales del sistema RA6-ER.

Back-End

A esta página web se le corresponde un archivo de javascript y php que se encargan de la actualización de los datos en tiempo real. En el primero, se redibuja el gráfico y se actualizan los valores en los indicadores, además de manejar la selección de unidades y señales. El segundo, se encarga de la lectura de la base de datos (específicamente la tabla “listado”) y la devolución de los datos en formato JSON.

La selección de unidades está programada de manera tal que al efectuar un cambio, todos los datos previos son llevados a esta unidad de manera coherente, y la escala del

gráfico es también redibujada en función de la nueva unidad. Esto lo hace una función, detallada en 2.1, que se ejecuta por medio de un `EventListener()`[15] de cada botón.

```
1 function unitsChange() {
2   var aux1, aux2;
3   if (prev_unit != sel_unit) {
4     for (var i = 0; i < data.getNumberOfRows(); i++) {
5       // getters
6       aux1 = data.getValue(i, 1);
7       aux2 = data.getValue(i, 2);
8       // paso de unidades
9       aux1 = aux1 * unit_mult[prev_unit] / unit_mult[sel_unit];
10      aux2 = aux2 * unit_mult[prev_unit] / unit_mult[sel_unit];
11      // setters
12      data.setValue(i, 1, aux1)
13      data.setValue(i, 2, aux2)
14    }
15    prev_unit = sel_unit;
16  }
17 }
```

Código 2.1: Función de cambio de unidades de reactividad escrita en JavaScript.

Los datos son obtenidos por medio de un script de php, que se encarga de leer la base de datos en SQL del sistema RA6-ER y devolver los datos en formato JSON, que es leído por el script de javascript. Este archivo se ejecuta cada 0.2 segundos (velocidad de escritura de base de datos), y se encarga de devolver los datos de reactividad, población y potencia, así como la fecha y hora de la última actualización de los mismos.

Estos datos son almacenados en buffer para mostrar en gráfico por un total de 5 minutos, y una vez alcanzado este tamaño se eliminan los datos más antiguos para dar lugar a los nuevos. Esto se realiza por medio de las líneas 2.2, que se ejecutan cada vez que se recibe un nuevo set de datos.

```
1 if (data.getNumberOfRows() >= 300) {
2   //Pop el primer elemento
3   data.removeRow(0);
4 }
```

Código 2.2: Función de buffer de datos escrita en JavaScript.

2.6. Resultados

En la figura 2.6 se muestra la evolución de la población a lo largo de toda la operación detallada en la sección anterior. En la misma, se observan intervalos de población constante, subidas y bajadas exponenciales, dientes de sierra rápidos y lentos.

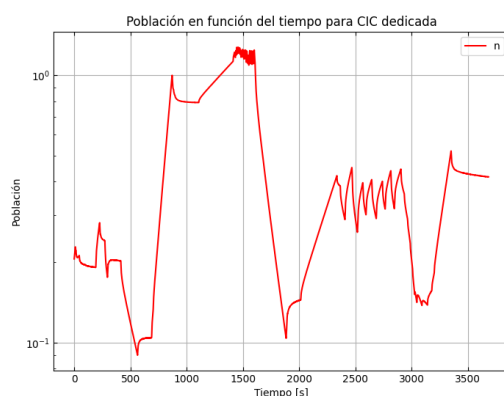


Figura 2.6: Evolución de la población neutrónica por la CIC en I7 en función del tiempo para la operación de calibración.

La reactividad correspondiente a esta evolución se muestra en la figura 2.7. En la misma, se observa la reactividad calculada por el algoritmo, en la señal de la CIC dedicada.

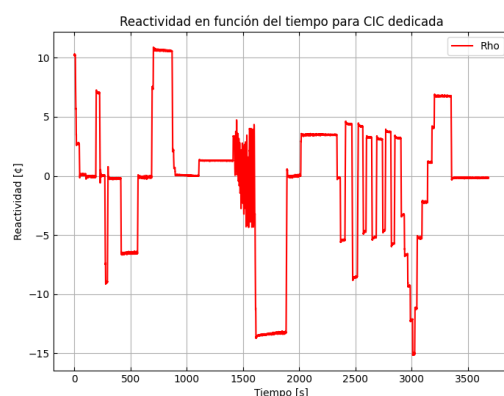


Figura 2.7: Evolución de la reactividad calculada en la señal obtenida por la CIC en I7 en función del tiempo para la operación de calibración.

Para la calibración, se toman intervalos de tiempo donde la reactividad permaneció constante. De esta manera, se definen seis intervalos para la calibración del reactímetro en $\Phi M4$ y ocho para el correspondiente a las señales logarítmicas de marcha. La diferencia en cantidad se debe a un cambio de escala en $\Phi M4$, que provocó una distorsión en el algoritmo de cálculo, problema que será comentado en el apartado 7.

Los resultados de las reactividades en estos intervalos se muestran en la figura 2.8, junto a un ajuste de los datos. En ambos casos, se observa una tendencia lineal entre las señales de reactividad del sistema RA6-ER y la señal de referencia de la CIC.

En cuanto a la figura 2.8b, el ajuste presentado reporta que la señal de reactividad logarítmica tiene una relación uno a uno con la referencia, a salvo de un offset levemente positivo, como se reporta en 2.8.

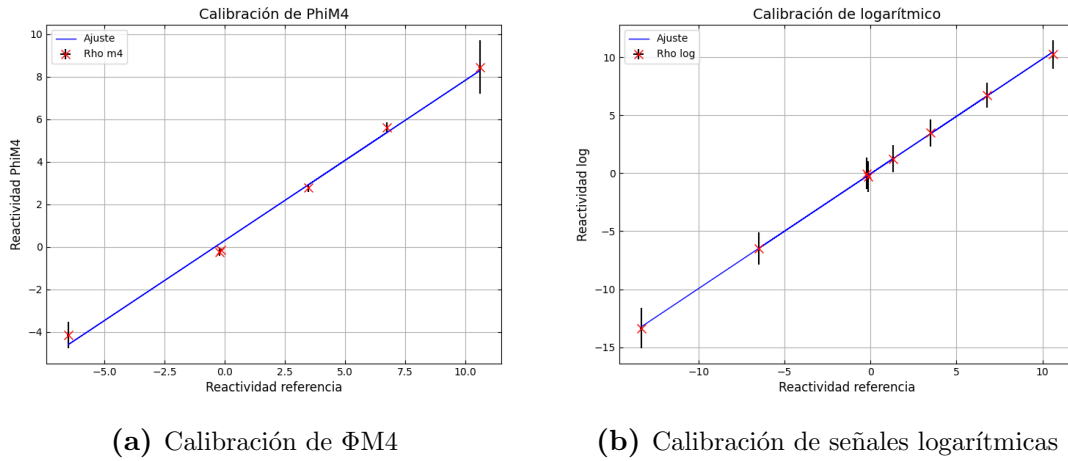


Figura 2.8: Calibración de las señales de población neutrónica.

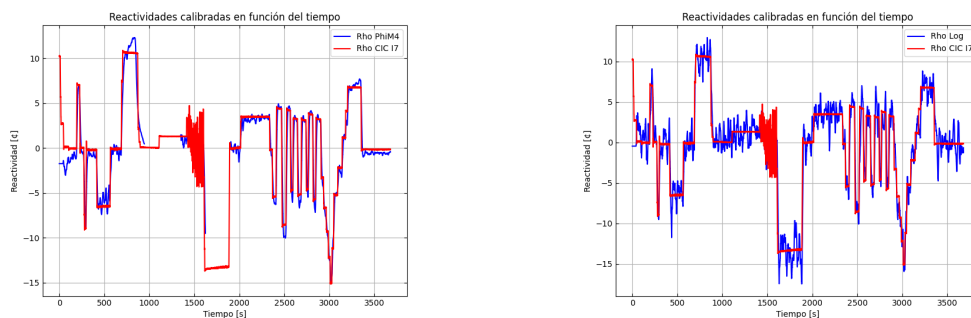
$$\rho = (1,01 \pm 0,01) \cdot \rho_{log} + (0,047 \pm 0,003)[\beta] \quad (2.8)$$

Por parte de la calibración de $\Phi M4$, presentada en la figura 2.8a, el ajuste presentado ya no es de pendiente unitaria, como se muestra en 2.9.

$$\rho = (1,33 \pm 0,05) \cdot \rho_{\Phi M4} + (-0,39 \pm 0,03)[\beta] \quad (2.9)$$

Esto puede deberse a no linealidades en alguna de las etapas de adquisición, ampliación, filtrado o escaleado de la señal de lineal de marcha 4, que no se presentan en las señales logarítmicas de marcha o en una menor medida.

Tomando estas calibraciones se grafica una comparación entre la reactividad correspondiente a la CIC dedicada y a la correspondiente por las señales logarítmicas y $\Phi M4$, en la figura 2.9.



(a) Comparación entre la reactividad de $\Phi M4$ y la de referencia en I7. (b) Comparación entre la reactividad de las señales logarítmicas y la de referencia en I7.

Figura 2.9: Comparaciones entre señales de reactividad y la referencia.

En estas figuras se puede observar el tiempo de reacción del algoritmo al utilizar las señales de población filtradas, siendo este de aproximadamente 20 segundos para

ambas reactividades. Gracias a esto, ninguna puede determinar la reactividad correspondiente al evento de diente de sierra rápido, pero si lo hacen en las versión lenta del mismo. En intervalos de reactividad constante, se observa que la reactividad logarítmica oscila alrededor de la referencia con una amplitud de 1.5 centavos, mientras que la correspondiente a $\Phi M4$ oscila con una amplitud de 0.5 centavos.

Finalmente, estos valores son los que se utilizan en el VI 2.2, para reportar el valor correcto de reactividad en las variables asignadas mencionadas anteriormente.

Capítulo 3

Práctica de determinación de caudal por Elemento Combustible

“Times change”

— Garrosh Hellscream

3.1. Introducción

El dummy caudalímetro es un dispositivo desarrollado y utilizado en el marco de la materia de Laboratorio II de la carrera de Ingeniería Nuclear. Este tiene como propósito facilitar la determinación de caudal de refrigeración circulante por un elemento combustible del reactor RA-6.

Descripción del dispositivo

El dispositivo se compone de un elemento combustible dummy, es decir, sin carga de material físil y un caudalímetro de turbina montado sobre su boquilla, como se muestra en la figura 3.1.

El caudalímetro se compone de una turbina con un imán adherido en uno de sus álabes, que por medio de un reed-switch [16] y un circuito eléctrico permiten generar un pulso por cada giro de la turbina. El mismo, se utiliza bajo la suposición de la linealidad entre el caudal circulante y la frecuencia de giro de la turbina.

El circuito eléctrico mencionado, se muestra en la figura 3.2 y se compone de una fuente de alimentación de 5V, un capacitor y una resistencia en paralelo, además del switch que es el encargado de cerrar el circuito.



Figura 3.1: Composición de sistemas del dummy caudalímetro.

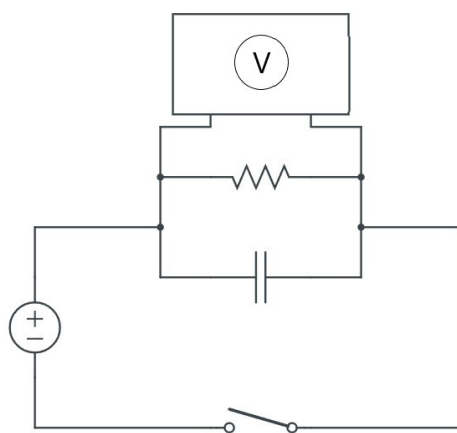


Figura 3.2: Circuito eléctrico que compone el caudalímetro de turbina utilizado.

Señal producida

En cada giro de la turbina, al cerrar el circuito eléctrico, se observa un pulso de +5V en la resistencia del circuito, señal que es utilizada para determinar el giro de la turbina y luego procesada para determinar su frecuencia. Al desconectarse el reed-switch, si no estuviese el capacitor generaría un arco entre sus contactos, reduciendo su vida útil. Por lo tanto, el capacitor se encarga de disminuir gradualmente la diferencia de potencial entre los polos del dispositivo, evitando el desgaste del reed-switch.

Este método tiene como resultado una señal eléctrica de flancos ascendentes con tensión de alimentación y colas exponenciales de decaimiento, como se muestra en la figura 3.3.

Para obtener la frecuencia de giro de la turbina se debe entonces determinar la frecuencia de la señal eléctrica producida por el circuito. Con este propósito se desarrollan dos métodos distintos pero basados en el mismo concepto, distinguir entre estados altos y bajos de la señal para calcular tiempo de giro y tomar su inversa para tener

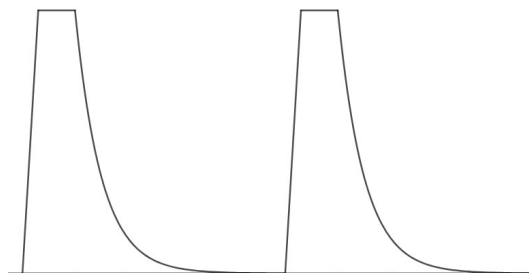


Figura 3.3: Señal eléctrica generada por el caudalímetro de turbina.

frecuencia. Este método tiene como limitación que no es sensible a cambios de caudal más rápidos que una vuelta de la turbina, y reportará una frecuencia media en ese período.

Las siguientes dos secciones describen los dos distintos usos que se le da al dummy en la práctica y detallan las condiciones de uso de cada uno de ellos.

Práctica de Laboratorio II

La práctica en la que interviene el dummy caudalímetro se divide en dos partes, una de calibración y otra de uso in-core.

En la primera parte, se calibra el caudalímetro para determinar la relación entre la frecuencia de giro de la turbina y el caudal circulante. En el apartado anterior se mencionó que se asume linealidad entre frecuencia de giro de la turbina y caudal circulante. Para verificar esta suposición se realiza una calibración del caudalímetro, que consiste en medir la frecuencia de giro de la turbina para distintos caudales circulantes y luego ajustar una recta a los datos obtenidos. La pendiente de esta recta es la constante de calibración del caudalímetro, que se utiliza para determinar el caudal circulante a partir de la frecuencia de giro de la turbina.

Estas mediciones se realizan fuera de las instalaciones del reactor, por lo que los desarrollos realizados en este trabajo se realizan de manera independiente al sistema RA-6 en red.

En la segunda parte, se procede a reemplazar un elemento combustible de la grilla por el dummy. De esta manera, utilizando el resultado de la calibración, se puede determinar el caudal circulante por el elemento combustible en condiciones de operación del reactor. Esta sección de la práctica será implementada en el sistema RA-6 en red, por lo que se deben desarrollar las conexiones necesarias así como el software que permita la adquisición y procesamiento de la señal eléctrica generada por el caudalímetro.

3.2. Desarrollo para la calibración

Adquisición y procesamiento de señal

Para la adquisición de la señal eléctrica generada por el circuito antes mencionado, se utiliza un arduino UNO [17], que se encarga de leer la señal y procesarla para determinar la frecuencia de giro de la turbina.

Para la determinación de frecuencia se utiliza el algoritmo detallado en A, del cual se muestra un extracto en 3.1.

```
1   if(sensorValue >= 800 && !estado && intercalar){
2       T=t_k-t_i;
3       t_i=t_k;
4       f=1000.0/T;
5       intercalar = 0;
6       Serial.print(t_k);
7       Serial.print("\t");
8       Serial.println(f, 6);
9   }
10  else if(sensorValue >= 800 && !estado && !intercalar){ //sirve para
11      first run
12      estado = 1;
13      if (f>0){
14          t_i =t_k; //tiempo de inicio del periodo (solo lo necesito una
15          vez)
16      }
17      intercalar = 1;
18  }
19  else if(sensorValue < 400 && estado){
20      estado = 0;
21  }
```

Código 3.1: Fragmento de algoritmo de cálculo de frecuencia de giro del caudalímetro de turbina ejecutado por el Arduino.

En el mismo, se utiliza una entrada analógica del arduino para leer la señal eléctrica, y se determina la frecuencia de giro de la turbina a partir de los tiempos entre flancos ascendentes de la señal.

El flanco ascendente se dispara cuando la señal supera un umbral determinado, y establece el estado *alto* de la señal, dando inicio al conteo. Luego, el estado *bajo* es declarado cuando la señal cae por debajo de un umbral inferior, y al detectar un nuevo flanco ascendente se reporta la frecuencia media de giro en ese período como la inversa del mismo, y se repite el ciclo.

La frecuencia se imprime en el puerto serie del arduino, acompañada de una referencia temporal relativa al arduino, para poder ser analizada posteriormente en una computadora.

Post procesamiento

Para leer la información brindada a través del puerto serie por el arduino, se utiliza el algoritmo de LabView proporcionado en 3.4, que se encarga de leer la información y graficar la frecuencia de giro de la turbina en función del tiempo de una manera amigable para el usuario.

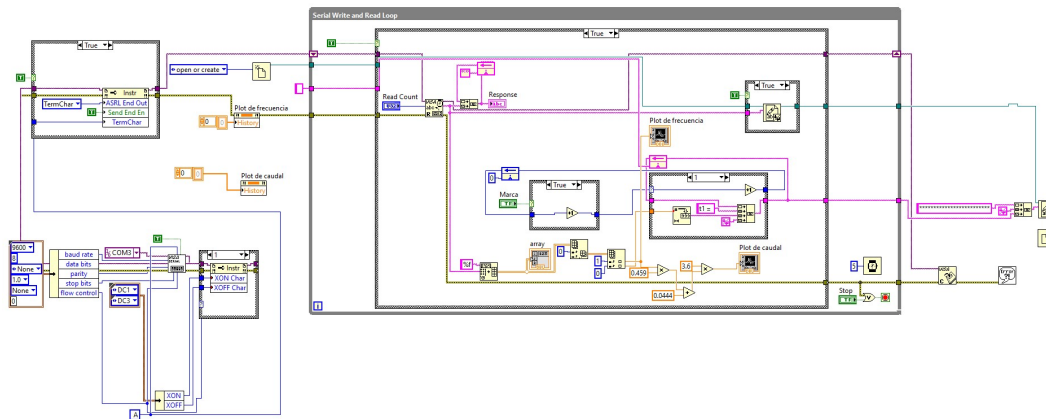


Figura 3.4: Diagrama de bloques de LabView para el post procesamiento de la señal del caudalímetro.

En el mismo, se observa en la izquierda todos los bloques asociados a la configuración y lectura del puerto serie, que posteriormente a establecer la conexión con el arduino, se procede a crear un archivo de texto donde se almacenarán todos los datos obtenidos de frecuencia con su correspondiente estampa de tiempo.

Además, se implementa un botón interactivo que permite al usuario capturar un dos instantes de tiempo, que son vitales para el desarrollo de la calibración del caudalímetro, ya que estos permiten por la disposición experimental de la práctica determinar el caudal medio circulante por el dummy.

En la figura 3.5 se muestra el panel frontal de la aplicación de LabView desarrollada para la calibración del caudalímetro. En el mismo se observa el gráfico de frecuencia en función del tiempo, y los botones de control para la captura de los instantes de tiempo mencionados anteriormente, además de un botón de parada de la adquisición de datos.

Este desarrollo en LabView quedará disponible para utilización en el marco de la materia de Laboratorio II de la carrera de Ingeniería Nuclear a través de un archivo ejecutable, que solo requiere tener instalado el LabView Runtime Engine [18]

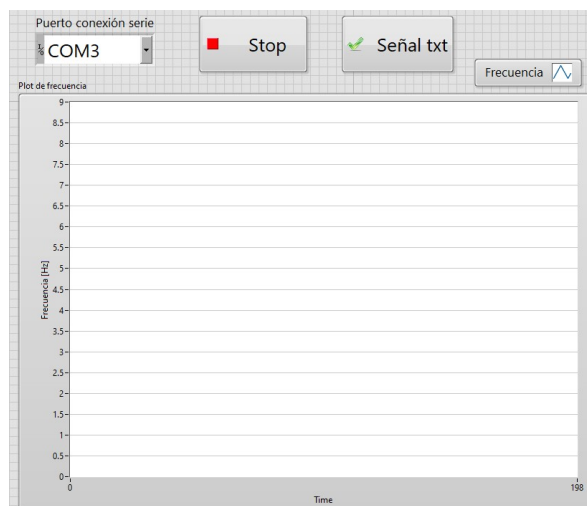


Figura 3.5: Panel frontal de la aplicación de LabView desarrollada para la calibración del caudalímetro.

3.3. Desarrollo para la práctica in-core

Adquisición

Para la adquisición de la señal generada por el circuito eléctrico que compone al dummy, se utiliza un cableado existente disponible desde boca de tanque del reactor hasta la bornera de conexiones para el CompactRIO [4]. Además, el circuito eléctrico es alimentado por una fuente de +5V presente en esa misma bornera.

Se utiliza la entrada número 19 del segundo módulo NI9403[6] del CompactRIO del sistema RA6-ER. Esta entrada es una entrada digital, y se encarga de leer el estado alto o bajo de la señal eléctrica generada por el caudalímetro.

Para la lectura de la entrada se reprogramó el circuito de FPGA del CompactRIO utilizando el compilador de FPGA de LabView, algoritmo que se muestra en B. En el mismo, se agregó la lectura de la entrada número 19 como parte de la cola de adquisición de señales digitales del sistema RA6-ER[4].

Procesamiento

Para el procesamiento se desarrolló un VI mostrado en la figura 3.6, que se encarga de leer la señal digital generada por el caudalímetro y procesarla para determinar la frecuencia de giro de la turbina.

Este VI tiene como entrada la señal digital generada por el caudalímetro, y realizando comparaciones entre estado anterior y actual de la misma determina el flanco ascendente producido por el paso del imán por el reed-switch. En ese momento, almacena el valor del tiempo actual, y al llegar el siguiente flanco calcula el tiempo entre ellos.

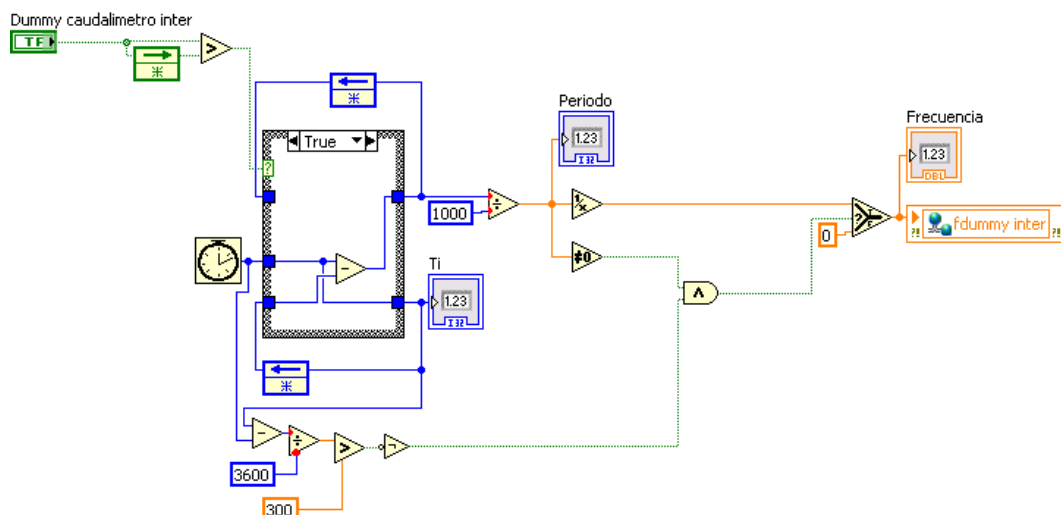


Figura 3.6: Diagrama de bloques de LabView para el procesamiento de la señal del caudalímetro en el sistema RA6-ER.

Luego, invirtiendo los intervalos temporales se consigue calcular la frecuencia de giro de la turbina, que es publicada en la variable “fdummy inter”, interna del CompactRIO.

Además, se implementa un control de división por cero, para no tener que manejar errores a posteriori.

Este VI es luego ejecutado por el loop “procesaDigitales” [4], que itera sobre la cola generada por el FPGA, sin perder ningún cambio de ninguna variable. Esto resulta vital para el cálculo de frecuencia del caudalímetro, ya que si fuese invocado por el loop donde se encuentra el reactímetro, se perderían la mayoría de los flancos ascendentes, ya que sería llamado una vez cada 70 ms.

El fragmento de código se muestra en la figura 3.7 bajo el case 1049.

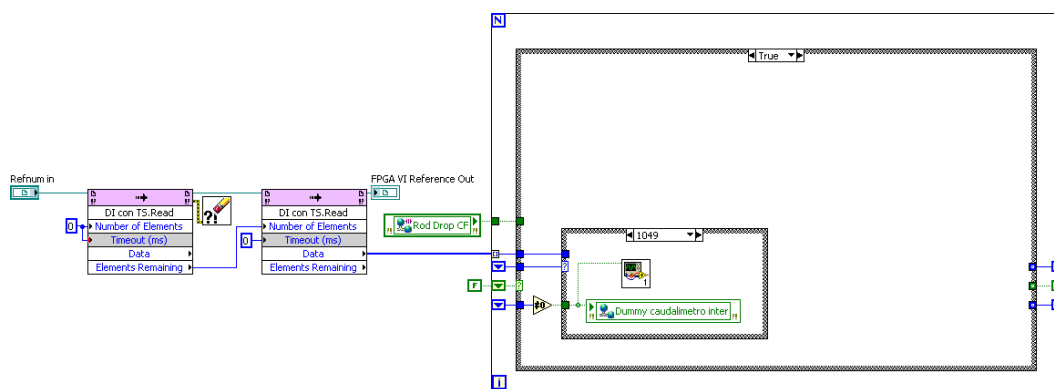


Figura 3.7: Fragmento de código de LabView para el procesamiento de la señal del caudalímetro en el sistema RA6-ER.

De manera análoga a como se realizó con las variables del reactímetro, la variable “fdummy inter” es copiada por la variable “fdummy” del servidor, que es la que será publicada en la base de datos para luego ser leída por la página web.

Dado que este algoritmo será utilizado una vez al año, en el contexto de la práctica

de Laboratorio II, se agregó en la parte inferior del código mostrado en 3.6 un sistema que evalúa la última vez que se detectó un flanco, y si esto ocurrió hace más de cinco minutos, la variable de frecuencia se escribirá en cero. Esto evita una posible escritura continua de la base de datos, haciendo un uso más eficiente de la misma.

3.4. Página Web

Se desarrolló una página web para la visualización de los datos obtenidos por el dummy caudalímetro. La misma se encuentra alojada en el servidor del sistema RA6-ER, y es accesible a través de la red local del mismo.

Front-End

En la figura 3.8 se muestra la página web desarrollada para la visualización de los datos obtenidos por el dummy caudalímetro.

Caudal EC dummy

La frecuencia de giro de la turbina del elemento combustible dummy es lineal (en cierto rango) con el caudal del mismo. El grafico muestra solo un minuto de historia y se actualiza con un periodo de 200ms. Para grabar y descargar un archivo, primero presionar para grabar y luego para dejar de grabar. Se abra la ventana de descarga de archivos donde por default tendra como nombre la hora de finalizacion de grabado en formato HH_MM_SS.

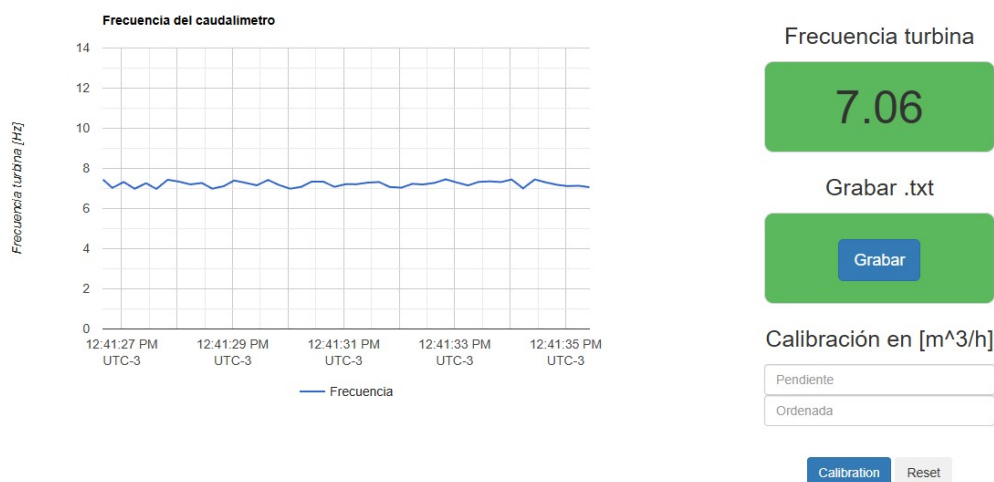


Figura 3.8: Página web para la visualización de los datos del dummy caudalímetro.

En la misma, se pueden observar múltiples elementos que permiten al usuario tener interacción con la práctica.

Primeramente, se grafica en función del tiempo la frecuencia de giro de la turbina, actualizada en tiempo real con la frecuencia de escritura de la base de datos del sistema RA6-ER. Esto no supone el problema antes mencionado de pérdida de datos debido a que el reporte en frecuencia siempre se encuentra actualizado, debido al lugar donde fue invocado el VI 3.6.

Debido a que el gráfico utilizado puede no ser claro del valor puntual de la frecuencia, también se implementa un visor que muestra el último valor de frecuencia con 2 cifras significativas.

Por otro lado, se implementa un algoritmo de generación de archivos, que consta de un botón que al ser presionado por primera vez comienza a guardar los datos de manera local en la memoria del dispositivo del usuario, y al ser presionado por segunda vez escribe un archivo de texto con toda esta información. Este archivo de texto finalmente es guardado en las descargas del usuario con un nombre de archivo predeterminado que indica la fecha y la hora de generación. Esto es así para evitar sobre escritura de archivos.

Finalmente, se deja un espacio para escribir una posible calibración en caso de que el usuario tenga una, y esto provoca que los reportes de la web sean en caudal por elemento combustible en lugar de frecuencia de giro de la turbina. En caso de establecer una calibración, se aplicará a los datos que ya son mostrados y a los que se muestren en el futuro. Además, aplicar una calibración cambiará el nombre del gráfico así como el eje vertical del mismo.

Al presionar el botón de reset, se borra la calibración establecida y se vuelve a la visualización de frecuencia de giro de la turbina, cambiando nuevamente el nombre del gráfico y el eje vertical del mismo.

Back-End

La lectura de base de datos se realiza de la misma manera que en el reactímetro, a través de un script de php que entrega en formato JSON los datos de frecuencia de giro del caudalímetro y el tiempo local del servidor. Este script es invocado por el javascript de la página, con un período de 200 ms, el mismo que el de escritura de base de datos.

Algunos de los algoritmos que resultan de interés y serán mostrados en este apartado se encuentran simplificados en formato de pseudo código, por cuestiones de espacio y facilidad para la lectura. Las versiones completas se encuentran en el apéndice C

En este caso en particular se encuentran dos algoritmos específicos de la página web, uno que se encarga de la generación de archivos de texto y otro que se encarga de la calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro, como fue mencionado anteriormente.

El primero, se muestra en el pseudocódigo 3.2 y se encarga de la generación de archivos de texto con los datos de frecuencia de giro del caudalímetro, sin importar si se utilizó una calibración o no.

```
1 function handleButtonClick() {
2     obtener_id_boton();
3     if (!isRecording) {
4         // Set modo grabacion
```

```

5     isRecording = true;
6     cambiarTextoBoton('Stop recording');
7   } else {
8     // unset de modo grabacion
9     isRecording = false;
10    cambiarTextoBoton('Grabar');
11    // Generar txt con datos
12    genTXT(data_txt);
13    // Limpiar el arreglo de datos
14    data_txt = [];
15  }
16 }

```

Código 3.2: Algoritmo de generación de archivos de texto escrito en JavaScript con los datos de frecuencia de giro del caudalímetro, versión completa en [C.1](#).

En esta función *handleButtonClick()* se realizan varias acciones que dan inicio y fin a la generación del archivo de texto. En primera instancia, se establece el modo grabación y se cambia el texto del botón a "Stop Recording". Al presionar nuevamente, el texto del botón vuelve a su estado original, se crea el archivo de texto y se importan a él todos los datos de frecuencia de giro del caudalímetro. Finalmente, se descarga el archivo y se limpia el arreglo de datos.

Esta función por sí sola no almacena los datos en el array *data_txt*, propósito que tiene la función *recordData()*, mostrada en el código [3.3](#), que es invocada por el loop de lectura de base de datos si el modo grabación se encuentra activado (variable *isRecording*).

```

1 function recordData(timestamp, f) {
2   if (isRecording) {
3     tmp = timestamp.getTime()/1000;
4     data_txt.push(`${tmp},${f}`);
5   }
6 }

```

Código 3.3: Algoritmo de almacenamiento de datos de frecuencia de giro del caudalímetro escrito en JavaScript.

Además, se convierte el formato de tiempo a segundos, lo que facilita la lectura para posterior procesamiento de parte del usuario.

Por otro lado, el algoritmo de calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro se compone de dos funciones, una que establece la calibración y otra que la elimina. En el pseudocódigo [3.4](#) se muestra la función que establece la calibración, que se activa al presionar el botón de calibración.

```

1 function calibrator() {
2   obtener_id_boton();
3   if (input1 != ''){

```

```

4     prev_cal = cal;
5     cal = [float(input1), float(input2)];
6     if (cal[0] != 0){
7         if (isNaN(cal[1])){
8             cal[1] = 0;
9         }
10    }
11    unitsChange();
12    prev_cal = cal;
13    setGraphOptions('Caudal');
14    redibujar();
15 }
16 }

```

Código 3.4: Algoritmo de calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro escrito en JavaScript.

En la misma, se captura desde los espacios de introducción numérica los valores de calibración, y se los almacena para su posterior uso. Se llama a la función *unitsChange()*, mostrada en C.3, para afectar a todos los datos almacenados en memoria con la calibración establecida. Además, se cambia el nombre del gráfico y el eje vertical del mismo, y se deshabilita el botón de calibración por un segundo para evitar errores.

La función *unitsChange()* fue diseñada con la mayor generalidad posible, intentando que siempre se pueda utilizar para cambiar las unidades de los datos almacenados en memoria. Para lograr esto, se utilizan los datos de calibración anterior y actual, y se aplica la transformación lineal mostrada en 3.1 correspondiente a los datos almacenados en memoria.

$$y_{new} = \left(\frac{y_{old} - b_{old}}{m_{old}} \right) \cdot m_{new} + b_{new} \quad (3.1)$$

Las constantes mencionadas *m* y *b* refieren a pendientes y ordenadas al origen, respectivamente. De esta manera, se puede cambiar desde frecuencia a caudal y viceversa, o entre calibraciones distintas, utilizando la misma función y los mismos datos almacenados en memoria.

Finalmente, en el código 3.5 se muestra la función que elimina la calibración, que se activa al presionar el botón de reset. La misma se encarga de restablecer los datos almacenados en memoria a unidades de frecuencia y de cambiar el nombre del gráfico y el eje vertical del mismo. Esto, lo hace utilizando nuevamente la función de cambio de unidades pero estableciendo una nueva calibración de pendiente 1 y ordenada 0.

```

1 function reset () {
2     obtener_id_boton();
3     input1 = '';
4     input2 = '';
5     cal_slope = 1;

```

```
6   cal_offset = 0;
7   unitsChange();
8   setGraphOptions('Frecuencia');
9   redibujar();
10 }
```

Código 3.5: Algoritmo de eliminación de la calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro escrito en JavaScript.

Todos los algoritmos mencionados anteriormente se encuentran completamente detallados de la manera que están implementados en el servidor en el apéndice C.

3.5. Resultados

Los desarrollos hechos para la calibración del dummy caudalímetro fueron utilizados en la práctica de Laboratorio II de la carrera de Ingeniería Nuclear del año 2024, y se obtuvieron resultados satisfactorios. Se logró determinar la relación entre la frecuencia de giro de la turbina y el caudal circulante, y se obtuvo una recta de calibración que permitió determinar el caudal circulante a partir de la frecuencia de giro de la turbina, ambos resultados se muestran en la figura 3.9[1].

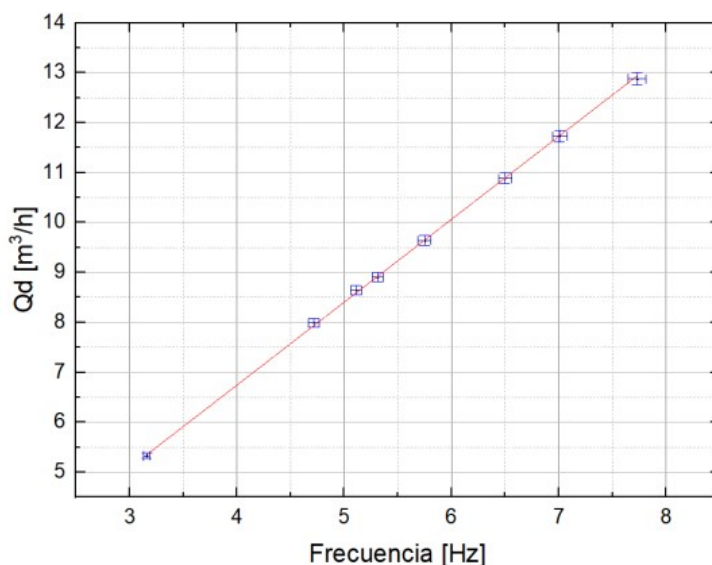


Figura 3.9: Datos y calibración del caudalímetro de turbina resultantes de práctica de Laboratorio II [1].

Por parte del desarrollo web, los desarrollos realizados se encuentran disponibles en el servidor del sistema RA6-ER para ser utilizados en futuras prácticas de Laboratorio II.

El sistema de adquisición y publicación de datos del dummy caudalímetro fue testeado de manera manual sin insertar el dummy en el reactor, arrojando resultados satisfactorios.

Capítulo 4

Práctica de Coastdown

“Drink, Hellscream, claim your destiny”

— Gul’Dan

4.1. Introducción

Otra práctica no implementada en el sistema RA6-ER es la práctica de Coastdown de bomba de primario. La misma consiste en realizar apagados intencionales de la bomba del circuito primario del reactor RA6 con fines de sacar conclusiones sobre la inercia del sistema y el accionamiento del sistema de protección del reactor ante la ocurrencia de este evento. Esta práctica se realiza sin potencia de núcleo.

Medición de caudal de primario

Para la determinación del caudal de circulación en el circuito primario de refrigeración en el reactor RA-6 se utiliza una placa orificio ubicada en la tubería de salida de la bomba de circulación. Esta produce una caída de presión aguas abajo que se relaciona de manera cuadrática con el caudal circulante.

Esta caída de presión es medida con tres redundancias de DP-Cell FoxBoro E13DM, mostradas en la figura 4.1a, que se encuentran filtradas por tres manifolds M6AVS-4, mostrados en 4.1b. Esas tres redundancias tienen como salida una señal de 4-20 mA que alimentan las señales FP_i .



(a) DP-Cell FoxBoro E13DM



(b) Manifolds M6AVS-4

Figura 4.1: Elementos de medición y filtrado de caudal primario.

SPR y Umbral de disparo

El sistema de protección del reactor (a partir de ahora SPR) del RA-6 utiliza las señales de caudal primario para la lógica de SCRAM del reactor cuando este se opera en circulación forzada. Las señales disparan el SPR utilizando una lógica 2oo3, a través de un umbral mínimo del 10 %. Es decir, si dos de tres señales de caudal se encuentran al 90 % del valor nominal, se demandará SCRAM.

Práctica de Laboratorio II

La práctica tiene como objetivo analizar la función de seguridad del Sistema de Instrumentación para la medición de caudal primario del RA6 y caracterizar la respuesta de este Canal de Activación del Sistema de Protección ante el evento de pérdida de caudal por falla de la bomba de primario.

Para ello, se debe adquirir la señal de caída de presión en la placa orificio, permitir al usuario una manera fácil de apagar la bomba, adquirir la señal de apagado y la señal bajo caudal.

Para poder adquirir la señal que dispara por bajo caudal, se accionan los manifolds en distintas condiciones permitiendo que uno quede a presión atmosférica y el otro a presión de trabajo. De esta manera, la redundancia restante es la que medirá la caída de presión y se podrá medir su umbral de disparo.

4.2. Estado actual y limitaciones

La señal de la DP-Cell de 4-20mA se encuentra con un offset de tensión de +13V, por lo que se utiliza un amplificador de instrumentación para llevarla a un rango de

0-5V. El mismo se muestra en la figura 4.2.

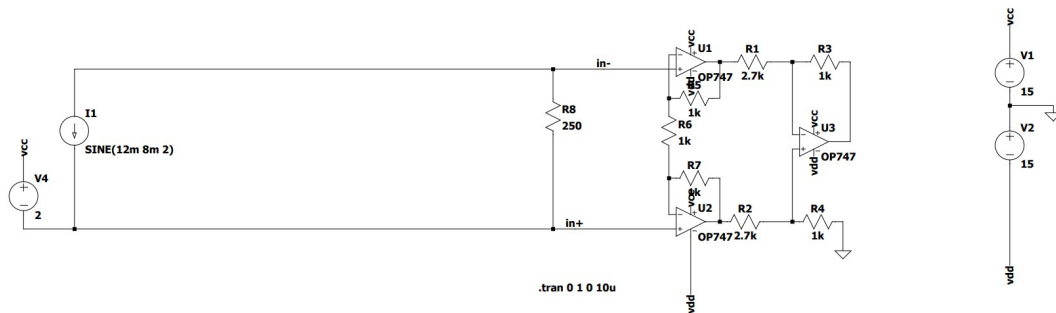


Figura 4.2: Circuito eléctrico del amplificador de instrumentación utilizado en la práctica de Coastdown.

Este circuito acompañado de un interruptor que permite el apagado de la bomba y la adquisición de la señal de bajo caudal componen un circuito que permite la adquisición de datos de la práctica. Este circuito tiene una salida digital y una analógica que son leídas por un arduino y a través del puerto serie del mismo comunica estos datos a una PC. El esquema completo se muestra en la figura 4.3.

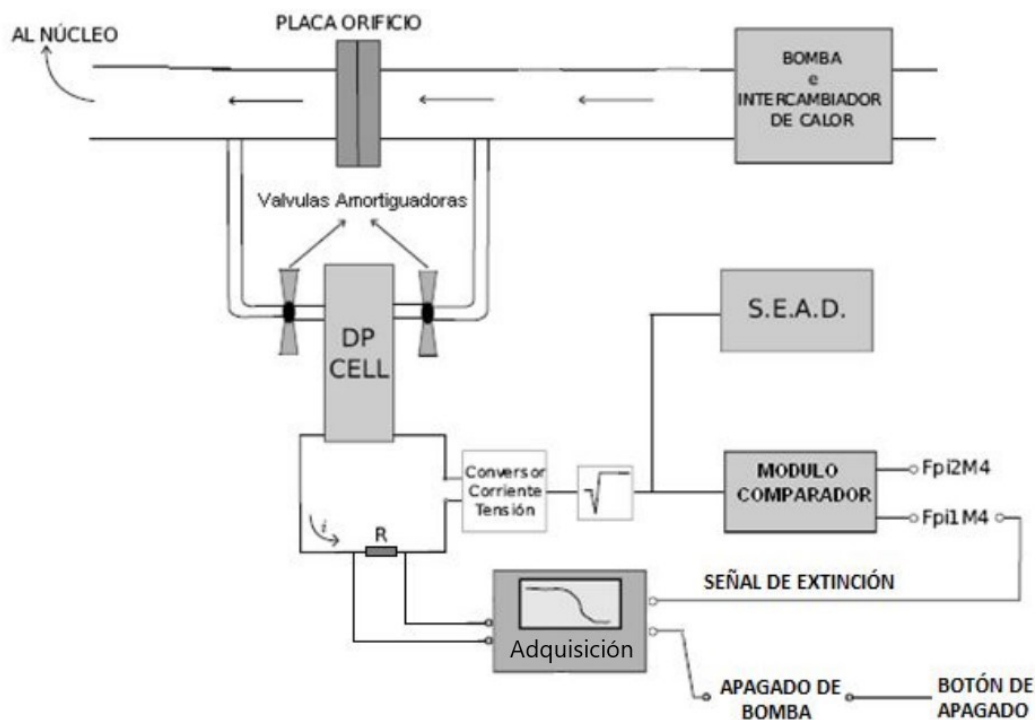


Figura 4.3: Esquema de adquisición de datos de la práctica de Coastdown.

Actualmente no se cuenta con una señal de bomba prendida o apagada sin delays en sala de control que permita la sincronización de la adquisición de datos con el apagado de la bomba. Es por esto que la señal de apagado es, en realidad, la orden de apagado de bomba. Para poder manejar esto usando una sola señal digital, mientras la bomba

se encuentra en funcionamiento la lógica del circuito impone un 0 lógico en su salida. Cuando se acciona el interruptor, este puentea la señal de bajo caudal a la salida del circuito, que mientras se encuentra dentro de rango tiene un 1 lógico. Al descender el caudal y llegar al umbral, la señal de bajo caudal pasa a 0 lógico. Esto genera una señal digital que se encuentra en 1 mientras la bomba está apagada pero el caudal es suficiente, y en 0 en el resto de estados.

4.3. Implementación en RA6-ER

Cableado de entradas

Para adquirir las señales listadas en el apartado anterior (una analógica y otra digital) se cablearon las entradas del CompactRIO de la siguiente manera:

- Para la señal digital, se utiliza la entrada número 20 del segundo módulo 9403 del CompactRIO.
- Para la señal analógica, se utiliza la entrada número 16 del segundo módulo 9205 del CompactRIO [5].

Se intentó utilizar las entradas del CompactRIO en modo diferencial para independizar la práctica del amplificador de instrumentación, pero las mismas no poseen alta impedancia de entrada y esto no se llevo a cabo.

Algoritmo de adquisición

A nivel LabView no se requiere de un algoritmo de adquisición complejo, ya que la naturaleza de los datos es relativamente sencilla.

En primera instancia, para la adquisición de la señal digital se agrega un fragmento de código en el algoritmo de FPGA del sistema para leer entradas digitales, tal como fue hecho en 3.3 para la adquisición de la señal del dummy. Este fragmento también se encuentra en B.

A diferencia de lo realizado para el dummy, en este caso se vuelve relevante la sincronización de la señal digital con la analógica. Para esto se registran los tiempos donde se encuentran flancos en la señal digital. Esto se realiza agregando un nuevo case en el VI llamado “procesaDigitales” [4], que itera sobre la cola generada por la lectura de entradas digitales. El case agregado se muestra en 4.4.

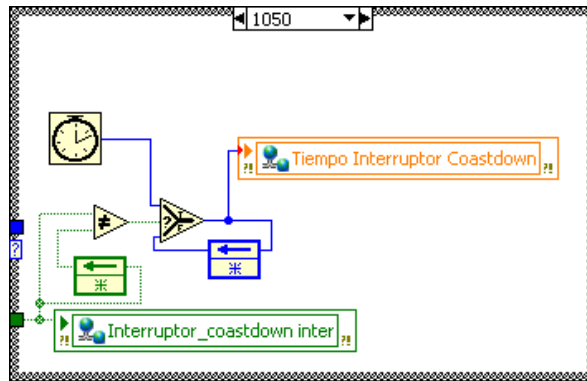


Figura 4.4: Algoritmo de adquisición de la señal digital en la práctica de Coastdown.

Para la adquisición de la señal de caudal se puede utilizar el *aliasing* de las variables para copiar la entrada analógica. Esto si bien es posible, generaría un uso innecesario de espacio en la base de datos, ya que esta señal no es de relevancia para el resto de usos del RA6-ER, por lo que se diseñó el algoritmo mostrado en 4.5 para evitar la sobre escritura de base de datos.

Para obtener la señal de caudal a partir de la diferencia de presión en la placa orificio, se toma raíz cuadrada de la señal de caída de presión en la placa orificio y se impone un *ansatz* de calibración para que represente el caudal del circuito primario. Esto se realiza a través de un algoritmo de LabView que se muestra en la figura 4.5. Es importante recalcar que la calibración utilizada es solo para reconocer el buen funcionamiento del sistema y no para obtener valores absolutos de caudal. Estos, deben ser obtenidos a través del SEAD del reactor RA-6. Además, la ejecución de este VI brinda sincronismo con la señal digital, ya que por como fue programado ambas estampas de tiempo tienen el mismo cero.

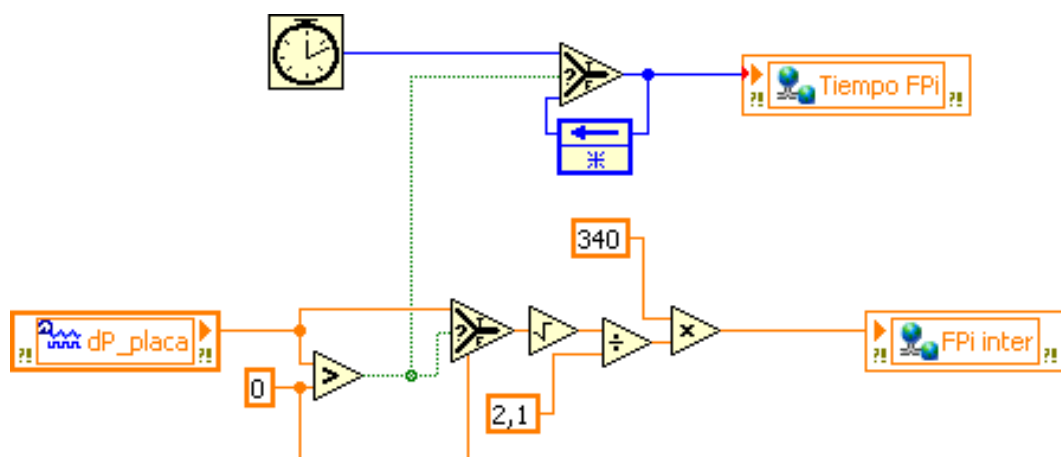


Figura 4.5: Algoritmo de calibración y escritura de caudal de la práctica de Coastdown.

Este algoritmo es invocado por el “Loop determinista” [4] del sistema, que es ejecutado cada 70 ms.

Luego, todas las variables locales del CompactRIO son copiadas por las variables del

servidor a través del aliasing de variables. Nuevamente, a través del script de “Escribe SQL” son finalmente almacenadas en base de datos.

4.4. Página Web

Se desarrolló una página web que permite la visualización de la curva de coastdown de bomba de primario, así como los eventos relevantes a ella. La página web se encuentra en el servidor del RA6-ER y es accesible desde cualquier dispositivo conectado a internet.

Front-End

En la figura 4.6 se muestra la interfaz de usuario de la página desarrollada para la práctica de coastdown de bomba de primario.



Figura 4.6: Interfaz de usuario de la página web de la práctica de Coastdown.

En ella, se puede observar un elemento gráfico demostrativo del caudal de circulación en el circuito primario del reactor RA6 de acuerdo a la redundancia elegida. Además, al igual que en el dummy caudalímetro, se implementa un visor del último dato entrante para poder tener una referencia visual rápida del caudal nominal circulante.

Se muestran además los estados de bomba y de señal fuera de rango relevantes para la práctica, obtenidos a través de un algoritmo explicado en la siguiente sección. Los mismos se muestran en forma de texto y color lo suficientemente claros para que el usuario pueda identificar claramente los estados del reactor.

Finalmente, de la misma manera que en el dummy caudalímetro, se implementa una sección de generación de archivos, que permite descargar toda la información relevante de la práctica.

Back-End

Al igual que en los dos capítulos anteriores, se desarrolló un back-end conjunto entre JavaScript y PHP para la lectura de base de datos y posterior envío a la página web. Para la adquisición de datos, se utiliza un algoritmo en PHP que lee la tabla instantánea de la base de datos “listado”, con un período de 200 ms.

El algoritmo de generación y descarga de archivos es el mismo que se encuentra en versión pseudo en el código 3.2 y en su versión completa en el apéndice C, a excepción de una línea extra que permite la escritura de los tiempos de apagado de bomba y de salida de rango del caudal en el archivo. Esta línea de código añadida se muestra en el código 4.1.

```
1 data_txt.unshift('Apagado bomba: ${txt_bomba}', 'Disparo bajo caudal: ${txt_caudal}');
```

Código 4.1: Línea de código añadida para la generación de archivos en la práctica de Coastdown.

El otro algoritmo de interés en este capítulo es el que permite procesar la señal digital y determinar los estados de bomba y de señal fuera de rango. Este algoritmo se muestra en el código 4.2 y forma parte del script perteneciente a la actualización de variables de la página.

```
1 if (interruptor != interruptor_anterior){
2     interruptor_anterior = interruptor;
3     tiempo_cambio = infophp[2];
4     if (interruptor == 1){
5         bomba_funcionando = false;
6         txt_bomba = tiempo_cambio;
7         disparo_bajoQ = false;
8     }
9     else if (interruptor == 0){
10        disparo_bajoQ = true;
11        txt_caudal = tiempo_cambio;
12    }
13 }
14 if (Q > 330 && disparo_bajoQ){
15     disparo_bajoQ = false;
16     bomba_funcionando = true;
17 }
```

Código 4.2: Algoritmo de procesamiento de señal digital en la práctica de Coastdown escrito en JavaScript.

En este código, se identifican los flancos de la señal en la sentencia condicional del inicio, y dependiendo del estado anterior y el actual se identifican tres comportamientos posibles:

- Si el interruptor pasó a tener un 1 lógico, la bomba se apagó.
- Si el interruptor pasó de un 1 a un 0 lógico, al estar la bomba apagada el caudal cayó por debajo del umbral de disparo.
- Si el caudal está a valor nominal y se encuentra en estado de disparo por bajo caudal, entonces la bomba se encuentra funcionando.

Al correr esto en cada iteración del script, se mantienen actualizadas en tiempo real las variables que indican los estados de funcionamiento de bomba y de caudal dentro del umbral, lo que al ejecutarse la función mostrada en el código 4.3 permite a la página web modificar visualmente los contenedores de indicación de estado.

```
1 function changeStates(){
2     if (bomba_funcionando){
3         $('#boolBomba').text('Encendida');
4         document.getElementById('divBoolBomba').style.
backgroundColor = '#5cb85c'; //color verde
5     }
6     else{
7         $('#boolBomba').text('Apagada');
8         document.getElementById('divBoolBomba').style.
backgroundColor = 'red';
9     }
10    if (disparo_bajoQ){
11        $('#boolCaudal').text('Disparado');
12        document.getElementById('divBoolCaudal').style.
backgroundColor = 'red';
13    }
14    else{
15        $('#boolCaudal').text('No Disparado');
16        document.getElementById('divBoolCaudal').style.
backgroundColor = '#5cb85c'; //color verde
17    }
18 }
```

Código 4.3: Algoritmo de actualización de variables en la práctica de Coastdown escrito en JavaScript.

Capítulo 5

Potencia

“I guess... I’m afraid”

— Arthur Morgan

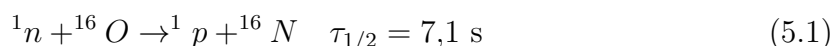
5.1. Introducción

Actualmente en el RA-6 la única señal calibrada proporcional a la potencia térmica que se tiene es la medición del decaimiento del nitrógeno 16 en el tanque de decaimiento. Esto, como se explicará en el apartado próximo, solo es útil en un modo de operación del reactor y a partir de cierto nivel. Para solventar esto, se propone utilizar una calibración para las señales neutrónicas de marcha que permita obtener una estimación de la potencia térmica.

En el RA6-ER, esta señal no es adquirida por lo que no existe ninguna referencia de potencia para el reactor en la web.

Nitrógeno 16

En los reactores nucleares refrigerados por agua tiene lugar una reacción nuclear del tipo (n, p) en la que un neutrón es absorbido por un núcleo de oxígeno-16, formando un núcleo de nitrógeno-16 y liberando un protón, como se muestra en 5.1. El nitrógeno-16 es un isótopo radiactivo con un tiempo de vida de 7.13 segundos.



Dado que la tasa de generación de nitrógeno 16 es directamente dependiente del flujo de neutrones en el reactor, la concentración de esta especie entonces será lineal con la potencia térmica del reactor. En caso de poder medirla y tener una calibración adecuada, se podría tener una referencia de potencia en el reactor.

Dado que en el reactor RA-6 las tuberías del circuito primario se encuentran al descubierto en la sala de máquinas, en pos de hacer este lugar habitable en cuanto a dosis se refiere, se coloca un tanque de decaimiento que permite que el nitrógeno decaiga lo suficiente (cerca de 10 vidas medias) antes de avanzar por las tuberías. Dicho sistema se muestra en la figura 5.1.

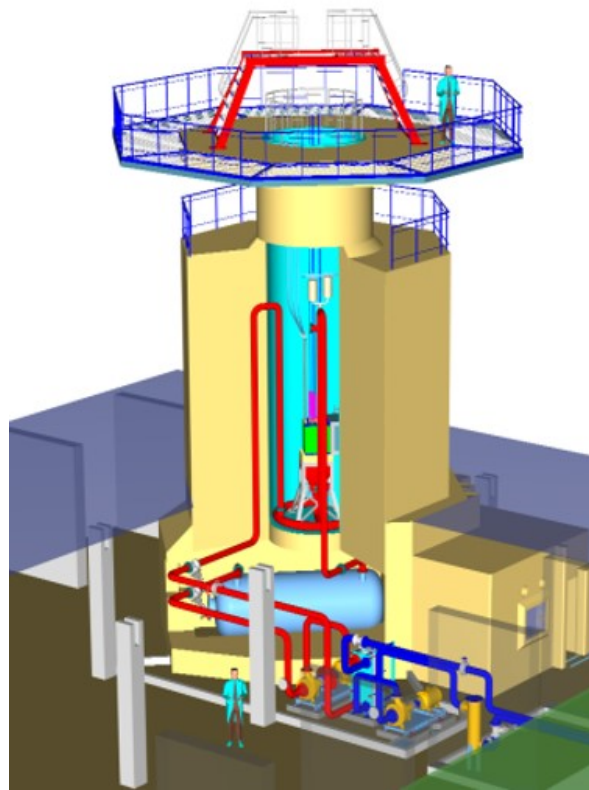


Figura 5.1: Tanque de decaimiento de nitrógeno 16

Ya que este sistema existe por el requerimiento de dosis en sala de máquinas, se puede aprovechar para medir el decaimiento de Nitrógeno 16 en la entrada del tanque utilizando un detector centellador. Este detector tiene como salida una señal en corriente de entre 0 y 4 nA, con el valor máximo correspondiente a 1MW de potencia térmica.

Dado que este sistema solo tiene sentido cuando el reactor se opera en circulación forzada, esta referencia solo se encuentra disponible para dicho modo de operación. Además, por cuestiones de precisión y rango, solo se puede dar crédito a esta señal a partir de 100kW, que corresponde a una corriente de 0.4nA del detector.

Señales de Marcha

El reactor RA-6 cuenta con cuatro señales de marcha, provenientes de cámaras de ionización compensadas[19] ubicadas como se muestra en 5.2, tres de las cuales forman parte del sistema de protección del reactor y la última es una señal lineal para el piloto automático.

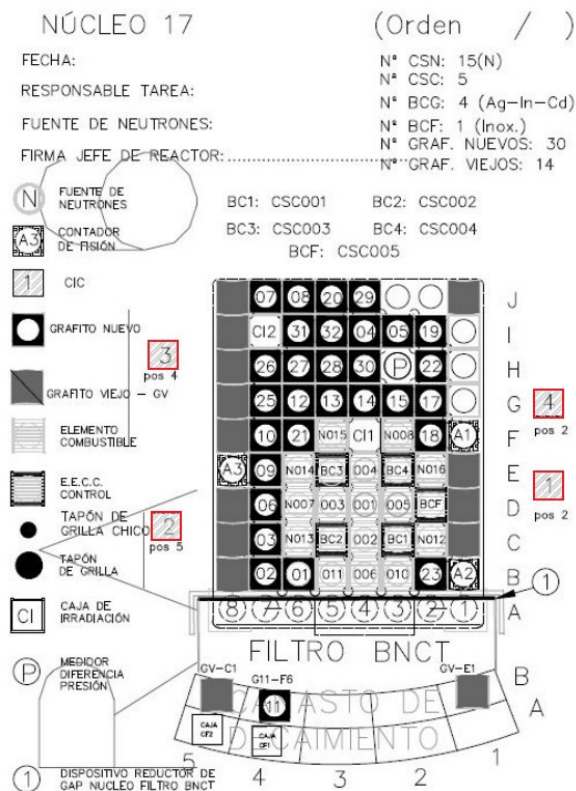


Figura 5.2: Esquema de ubicación de las cámaras de ionización compensadas en la grilla del núcleo del reactor, marcadas en rojo.

Las cámaras 1, 2 y 3 son las que forman parte del SPR y se amplifican de manera logarítmica para poder tener una referencia de población en el reactor.

Las CIC al estar lo suficientemente alejadas del núcleo pueden ser utilizadas a través de una relación lineal con la población del reactor, y por lo tanto, con la potencia térmica. Sería necesario entonces realizar una calibración de potencia de las señales de marcha para poder determinar potencia.

Esto implicaría una calibración para cada cámara, pero, el RA-6 debido a su diseño de dos barras de seguridad, se puede operar en cuatro configuraciones críticas distintas, dependiendo de que facilidad esté en uso (BNCT, Chopper, etc). Las barras de seguridad imponen una forma en el flujo que hace que para la misma potencia térmica, el flujo en cada cámara sea distinto, por lo que se requieren cuatro calibraciones. En la figura 5.3 se muestran dos configuraciones críticas posibles con su respectiva simulación de potencia por EC, mostrando como el flujo se distribuye de manera distinta para una potencia térmica constante.

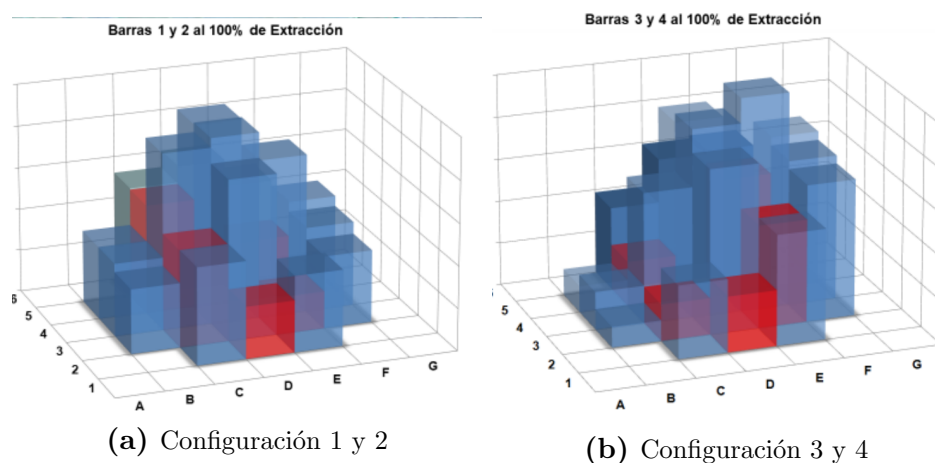


Figura 5.3: Potencia por EC para distintas configuraciones de barras de seguridad

5.2. Implementación en RA6-ER

Cableado de entradas

Primero, para poder adquirir la señal de nitrógeno 16 se realizó una conexión a través de los aisladores y a la bornera del CompactRIO. Se utilizó la entrada analógica número dos del segundo módulo 9403 del CompactRIO [6].

Se probó la conexión utilizando una corriente de 4 nA que simula plena potencia, y se obtuvo un valor de tensión de 0.4 V, valor que se utilizará para calibrar las mediciones.

Por parte de las señales de marcha, ya son adquiridas por el CompactRIO, por lo que no se requiere ninguna conexión adicional.

LabView

Nitrógeno 16

Para la adquisición de la señal, se utilizó la opción de *aliasing* para copiar el valor de la entrada analógica número dos a la variable correspondiente en el CompactRIO llamada “N16 inter”. De la misma manera, se copia este valor a la variable “N16” para poder ser escrita en la base de datos y mostrada en la web.

Señales de Marcha

Se desarrolló un VI que permite la detección de la configuración crítica en la que se encuentra el reactor, y a partir de esto, seleccionar la calibración correspondiente para la señal de marcha. Dicho algoritmo, se muestra en la figura 5.4.

En el mismo se puede observar que el algoritmo se basa en detectar cuales barras son las de seguridad y en función de eso selecciona a través de un case structure la

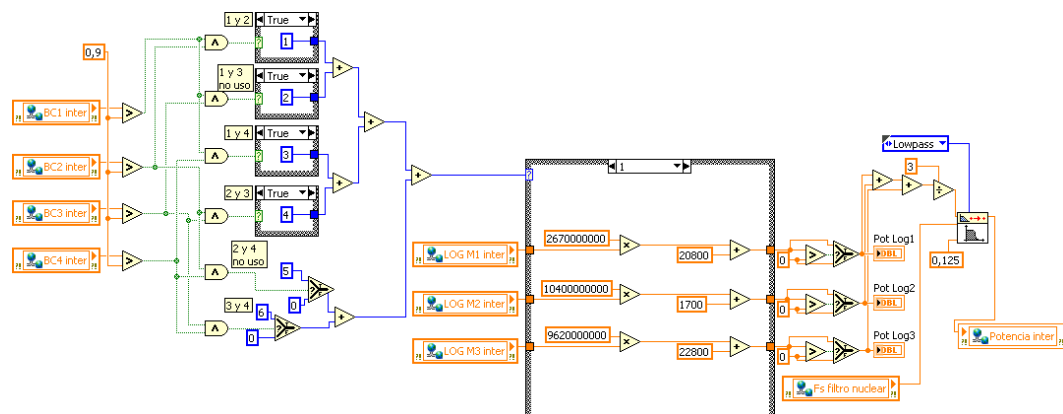


Figura 5.4: Algoritmo de selección de calibración de señales de marcha

calibración correspondiente. Notar que el algoritmo admite configuración de barras 1 y 3 o 2 y 4 como de seguridad, pero las mismas no son utilizadas en el reactor.

Además, el algoritmo filtra potencias negativas y promedia las mediciones para obtener finalmente un valor de potencia a reportar, que posteriormente a ser filtrado, se copia en la variable “Potencia inter”.

Esta variable es luego copiada a través del “Aliasing” en la variable “Potencia” del servidor para ser escrita en base de datos.

5.3. Calibración

Para poder calibrar las señales de marcha, se necesita hacer un barrido de potencia en cada configuración crítica por todo el rango de medición de nitrógeno 16.

Se proponen dos métodos, uno que minimiza el uso de recursos y tiempo, y otro que aprovecha la realización de una práctica de laboratorio para confirmar resultados.

Método 1

Con fin de minimizar el uso de recursos y tiempo, se propone en un turno de uso del reactor realizar las cuatro subidas y bajadas de potencia a tasa de 1%/s, videograbando las mediciones de los tres logarítmicos en el RA6-ER y el visor de nitrógeno 16 en consola. Una captura de dicho video se muestra en la figura 5.5.

Para no apagar por completo el reactor, al bajar la potencia se lleva a rango de arranque para poder modificar la configuración de barras de seguridad sin disparar el SPR por mala configuración.

Luego, se procesa el video para obtener un mapeo de las mediciones de las cámaras de ionización con la medición de nitrógeno 16 y se espera encontrar una relación lineal entre ambas.

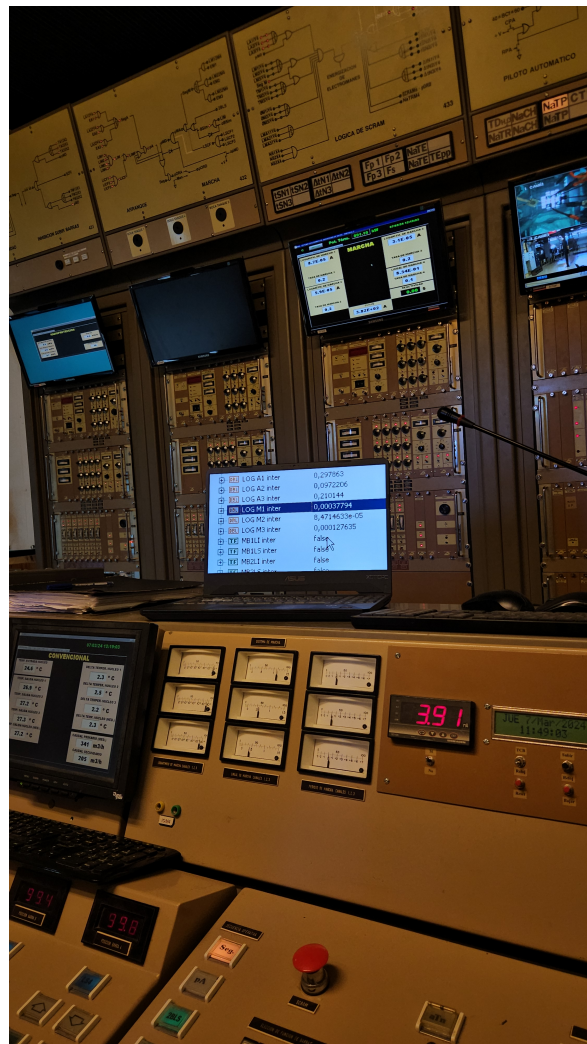


Figura 5.5: Captura de video de calibración

Método 2

Por otro lado, se aprovecha el desarrollo de la práctica de efectos espaciales de la materia Laboratorio II de la carrera de Ingeniería Nuclear para realizar una calibración de las cuatro necesarias[20].

En la misma se realiza una subida hasta 1 MW, pero a diferencia del método anterior, se realizan paradas a nitrógeno constante para estabilizar el reactor y dejar que pasen posibles transitorios. Luego, se toman las mediciones de las cámaras de ionización y del nitrógeno 16, esperando encontrar una relación lineal entre ambas.

5.4. Resultados

Nitrógeno 16

Si bien se realizó el cableado y el seteo de las variables necesarias para la adquisición de la señal de nitrógeno 16 proveniente del tanque de decaimiento, esta presenta un muy alto nivel de ruido que hace imposible su medición. Las causas de esto yacen en la utilización de los aisladores galvánicos de señal. Estos aisladores, transforman la señal a frecuencia para poder ser transmitida por un transformador, y luego convierten la información a tensión nuevamente. Esto se hace para aislar señales sensibles para la operación y seguridad del reactor de la electrónica de adquisición de datos.

Como se mencionó antes, el rango de tensión en el que se encuentra la señal es de 0 a 0.4 V, esto sumado al ruido introducido por los aisladores galvánicos, hace que la señal sea indistinguible del ruido en la entrada analógica del CompactRIO.

Método 1

Se realizó la captura de video y se procesó para obtener un mapeo de las mediciones de las cámaras de ionización con la medición de nitrógeno 16. En la figura 5.6 se muestra el mapeo obtenido para la cámara dos, en la configuración crítica con barras 2 y 3 de seguridad a modo de ejemplo.

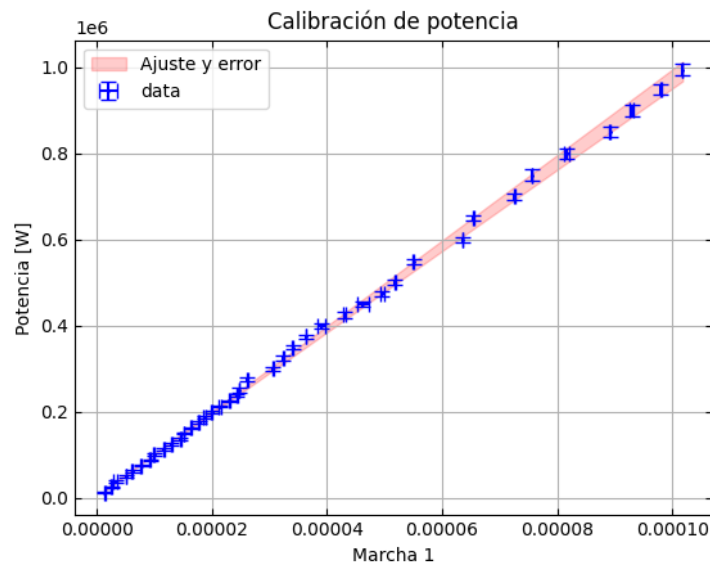


Figura 5.6: Mapeo de mediciones de cámara 2 con potencia en W y su ajuste lineal.

El resto de calibraciones de cámaras para las distintas configuraciones críticas se encuentran graficadas en el anexo D y se reportan los resultados en la tabla 5.1.

Estos valores de calibración son los introducidos en 5.4 para poder obtener una estimación de la potencia térmica en el RA6-ER.

Configuración	Cámara	Pendiente [W/1]		Ordenada [W]	
		Valor	Error	Valor	Error
1 y 2	1	2.70E+09	1.00E+08	2.10E+04	4.00E+03
	2	1.04E+10	4.00E+08	1.70E+03	3.00E+03
	3	9.62E+09	4.00E+08	2.30E+04	3.00E+03
1 y 4	1	2.33E+09	1.00E+08	1.50E+04	4.00E+03
	2	1.20E+10	6.00E+08	-4.00E+03	5.00E+03
	3	9.70E+09	5.00E+08	1.60E+04	5.00E+03
2 y 3	1	3.20E+09	2.00E+08	2.00E+04	4.00E+03
	2	9.70E+09	3.00E+08	5.00E+03	3.00E+03
	3	8.00E+09	4.00E+08	2.30E+04	4.00E+03
3 y 4	1	2.58E+09	9.00E+07	3.60E+04	4.00E+03
	2	1.14E+10	3.00E+08	8.00E+03	4.00E+03
	3	7.80E+09	4.00E+08	4.30E+04	6.00E+03

Tabla 5.1: Resultados de calibraciones de señales de marcha por configuración de barras de seguridad

En el gráfico presentado y en los presentes en el anexo se observa una cierta tendencia lineal pero sobre la misma montado se encuentra un batido que puede provenir de la característica del método propuesto, en el que el reactor se encuentra evolucionando cuando las mediciones son tomadas.

Además, en los resultados de los ajustes se muestra que las ordenadas al origen no son nulas ni sus errores contienen siempre al cero, otra consecuencia de haber realizado mediciones en estado no estacionario.

Estos resultados serán comparados con los obtenidos en el método 2 para confirmar su validez parcial y así poder utilizarlos en la web del RA6-ER.

Método 2

Durante la realización de la práctica de laboratorio, se utilizó la configuración de barras de seguridad 3 y 4, y se cubrió el rango de 0 a 1 MW. Se hicieron 6 paradas incluyendo la llegada al megaWatt, para poner crítico al reactor y tomar las mediciones. En la figura 5.7 se muestran las mediciones tomadas para la cámara 2 y su respectivo ajuste lineal.

En la tabla 5.2 se presentan los resultados de las calibraciones para las tres señales de marcha.

En este método se observa que la tendencia lineal es clara y no se observa el batido que se observa en el método 1. Además, las ordenadas al origen son más cercanas a cero y sus errores contienen al cero, lo que indica que las mediciones son más estables.

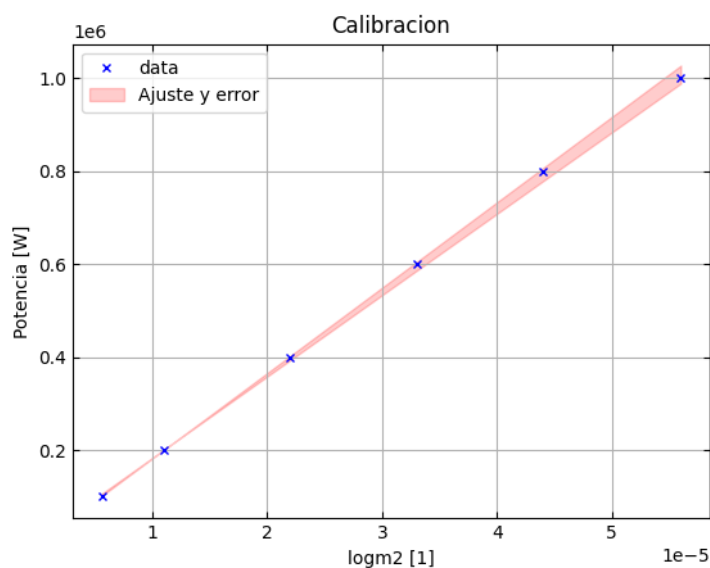


Figura 5.7: Gráfico de mediciones de cámara 2 con potencia en W y su ajuste lineal.

Cámara	Pendiente [W/1]		Ordenada [W]	
	Valor	Error	Valor	Error
1	2.68E+09	1E+07	2E+03	8E+02
2	1.17E+10	1E+08	2E+03	3E+03
3	8.24E+09	2E+07	2E+03	2E+03

Tabla 5.2: Resultados de calibraciones de señales de marcha por método 2.

Dado que las pendientes obtenidas en ambos métodos son similares, se puede concluir que los resultados obtenidos en el método 1 son válidos y se pueden utilizar en la web del RA6-ER con ciertas limitaciones.

5.5. Página Web

Para visualizar el valor de potencia térmica del reactor en tiempo real, se añadieron dos visualizadores numéricos en la página del RA6-ER. Uno en la sección de “Señales”, página que se utiliza en caso de realización una práctica de operación asistida y el otro en la página de “Reactividad”, que también tiene aplicaciones de operación más orientada a la física del reactor, como se muestra en el capítulo 2.

Ambos añadidos se muestran en las figuras 5.8 y 5.9 respectivamente, y ambas cuentan con el mismo script de PHP que lee la base de datos y muestra el valor de potencia en tiempo real. Dicho script se muestra en el código 5.1.

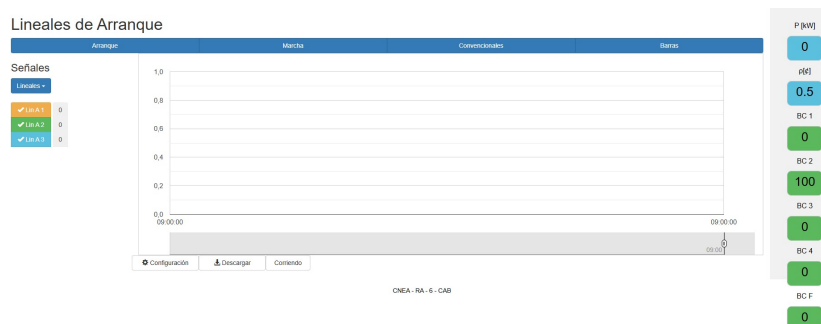


Figura 5.8: Visualizador numérico de potencia en la página de señales, en la esquina superior derecha.

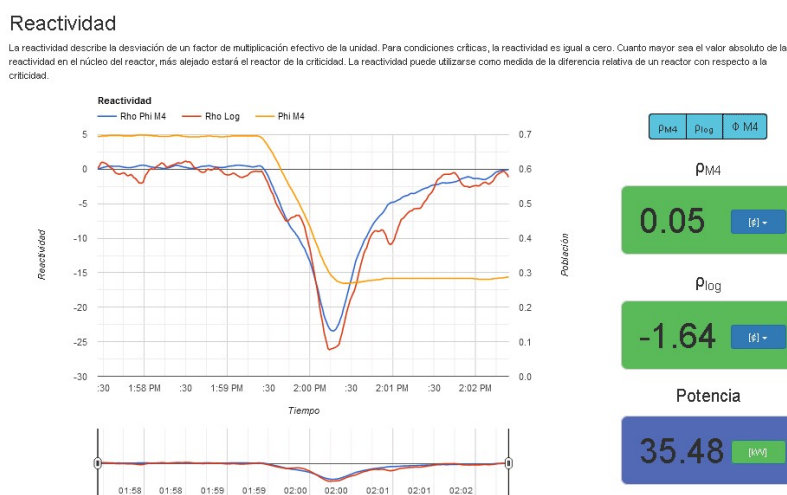


Figura 5.9: Visualizador numérico de potencia en la página de reactividad, en la esquina inferior derecha.

```

1  $stmt = $conn->prepare('SELECT dato FROM listado WHERE serial = "
    Potencia"');
2  $stmt->execute();
3  $result = $stmt->get_result();
4  $salida[0] = $result->fetch_all(MYSQLI_NUM)[0][0];
5  echo json_encode($salida);

```

Código 5.1: Script de PHP para visualizador numérico de potencia

Capítulo 6

Conclusiones

“You cannot kill hope.”

— Varok Saurfang

A lo largo del desarrollo de este proyecto integrador se trabajó en la implementación de diversas funcionalidades para el sistema de adquisición y publicación de datos RA6 en red. Estos nuevos anexos son completamente independientes entre sí, destacando la flexibilidad del sistema para adaptarse a nuevas necesidades y la facilidad de implementación de mejoras. A continuación, se presentan las conclusiones de cada uno de los desarrollos realizados.

Reactímetro digital

Se desarrolló un algoritmo de cálculo de reactividad para el sistema RA6-ER, que permite obtener una reactividad en tiempo real a partir de las señales de población neutrónica adquiridas por el sistema. Este algoritmo ha sido calibrado y verificado con un método alternativo, y se ha implementado en el sistema RA6-ER, permitiendo la visualización de la reactividad en tiempo real a través de una página web.

Durante el desarrollo de la operación correspondiente a la calibración también se observaron las limitaciones del algoritmo propuesto aplicado en las actuales variables de población del RA6-ER, en cuanto a la velocidad de respuesta a cambios bruscos en la población neutrónica. Estos cambios bruscos, como los dientes de sierra rápidos, no pueden ser captados por el algoritmo, pero sí los cambios más lentos, como los dientes de sierra lentos. Esto indicaría que el reactímetro puede ser utilizado como referencia de criticidad en prácticas de operación y/o para observar realimentaciones de reactividad lentas en el sistema, pero no permitiría detectar por ejemplo, la inserción de reactividad por medio del neumático del reactor. Esto se debe a la utilización de señales filtradas de población, que no tienen una respuesta instantánea a cambios.

Se observó la variabilidad estadística de las señales de reactividad generadas, y como esto puede asociarse a un error de determinación en la misma. Esta, se determinó de medio centavo para la señal correspondiente a $\Phi M4$ y de dos centavos para la señal logarítmica. Este error, por más que se vea reducido por el filtro exponencial, sigue siendo significativo en la determinación de la reactividad.

Práctica de determinación de caudal por Elemento Combustible

Se desarrolló una infraestructura de adquisición, procesamiento y publicación de datos para el desarrollo de la práctica de Laboratorio II de la carrera de Ingeniería Nuclear.

La primera parte del trabajo se centró en la primer parte de la práctica, en el cual se realiza una calibración del dispositivo. Para ello, se estableció un sistema compuesto de un programa de arduino y un VI de LabView que permiten la adquisición y procesamiento de la señal eléctrica generada por el caudalímetro.

En la segunda parte del trabajo se desarrolló por completo un sistema que permite adquirir la señal eléctrica, procesarla y publicarla de una manera amigable al usuario en la página web del sistema. Dicho desarrollo incluyó cableado de una nueva entrada en el CompactRIO, programación en FPGA, procesamiento a nivel LabView y publicación en la página web.

Ambas secciones permiten agilizar el desarrollo de la práctica, ya que se facilita el trabajo necesario en la interfaz dummy - datos experimentales, permitiendo a los usuarios centrarse en el contenido de la práctica y no en la estructura que permite la adquisición de datos.

Práctica de Coastdown

Se desarrolló una nueva implementación de adquisición de datos para la práctica de Coastdown de bomba de primario de la materia de Laboratorio II de la carrera de Ingeniería Nuclear en el RA6-ER, que permite la adquisición de datos de manera más eficiente utilizando el circuito auxiliar pre existente.

Se cablearon dos nuevas señales al CompactRIO, una digital y otra analógica, que permiten la adquisición de datos de la práctica. Se añadió al algoritmo existente de lectura de entradas digitales un fragmento que permite la escritura de variables digitales locales en el CRIO, y se desarrolló un algoritmo que permite obtener una señal de caudal a partir de la diferencia de presión en la placa orificio.

Se desarrolló una página web que permite la visualización de la curva de coastdown de bomba de primario, así como los eventos relevantes a ella. La página web se encuentra en el servidor del RA6-ER y es accesible desde cualquier dispositivo conectado a la red del reactor. De la misma se puede obtener un archivo .txt que permite el posterior análisis de los datos obtenidos por parte del usuario.

Potencia

Se implementó tanto en hardware como en software todo lo necesario para adquirir la señal de nitrógeno 16 en el sistema de RA6 en red, sin éxito numérico debido a un alto nivel de ruido comparado con el valor nominal de la señal.

Se propusieron y utilizaron dos métodos distintos para calibrar las señales logarítmicas de marcha en potencia, obteniendo resultados que se validan entre sí. Estos resultados si bien no son exactos a bajas potencias debido a las ordenadas al origen obtenidas de los ajustes, si otorgan una referencia de potencia para el RA6 en circulación natural, que actualmente no existe una manera de determinarse. También, el método utilizado para la realización del método 1 reduce el tiempo de reactor requerido para la calibración cuatro veces, brindando un resultado útil para la primera iteración del ajuste.

Se implementó en el servidor de RA6-ER un algoritmo de selección y calibración de señales de marcha, que permite escribir en base de datos una estimación de la potencia térmica del reactor.

Se desarrollaron visualizadores numéricos de potencia térmica en distintas secciones de la página web del RA6-ER, que permiten a los usuarios tener una referencia de la potencia del reactor en tiempo real.

Capítulo 7

Trabajo futuro

“You either die a hero, or you live long enough to see yourself become the villain.”

— Harvey Dent

Las diferentes propuestas de trabajo futuro descritas en este capítulo se dividen en las diferentes prácticas desarrolladas en el presente trabajo. Se describen las mejoras posibles para cada una de ellas, teniendo en cuenta las limitaciones actuales del sistema. Si bien las propuestas no son suficientes en contenido para la realización de un trabajo de estas características, sí pueden ser tenidas en cuenta en el marco de la materia de Laboratorio II de Ingeniería Nuclear.

Reactímetro digital

El algoritmo propuesto, si bien es funcional, puede ser mejorado en cuanto a su velocidad de respuesta a cambios bruscos en la población neutrónica. Esto podría lograrse por medio de un análisis de sensibilidad del filtrado de las señales de población neutrónica, ya que el filtro actual podría estar sobredimensionado.

Por otra parte, el algoritmo propuesto es débil ante cambios de décadas de $\Phi M4$, que si bien esto no es un problema en operación en una década de potencia, ante cambios de la misma provoca que el reactímetro de dicha señal quede inutilizado durante aproximadamente un minuto. Esto puede hacerse renormalizando la población neutrónica al detectar un salto en la misma mayor al 40%.

Práctica de determinación de caudal por Elemento Combustible

El sistema desarrollado para el dummy caudalímetro se encuentra en una etapa de desarrollo avanzada, pero aún se pueden realizar mejoras para facilitar su uso y aumentar su eficiencia.

En primer lugar, si bien se encontró una forma de no perder flancos de activación del reed-switch, la escritura de base de datos cada 200 ms presenta una limitación en la resolución temporal de los datos. Actualmente en la práctica de medición de caudal por EC no se requiere una resolución temporal tan alta, pero en caso de una nueva práctica o una expansión de la misma que estudien transitorios nuevos, se deberá aumentar la resolución temporal de los datos en frecuencia.

Por otro lado, se puede idear una manera de que el cálculo de frecuencia de giro de la turbina se realice integrando varios períodos en lugar de uno solo, como se hace actualmente. Esto permitiría diluir el error en la detección del flanco de activación, disminuyendo el error en la medición. Debido a que el número de períodos de integración debe ser una elección del usuario, esto no fue posible de implementar ya que implicaría una interfaz web-CompactRIO, que de la manera que se encuentra implementada la práctica, resultaría imposible.

Finalmente, se puede mejorar la interfaz web para que los usuarios tengan la capacidad de descargar cualquier dato almacenado en base de datos, no solo los almacenados mediante el botón de grabación. Esto permitiría que ante un evento de pérdida de información, los datos puedan ser fácilmente recuperados. Si bien esto puede facilitarse, esto ya es accesible a través de la base de datos del servidor.

Práctica de Coastdown

Para una lógica más simple, se puede implementar el uso de dos entradas digitales en lugar de una, cada una correspondiendo a los dos estados booleanos de relevancia para la práctica, siendo estos el estado de la bomba y señal dentro de rango. Esto permitiría una mayor claridad en la lógica de la práctica y una mayor facilidad de implementación en la página web, evitando errores por complejidad innecesaria. Por ejemplo, la página web determina que la bomba se encuentra encendida debido a que el caudal se encuentra por encima de un umbral arbitrario, pero si por cuestiones experimentales la exclusiva de ingreso al tanque se encuentra más cerrada de lo normal, esta condición podría no cumplirse ya que no hay señal de “bomba encendida”, sino, la orden de apagado.

Esta práctica en particular requiere de un sincronismo y resolución temporal mayor

a los dos casos vistos anteriormente, por lo que se recomienda la posterior implementación de un algoritmo de adquisición más rápido para el caudal, ya que por más que la lectura de entradas digitales tiene resolución de algunos μs , la resolución temporal para el caudal ronda los 70 ms.

Potencia

Se propone investigar una nueva solución para la adquisición de la señal de nitrógeno 16, que permita su medición en el RA6-ER. Esto se puede hacer cambiando la relación corriente-tensión de la señal para elevar el nivel de señal por encima del ruido generado. También se propone cambiar el tipo de aislador utilizado por un amplificador de instrumentación.

Se necesita de una calibración más precisa de las señales de marcha, que permita obtener una referencia de potencia en el reactor con un error menor al actual. Para esto, se propone al realizar la práctica de calibración en potencia de la materia Laboratorio II de Ingeniería Nuclear utilizando las mediciones del RA6-ER.

Para poder utilizar la calibración en potencia a potencias bajas, se necesita de algún método que permita obtener una referencia de potencia en ese rango, como por ejemplo, una medición por ruido neutrónico. De esta manera, el RA6-ER quedaría equipado con una determinación de potencia tanto en circulación natural como en forzada, y en todo el rango de adquisición de las cámaras de ionización compensadas del reactor.

Apéndice A

Código adquisición y procesamiento para calibración de dummy caudalímetro

Se presenta a continuación el código utilizado para la adquisición y procesamiento de la señal eléctrica generada por el caudalímetro de turbina. El código está escrito en lenguaje C y se ejecuta en un arduino UNO [17].

```
1  const int analogPin = A0;  // Analog input pin
2  int sensorValue = 0;      // Variable to store the analog value
3  int test = 0;
4  bool estado =0;
5  bool intercalar = 0;
6
7  float f=0;
8
9  //tiempos
10 int t_i, T;
11 long t_0,t_k;
12
13 bool first_run=1;
14
15 void setup() {
16   Serial.begin(9600);      // Initialize serial communication
17 }
18
19 void loop() {
20   sensorValue = analogRead(analogPin); // Read the analog input
21   if (first_run){
22     t_0 = millis();
23     first_run = 0;
24   }
```

60 Código adquisición y procesamiento para calibración de dummy caudalímetro

```
25
26 t_k = millis(); //tiempo actual
27
28 if(sensorValue >= 800 && !estado && intercalar){
29     T=t_k-t_i;
30     t_i=t_k;
31     f=1000.0/T;
32     intercalar = 0;
33     Serial.print(t_k);
34     Serial.print("\t");
35     Serial.println(f, 6);
36 }
37 else if(sensorValue >= 800 && !estado && !intercalar){ //sirve para
38     first run
39     estado = 1;
40     if (f>0){
41         t_i =t_k; //tiempo de inicio del periodo (solo lo necesito una
42         vez)
43     }
44     intercalar = 1;
45 }
46 else if(sensorValue < 400 && estado){
47     estado = 0;
48 }
49
50 if (t_k-t_0>=7000){
51     Serial.print(t_k);
52     Serial.print("\t");
53     Serial.println(0, 6);
54     t_0=t_k;
55 }
56 else if (estado == 1){
57     t_0=t_k;
58 }
59 }
```

Código A.1: Algoritmo cálculo de frecuencia de giro del caudalímetro de turbina

Apéndice B

Código de lectura de entradas digitales en FPGA

Se presenta a continuación el código utilizado para la adquisición de las entradas digitales del CompactRIO.

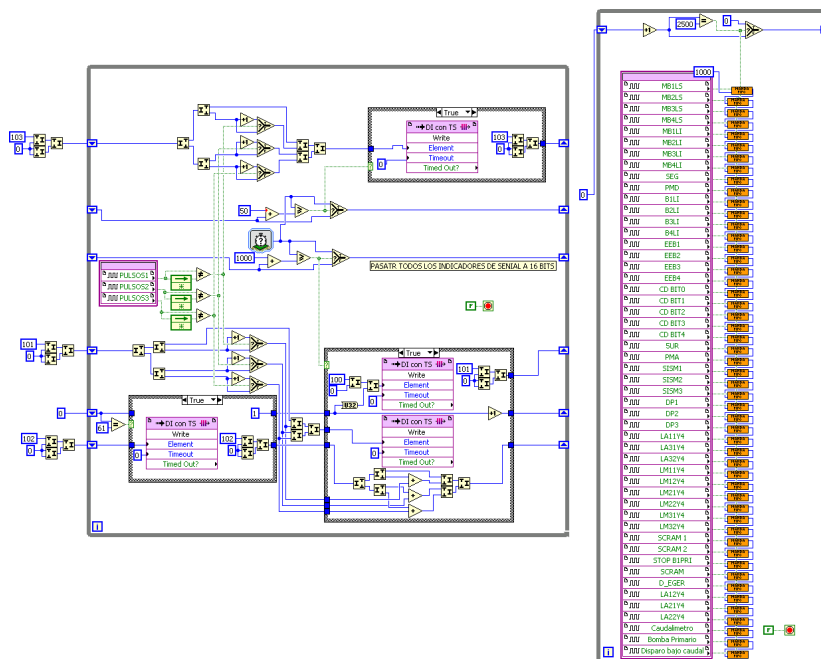


Figura B.1: Código en LabView para la adquisición de señales digitales.

Apéndice C

Algoritmos desarrollados para la página del dummy caudalímetro

En este apartado se muestran los códigos completos de los algoritmos desarrollados para el back-end de la página web del dummy caudalímetro. Entre ellos:

- Generación de archivos: código [C.1](#).
- Calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro: código [C.2](#).
- Cambio de unidades de la frecuencia de giro del caudalímetro: código [C.3](#).
- Eliminación de la calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro: código [C.4](#).

```
1 function handleClick() {
2     const button = document.getElementById('grabar_f');
3     if (!isRecording) {
4         // Start recording
5         isRecording = true;
6         button.textContent = 'Stop Recording';
7         console.log(isRecording);
8     } else {
9         // Stop recording
10        isRecording = false;
11        button.textContent = 'Grabar';
12        button.disabled = true;
13
14        // Tiempo actual
15        var now = new Date();
16        // Formatear el tiempo como HH_MM_SS para el nombre del
17        archivo
18        var filename = now.getHours() + "_" + now.getMinutes() + "_" +
19        now.getSeconds() + ".txt";
```

```

18     // Crear un blob usando data_txt
19     const blob = new Blob([data_txt.join('\n')], {type: 'text/
plain'});
20     // Link para la descarga
21     const url = URL.createObjectURL(blob);
22     // Promptear al usuario con la descarga
23     const a = document.createElement('a');
24     a.href = url;
25     a.download = filename;
26     document.body.appendChild(a);
27     a.click();
28     // Remover el link
29     document.body.removeChild(a);
30     // Limpiar el arreglo de datos
31     data_txt = [];
32     // Rehabilitar el boton
33     setTimeout(() => {
34         button.disabled = false;
35     }, 1000);
36 }
37 }

```

Código C.1: Algoritmo de generación de archivos de texto con los datos de frecuencia de giro del caudalímetro.

```

1 function calibrator() {
2     const button_cal = document.getElementById('calibration');
3     button_cal.disabled = true;
4     try {
5         if (document.getElementById('input1').value != ''){
6             prev_cal_offset=cal_offset;
7             prev_cal_slope=cal_slope;
8             cal_slope = parseFloat(document.getElementById('input1').value
);
9             cal_offset = parseFloat(document.getElementById('input2').
value);
10            if (cal_slope != 0 && !isNaN(cal_slope)){
11                if (isNaN(cal_offset)){
12                    cal_offset = 0;
13                }
14            }
15            unitsChange();
16            prev_cal_offset=cal_offset;
17            prev_cal_slope=cal_slope;
18            options.title = 'Caudal por EC Dummy';
19            options.vAxis = {title: 'Caudal [m3/h]', minValue: 0,
maxValue: 13};
20            colName = 'Caudal';

```



```

21     chart.draw(data, options);
22   }
23   } catch (error) {
24     console.error("An error occurred during calibration:", error);
25   } finally {
26     setTimeout(() => {
27       button_cal.disabled = false;
28     }, 1000);
29   }
30 }

```

Código C.2: Algoritmo de calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro.

```

1 function unitsChange() {
2   var aux1;
3   for (var i = 0; i < data.getNumberOfRows(); i++) {
4     // Getter
5     aux1 = data.getValue(i, 1);
6     // Aplicar calibracion
7     if (prev_cal_slope !== 0) {
8       aux1 = ((aux1 - prev_cal_offset) / prev_cal_slope) *
cal_slope + cal_offset;
9     } else {
10      console.error("Calibracion anterior rota.");
11    }
12    // Setter
13    data.setValue(i, 1, aux1);
14  }
15 }

```

Código C.3: Algoritmo de cambio de unidades de la frecuencia de giro del caudalímetro.

```

1 function reset () {
2   const button_rst = document.getElementById('reset');
3   button_rst.disabled = true;
4   document.getElementById('input1').value = '';
5   document.getElementById('input2').value = '';
6   cal_slope = 1;
7   cal_offset = 0;
8   unitsChange();
9   options.title = 'Frecuencia del caudalimetro';
10  options.vAxis = {title: 'Frecuencia turbina [Hz]', minValue: 0,
maxValue: 13};
11  colName = 'Frecuencia';
12  chart.draw(data, options);
13
14
15  setTimeout(() => {

```

```
16     button_rst.disabled = false;  
17     }, 1000);  
18  
19 }
```

Código C.4: Algoritmo de eliminación de la calibración de la frecuencia de giro del caudalímetro.

Apéndice D

Gráficos de mediciones de potencia y calibraciones

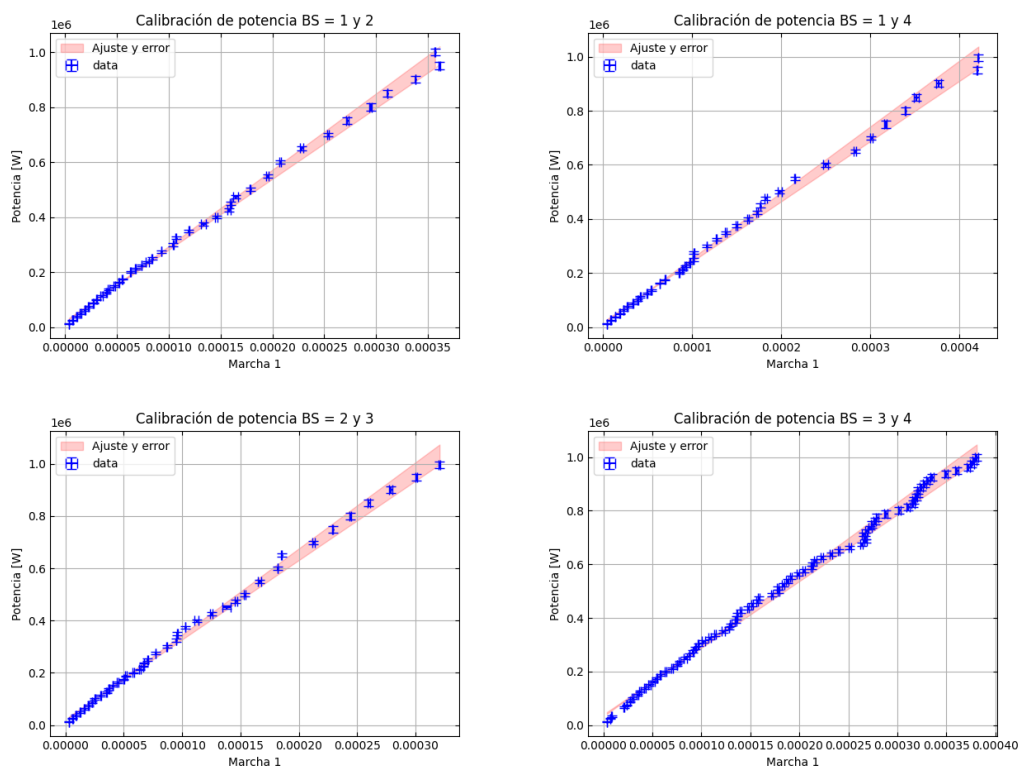


Figura D.1: Gráficos de calibración de potencia correspondientes al logarítmico de marcha 1.

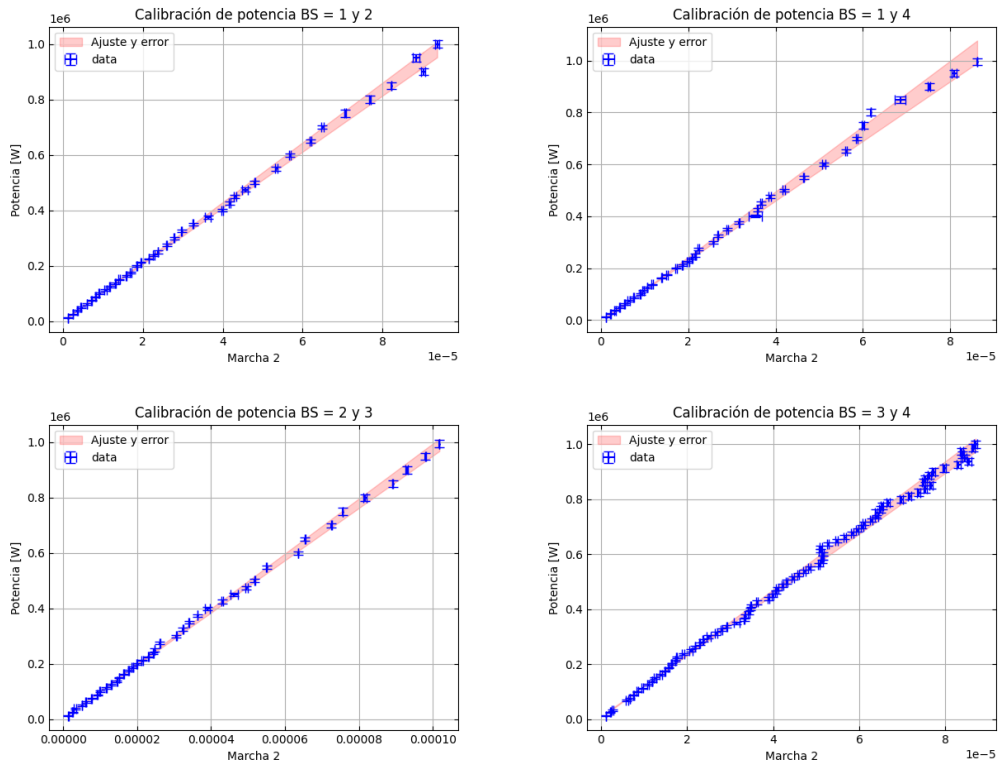


Figura D.2: Gráficos de calibración de potencia correspondientes al logarítmico de marcha 2.

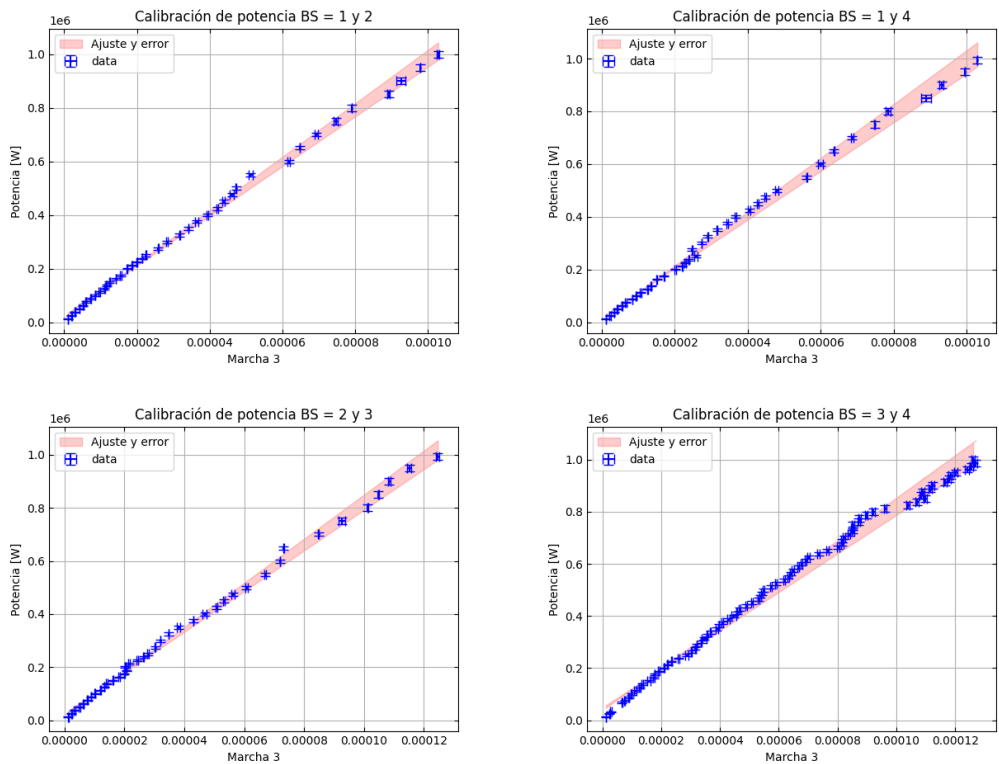


Figura D.3: Gráficos de calibración de potencia correspondientes al logarítmico de marcha 3.

Apéndice E

Justificación de horas de proyecto integrador

Nota del director D. Mangiarotti:

Para poder realizar el presente trabajo fueron necesarias actividades de Proyecto y Diseño (PyD), llevadas a cabo por G. Iglesias, de acuerdo a los lineamientos propuestos. Dichas tareas incluyen pero no se limitan a la adquisición y procesamiento de datos, diseño e implementación de algoritmos, desarrollo de prácticas experimentales, análisis de datos y diseño de interfaces humano - máquina. Estas actividades requirieron más de 200 horas para su completitud

Por otro lado, se completará satisfactoriamente el requerimiento de 200 HS de PPS como se indica en los documentos [\[21\]](#) y [\[22\]](#).

Bibliografía

- [1] Iglesias, G., Moine, A., Güttlein, C. Determinación experimental del caudal de refrigeración de un eecc normal para el núcleo reactor ra-6. [ix](#), [32](#)
- [2] Tuttle, R. J. Review of delayed neutron yields in nuclear fission. En: J. S. Briggs, J. H. Macek (eds.) Delayed Neutron Properties, pág. 29. International Atomic Energy Agency Report INDC NDS-107/G+Special, 1979. [xi](#), [10](#)
- [3] Gobierno de la República Argentina. Reactor argentino n6. URL <https://www.argentina.gob.ar/cnea/cab/ra-6/aplicaciones>, revisado: 2024-05-12. [2](#)
- [4] Mangiarotti, D. Desarrollo e implementación de la plataforma de soporte al proyecto ra-6 en red. *Tesis carrera de Maestría en Ingeniería*, 2018. [2](#), [12](#), [26](#), [27](#), [36](#), [37](#)
- [5] National Instruments. Ni9205. URL <https://download.ni.com/support/manuals/374188g.pdf>, revisado: 2024-05-12. [3](#), [36](#)
- [6] National Instruments. Ni9403. URL <https://www.ni.com/es-cr/shop/model/ni-9403.html>, revisado: 2024-05-10. [3](#), [26](#), [44](#)
- [7] National Instruments. Labview. URL <https://www.ni.com/es-cr/shop/labview.html>, revisado: 2024-05-12. [3](#)
- [8] W3Schools. Sql. URL https://www.w3schools.com/whatis/whatis_sql.asp, revisado: 2024-05-12. [4](#)
- [9] Bootstrap team. Bootstrap. URL <https://getbootstrap.com/>, revisado: 2024-05-12. [4](#)
- [10] Google. Google charts. URL <https://developers.google.com/chart>, revisado: 2024-05-12. [4](#)
- [11] the PHP group. ¿qué es php? URL <https://www.php.net/manual/es/intro-what-is.php>, revisado: 2024-05-12. [4](#)
- [12] GIT. Git. URL <https://git-scm.com/>, revisado: 2024-05-12. [5](#)

-
- [13] ServidorRa6ER. Ra6erweb. URL <https://github.com/ServidorRa6ER/RA6ERweb>. 5
- [14] Bell, G. I., Glasstone, S. Nuclear reactor theory. En: Nuclear Reactor Theory, págs. 1–11. Van Nostrand Reinhold Company, 1970. 7
- [15] W3Schools. Javascript eventlistener(). URL https://www.w3schools.com/js/js_htmlDOM_eventlistener.asp, revisado: 2024-05-06. 16
- [16] Reed switch. URL <https://standexelectronics.com/resources/technical-library/technical-papers/technical-databook-reed-switch-technology/>, revisado: 2024-05-06. 21
- [17] Arduino. Arduino. URL <https://www.arduino.cc/en/Guide/ArduinoUno>, revisado: 2024-05-06. 24, 59
- [18] National Instruments. Labview runtime engine. URL <https://www.ni.com/es/support/downloads/software-products/download.labview-runtime.html#521521>, revisado: 2024-05-10. 25
- [19] Knoll, G. F. Radiation detection and measurement. En: Radiation Detection and Measurement. John Wiley & Sons, 2010. 43
- [20] LabII. Guía de medición de potencia. URL https://drive.google.com/file/d/1n2H-FXFn0sK9fAZw0V8_65hD4k7Qa_np/view?usp=drive_link. 46
- [21] Asistencia semestre 1. URL https://drive.google.com/file/d/1HNZWLkrnSv0luY1A-pFP0y08hBPWaWJD/view?usp=drive_link. 69
- [22] Asistencia semestre 2. URL https://drive.google.com/file/d/1HMEK6GaSBsaVr7ehxpkvzPCh6IgarWUh/view?usp=drive_link. 69

Agradecimientos

A mi mamá, que con su experiencia de vida y amor siempre me apoyó en todo lo que hice y me enseñó a ser la persona que soy, sin importar lo que fuese, desde el principio y hasta el fin de los tiempos.

A mi hermano, que pasó de ser mi compañero de juegos a ser mi compañero de vida, y que estuvo en casa cuando yo no pude estar.

A mi papá, que siempre estuvo ahí para darme una mano, que con su ingenio supo resolver cualquier problema que se le presentara, y que me marcó para siempre en todos y cada uno de los aspectos de mi vida, pasada, presente y futura.

A mis tíos, Seba y Coty, que siempre están atentos ante cualquier necesidad, y que estuvieron presentes en cada paso que di.

A mis abuelos, que me cuidaron y mimaron siempre, desde que nací hasta hoy.

A mi padrino y madrina, que desde lejos siempre me apoyaron y aconsejaron.

A Sergio, Nati, Sofi y Bauti, que desde que tengo memoria estuvieron presentes en mi vida, y por todas esas tardes de playa, picadas y risas.

A mis amigos del colegio, Mari, Lope, Fran, Ari, Paez y Gasti, que cada vez que volvía a mardel me recibían con los brazos abiertos para volver a contar las mismas anécdotas de siempre, como la primera vez.

A mis amigos de la UNMDP, Agus, Juli y Gero, que por serendipia formamos un grupo muy divertido y que siempre me tuvieron en cuenta para todo, a pesar de la distancia.

A mi colegio, el Instituto Industrial Pablo Tavelli, por formarme en lo personal y profesional, y prepararme para lo que vendría después.

A Abril, mi compañera de estudios, que fue con la que atravesé casi la totalidad de estos años de carrera y sorteamos todas las dificultades que supuso.

A Andy y Enzo, por incluirme en su grupo y haber compartido conmigo tantos momentos, comidas, chistes y anécdotas.

A Martín y Juan Pablo Cabrales, con los que compartimos la ~~nueva~~ triple y muchísimas experiencias (y comidas) juntos.

A Morgane, que desde Francia me sigue en todos los pasos que doy y me aconseja en todo lo que hago.

A Dante, Seba y Juan, que estuvieron al pie del cañón en todo momento, para resolver todas las dudas que tuve y para guiarme en el camino de la tesis.

A Aníbal, que tuvo un papel fundamental en materia de desarrollo de personaje.

A todos los que me conocen, por haber formado parte de mi vida.

