

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA ALMACENAMIENTO DE  
HIDRÓGENO GENERADO POR MEDIO DE UNA CELDA DE FLUJO IÓNICO  
SELECTIVO- CFIS.**



**Universidad de Nariño**

CRISTIAN DAVID ENRÍQUEZ ACOSTA  
CARLOS ANDRÉS BENAVIDES ACOSTA

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
PASTO, COLOMBIA  
2021

**DESARROLLO DE UN SISTEMA DE CONTROL PARA ALMACENAMIENTO DE  
HIDRÓGENO GENERADO POR MEDIO DE UNA CELDA DE FLUJO IÓNICO  
SELECTIVO- CFIS.**

CRISTIAN DAVID ENRÍQUEZ ACOSTA - CARLOS ANDRÉS BENAVIDES  
ACOSTA

TRABAJO DE GRADO PRESENTADO COMO REQUISITO PARCIAL PARA  
OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

DIRECTOR: JAVIER REVELO FUELAGÁN, PHD.

GRUPOS DE INVESTIGACIÓN:

GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA –  
GIIIE

GRUPO DE INVESTIGACIÓN ESTUDIO DE SISTEMAS CONTAMINANTES

UNIVERSIDAD DE NARIÑO  
FACULTAD DE INGENIERÍA, DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA  
PASTO, COLOMBIA

2021

## **NOTA DE RESPONSABILIDAD**

“La Universidad de Nariño no se hace responsable por las opiniones o resultados obtenidos en el presente trabajo y para su publicación priman las normas sobre el derecho de autor y la ley de propiedad intelectual.”

Acuerdo 1. Artículo 324. Octubre 11 de 1966, emanado del honorable Consejo directivo de la Universidad de Nariño.

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

San Juan de Pasto, 15/09/20

## AGRADECIMIENTOS

*“A mis padres, por ser esas personas llenas de amor, dedicación y responsabilidad; cada acto de su vida está enfocado en llevar adelante a su hogar.*

*A mi hermano menor por ser el impulso y esa responsabilidad que me hace esforzar por ser mejor persona y ser ese ejemplo sólido para él.*

*A mi familia y amigos por ser esa gran inspiración y apoyo para mi vida.”*

***Carlos Andrés Benavides Acosta.***

*“A mi padre por su constante apoyo y entrega, por mantener un hogar bajo su cuidado e inculcarme el amor a la formación intelectual desde la infancia.*

*A mi madre y hermano por ser un apoyo indispensable e impulsarme cada día a ser mejor y creer en mis capacidades para construir un mejor futuro*

*A toda mi familia, amigos y allegados que día a día han estado acompañándome en este camino”*

***Cristian David Enríquez Acosta.***

*“Agradecemos a la Universidad de Nariño por brindarnos las instalaciones y los equipos adecuados para el desarrollo de esta investigación.*

*A Gabriel Criollo por el acompañamiento a lo largo de nuestra carrera y el apoyo en el área técnica e implementación.*

*Al docente Andrés Pantoja por la orientación en el proceso; Al docente Juan José Lozada por facilitar su uso e impulsar la innovación de su tecnología patentada en energías renovables y al docente Javier Revelo por su dirección y asesoría.”*

***Carlos Benavides y Cristian Enríquez.***

## **RESUMEN**

En la actualidad existe una fuente alternativa de energía, el hidrógeno, para emplearlo en aplicaciones de transporte o aplicaciones estacionarias. A pesar de que el gas hidrógeno es abundante en el planeta, su almacenamiento y producción siempre se ven limitados por los costos y las características físico-químicas de este elemento.

En particular en la Universidad de Nariño el Dr. Juan José Lozada, profesor investigador del departamento de Química, ha desarrollado una tecnología para la generación de hidrógeno denominada celdas de flujo iónico selectivo- CFIS (patente SIC Resolución N° 17294). Estas celdas aplican el principio de electrolisis para la oxidación de materia orgánica presente en los excrementos, esto hace que esta tecnología sea una alternativa energética viable para aplicaciones vehiculares, entre otros usos.

La presente investigación se vio motivada de la necesidad de un sistema electrónico de control para el almacenamiento de hidrógeno dentro de aplicaciones vehiculares autosustentables; para esto, se desarrolló un diseño de monitorización y control implementado en la tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, que se encarga de registrar ciertas variables para efectuar el proceso de control de producción y almacenamiento de hidrógeno y de igual manera adquiere y controla variables tales como: concentración porcentual de hidrógeno, flujo de almacenamiento de hidrógeno, volumen generado, y variables de tensión y corriente en las etapas de generación, almacenamiento y consumo de energía eléctrica proveniente del sistema fotovoltaico.

El sistema de monitoreo y control evalúa las condiciones y análisis de los sensores según las características técnicas de rango, precisión, comunicación y consumo energético, para integrarlo a una plataforma web con su respectiva base de datos para efectuar la acción control del predictor de Smith implementado en la tarjeta de desarrollo, lo anterior, se validó en una simulación de un reactor conformado por un grupo de celdas de flujo iónico.

## **ABSTRACT**

The hydrogen as a clean fuel that is integrated with other energy sources for use in transportation applications or stationary applications. Despite the fact that hydrogen gas is abundant on the planet, its storage and production are always limited by the costs and the physical-chemical characteristics of this element, for this reason, this has been a subject of extensive research in the scientific field of world.

In particular, at the University of Nariño, Dr. Juan José Lozada, a research professor in the Chemistry department, has developed a technology for the generation of hydrogen called selective ion flow cells - CFIS (SIC patent Resolution No. 17294). These cells apply the principle of electrolysis for the oxidation of organic matter present in the excrement; this makes this technology a viable energy alternative for vehicular applications, and others.

The present research was motivated by the need for an electronic control system for hydrogen storage within self-sustaining vehicle applications; For this, a monitoring and control design implemented in the Raspberry Pi development card was developed, which is responsible for registering certain variables to carry out the hydrogen production and storage control process and in the same way acquires and controls variables such as: Percentage concentration of hydrogen, hydrogen storage flow, generated volume, and voltage and current variables in the stages of generation, storage and consumption of electrical energy from the photovoltaic system.

The monitoring and control system evaluates the conditions and analysis of the sensors according to the technical characteristics of range, precision, communication and energy consumption, to integrate it to a web platform with its respective database to carry out the control action of the implemented Smith predictor on the development board, the above was validated in a simulation of a reactor made up of a group of ion flow cells.

## CONTENIDO

Introducción .....	15
Descripción del problema .....	17
Justificación del problema.....	19
1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE ALMACENAMIENTO GENERADO A PARTIR DE UNA CFIS.....	20
1.1 FUNCIONAMIENTO CFIS.....	21
1.1.1 Implementación de la celda.....	23
1.2 MONTAJE EXPERIMENTAL CFIS Y SENSORES.....	24
1.2.1 Hidrógeno.....	26
1.2.2 Unidad de procesamiento .....	34
1.2.3 Sensores de energía .....	34
2. INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN Y ADQUISICIÓN.....	36
2.1 GUI: INTERFAZ GRÁFICA.....	37
2.2 DASH: ENTORNO DE TRABAJO .....	38
2.2.1 Arquitectura y funcionamiento .....	38
2.3 GIT: ENTORNO VIRTUAL Y REPOSITORIO.....	39
2.3.1 Flujo de trabajo.....	39
2.4 HEROKU: PLATAFORMA DE APLICACIONES EN LA NUBE.....	40
2.4.1 Despliegue de aplicaciones Dash en Heroku.....	41
2.5 POSTGRESQL: BASE DE DATOS .....	42
2.6 APLICACIÓN WEB E INTERFAZ DE USUARIO .....	42
2.6.1 Estructura de la interfaz .....	43
2.6.2 Sistema de control y sensores de energía .....	46
2.6.3 Diseño responsivo.....	47
2.7 RECOPILACIÓN DE DATOS .....	48
3. ESTRATEGIA DE CONTROL .....	50

3.1	METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL CONTROL .....	50
3.2	DESARROLLO DEL DISEÑO.....	52
3.2.1	Especificaciones.....	53
3.2.2	Modelado .....	54
3.2.3	Diseño del controlador: Predictor de Smith .....	69
3.2.4	Simulación.....	74
4.	RESULTADOS .....	98
4.1	SIMULACIÓN DEL PROCESO REAL EN SIMULINK .....	98
4.1.1	Prueba preliminar .....	99
4.1.2	Prueba de rechazo de perturbaciones con filtros .....	101
4.1.3	Prueba para desajustes del modelo con filtros.....	102
4.2	IMPLEMENTACIÓN EN PYTHON.....	104
4.2.2	Discretización de la planta y filtro .....	105
4.3	PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN FÍSICA .....	106
4.3.1	Conexión y calibración .....	106
4.3.2	Puesta en marcha del sistema .....	109
4.3.3	Prueba de rendimiento .....	109
4.3.4	Prueba de referencia variable .....	113
5.	CASO DE ESTUDIO .....	114
5.1	SERIE Y PARALELO DE CFIS.....	114
5.2	REACTOR MÚLTIPLES CFIS .....	115
5.3	SIMULACIÓN DE CONTROL PARA REACTOR DE MÚLTIPLES CFIS	118
6.	CONCLUSIONES.....	121
7.	RECOMENDACIONES .....	122
7.1	TRABAJO FUTURO. ....	122
	BIBLIOGRAFÍA .....	124

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1.	Características de hidrógeno .....	26
TABLA 2.	Pines de conexión del sensor AMS HPS – 100 .....	28
TABLA 3.	Características de típicas del sensor HPS-100 .....	28
TABLA 4.	Características eléctricas sensor HPS-100 .....	28
TABLA 5.	características eléctricas y de funcionamiento sensor 1136 .....	30
TABLA 6.	Velocidad de Trasmisión del CAN bus respecto a la distancia .....	33
TABLA 7.	Comparación de herramientas de visualización en Python .....	37
TABLA 8.	Medidas prácticas de voltaje y corriente CFIS .....	115

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Representacion general de los campos electricos de la celda.....	20
<b>Figura 2.</b> Construccion de la CFIS .....	21
<b>Figura 3.</b> Representacion del movimiento de los campos electricos.....	22
<b>Figura 4.</b> Implementación CFIS.....	24
<b>Figura 5.</b> Diagrama general, sensores y procesos.....	25
<b>Figura 6.</b> Partes principales y vista de conectores del sensor AMS HPS-1 .....	27
<b>Figura 7.</b> Trama de datos generada por el sensor AMS HPS-100 .....	29
<b>Figura 8.</b> Arquitectura Sensor de flujo.....	29
<b>Figura 9.</b> Arquitectura electronica tarjeta PiCAN 2.0.....	32
<b>Figura 10.</b> Conexión terminal screw o tornillo .....	32
<b>Figura 11.</b> Pines de coneccion tarjeta Rapsberry pi3.....	34
<b>Figura 12.</b> Esquema de conexión sensores de energia .....	35
<b>Figura 13.</b> Diagrama circuital sensores de energia y flujo.....	35
<b>Figura 14.</b> Circuito impreso de sensores y conversores. .....	35
<b>Figura 15.</b> Diseño del proceso de adquisición, programación, despliegue y almacenamiento de datos .....	36
<b>Figura 16.</b> Directorio de trabajo, area de trabajo y directorio de Git.....	39
<b>Figura 17.</b> Funcionamiento de la plataforma Heroku .....	41
<b>Figura 18.</b> Esquema del funcionamiento del patron MVC .....	43
<b>Figura 19.</b> Interfaz de visualización web en Dash Plotly. ....	44
<b>Figura 20.</b> Captura de pantalla del menu de parámetros.....	45
<b>Figura 21.</b> Gráficas simultaneas e individuales en Dash Plotly.....	46
<b>Figura 22.</b> Elementos de visualización para sensores de energía .....	47
<b>Figura 23.</b> Elementos de visualización para las señales de control. ....	47
<b>Figura 24.</b> Caputra de pantalla de aplicación web en dispositivos móviles.....	48
<b>Figura 25.</b> Diagrama general para el sistema de control.....	50

<b>Figura 26.</b> Metodología para el diseño del sistema de control.....	51
<b>Figura 27.</b> Esquema de control para la CFIS.....	52
<b>Figura 28.</b> Plano del circuito de potencia .....	55
<b>Figura 29.</b> Etapa A de Potencia .....	56
<b>Figura 30.</b> Etapa A y B de potencia.....	57
<b>Figura 31.</b> Simplificacion MOSFET IRFZ44N.....	58
<b>Figura 32.</b> Circuito impreso en PCB MOSFET .....	59
<b>Figura 33.</b> Curvas de reacción de la planta.....	60
<b>Figura 34.</b> Ejemplo curva de reacción y parámetros.....	62
<b>Figura 35.</b> Valores de la función $f2x$ de la ecuación (13). .....	64
<b>Figura 36.</b> Respuesta escogida para estimación de la planta.....	66
<b>Figura 37.</b> Planta identificada en la estimación teórica.....	68
<b>Figura 38.</b> Planta identificada en Matlab.....	69
<b>Figura 39.</b> Repuesta de un modelo que cumple el principio de Smith. .....	70
<b>Figura 40.</b> Modelo interno predictor de Smith. .....	71
<b>Figura 41.</b> Estructura del predictor simplificada. ....	72
<b>Figura 42.</b> Respuesta a escalón unitario del control PID. ....	74
<b>Figura 43.</b> Respuesta a escalon para la planta CFIS.....	75
<b>Figura 44.</b> Arquitectura de control con PI.....	76
<b>Figura 45.</b> Respuesta a escalon del controlador PI.....	76
<b>Figura 46.</b> Respuesta subamortiguada del controlador PI. ....	77
<b>Figura 47.</b> Estructura de control para simulación del predictor de Smith .....	79
<b>Figura 48.</b> Respuesta del Predictor de Smith vs PI.....	81
<b>Figura 49.</b> Predictor de Smith vs predictor de Smith filtrado. ....	84
<b>Figura 50.</b> Diagrama de Bode del Predictor de Smith vs PI. ....	85
<b>Figura 51.</b> Respuesta en frecuencia del modelo nominal y modelos con perturbaciones. ....	86

<b>Figura 52.</b> Predictor de Smith filtrado con $\alpha = 20$ .....	87
<b>Figura 53.</b> Margenes de estabilidad de planta P1 en lazo abierto.....	87
<b>Figura 54.</b> Predictor de Smith con nuevo filtro. ....	88
<b>Figura 55.</b> Respuesta con los filtros de rechazo de perturbaciones.....	95
<b>Figura 56.</b> Comparación de filtros para el Predictor de Smith .....	96
<b>Figura 57.</b> Recuento de controladores simulados.....	97
<b>Figura 58.</b> Simulación del proceso de control. ....	98
<b>Figura 59.</b> Gráficas del proceso nominal en simulink.....	100
<b>Figura 60.</b> Gráficas del proceso nominal con diferentes filtros en simulink.....	102
<b>Figura 61.</b> Gráficas del proceso con desajuste y diferentes filtros en simulink. ..	103
<b>Figura 62.</b> Resultados de concentración y flujo.....	109
<b>Figura 63.</b> Resultados de la señal de control. ....	110
<b>Figura 64.</b> Resultados de consumo energético del reactor (CFIS).....	111
<b>Figura 65.</b> Resultados de la generación energética del panel solar.....	112
<b>Figura 66.</b> Resultados del consumo energético de la batería. ....	112
<b>Figura 67.</b> Seguimiento de referencia múltiple para la CFIS.....	113
<b>Figura 68.</b> Conexión en serie y paralelo CFIS.....	114
<b>Figura 69.</b> Disposición de las CFIS en uno y en dos recipientes. ....	115
<b>Figura 70.</b> Establecimiento concentración de hidrógeno.....	117
<b>Figura 71.</b> Simulación para control de almacenamiento con dos celdas en paralelo. ....	118
<b>Figura 72.</b> Celdas en paralelo siguiendo multiples referencias sin perturbación.	119

1

I

## INTRODUCCIÓN

En las últimas décadas, el crecimiento del consumo mundial de energía basado en combustibles fósiles ha incrementado la contaminación y el deterioro del medio ambiente acentuando el cambio climático. Esta problemática ha impulsado la investigación y desarrollo de fuentes energéticas alternativas, una de ellas es el hidrógeno, “el cual surge como un potencial candidato avalado por ser el combustible con la mayor energía específica, por ser respetuoso con el medio ambiente y por ser de gran abundancia” 1. “Sin embargo, este elemento no se encuentra de forma libre, por lo que deben realizarse procesos de extracción en los compuestos en que se encuentra” 2.

Recientemente, el grupo de investigación del Departamento de Química (Estudio de sistemas contaminantes), liderado por el Dr. Juan José Lozada en colaboración con el departamento de Electrónica en la Universidad de Nariño, han desarrollado proyectos para monitorear la generación de gas hidrógeno a partir de compuestos orgánicos e inorgánicos como fuente alternativa de energía por medio de una celda electrolítica. Esto es evidenciado en 2, un trabajo de grado en donde se propuso un sistema de hardware y software para la adquisición y monitorización, denominado MHYDROS. Sin embargo, al día de hoy los requerimientos de un sistema de monitorización remoto y un sistema de control de almacenamiento son importantes para continuar con la investigación.

Durante mucho tiempo, la disponibilidad de un sistema adecuado para el almacenamiento de hidrógeno fue uno de los mayores obstáculos para su uso a gran escala, sobre todo en el sector de transporte. Tal y como se explica en 3, los problemas para confinar el hidrógeno se derivan de sus características físicas y químicas, ya que el gas hidrógeno tiene una gran difusividad y permeabilidad lo que hace que sea capaz de difundirse incluso a través de sólidos, resultando en la pérdida del combustible almacenado. “Si bien, en la actualidad existen diversos métodos de almacenamiento de hidrógeno tales como gas, líquido criogénico y gas crio comprimido, varios de ellos se enfocan en un método mecánico y físico-químico de almacenamiento” 4. Por esta razón, se trabajó en un sistema electrónico automatizado de control, en donde el hidrógeno se almacenará en forma de gas en un tanque de vacío por medio de un compresor o una bomba de inyección.

En la literatura se evidencian diversas investigaciones en el ámbito del almacenamiento de hidrógeno y su transporte, sin embargo, los costos de estas son de talla industrial y de una gran dificultad de consecución en el mercado nacional. Además, actualmente son pocas las investigaciones que muestren una mejor

representación de la automatización y control enfocada en un campo de aplicación directa del uso de hidrógeno como un combustible alternativo. Un claro ejemplo se presenta en 5 en donde se estudia el hidrógeno como una alternativa de combustible para vehículos, siendo el gas hidrógeno almacenado en pilas de combustible que, si bien diversifican las fuentes de energía, también son de un costo alto de manufactura y distribución.

Conforme al anterior planteamiento, en el presente documento se mostró el desarrollo de la investigación acerca un sistema de control adecuado para monitorizar los sensores y variables de interés a través de una aplicación web, que también cuenta con un sistema de energización fotovoltaico siendo consecuentes con el uso de energías alternativas. Todo este diseño tuvo el propósito de almacenar el hidrógeno generado por la CFIS de manera apropiada y automatizada haciendo uso de herramientas de desarrollo como Raspberry, entornos de trabajo en servidores y soluciones IoT en conjunto con estrategias de control y modelamiento de sistemas dinámicos.

Para tal motivo se presentó el desarrollo de este trabajo organizado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se realizó la introducción al proyecto, planteando la revisión de las tecnologías y metodologías sobre las cuales se trabajó. Siguiente a esto, en el Capítulo 2 se hizo un estudio sobre los sensores y hardware adecuado para la adquisición de datos en Raspberry. En el Capítulo 3 se presentó el desarrollo de la interfaz de recopilación y análisis de datos a través de una aplicación web, en el Capítulo 4 se estudió y desarrollo un sistema de control para el almacenamiento de hidrógeno basado en el manejo de un actuador que está relacionado con la concentración de hidrógeno. En consecuencia, se presentaron los resultados del sistema de control, la interfaz web y la adecuación en hardware pertinente para el sistema en el Capítulo 5 y finalmente, en el Capítulo 6 se expusieron las conclusiones y se hizo un breve análisis sobre la implementación a escala del sistema desarrollado en esta investigación para un conjunto de celdas.

**Modalidad:** Investigación.

**Línea:** Gestión energética, Automatización y control.

## **Descripción del problema**

Actualmente el consumo energético se ha convertido en una de las problemáticas de movilidad y energización más preocupantes, debido al crecimiento demográfico y a la extrema utilización de combustibles fósiles que tiene el planeta, pues si bien las aplicaciones de transporte y utilización de energía producto de combustibles fósiles son las más utilizadas, la problemática no solamente se enfoca en el sector económico y social, sino también en el sector ambiental y tecnológico.

Por la tanto, siendo la Universidad de Nariño precursora en la investigación con investigadores como el Dr. Juan José Lozada quién tiene una tecnología desarrollada con avances acerca en la generación de hidrógeno, es cuando surge la necesidad de complementar diferentes áreas del conocimiento y de alguna manera buscar una interdisciplinariedad entre programas académicos para lograr mejorar lo que ya se ha obtenido. Un ejemplo claro de lo mencionado es el trabajo de los programas de electrónica y química.

El problema de esta investigación en particular residió en la ejecución y manipulación de las celdas de flujo iónico selectivo - CFIS y el sistema de almacenamiento de hidrógeno, el cual se manejaba de manera manual y mecánica, lo que conlleva al sistema a una baja eficiencia energética, una alta incertidumbre en la adquisición de datos y una baja fidelidad en los tiempos de funcionamiento. Por esta razón, el propósito y los objetivos de esta investigación estuvieron enfocados en desarrollar un sistema de control para la monitorización y visualización de las variables de interés y el estado del sistema de generación, almacenamiento y consumo.

Por lo anterior, basados en la tecnología CFIS “No. patente internacional PCT/IB2018/058596, No. NC2017/0012602, Resolución No 17294” 7 es que se busca una correcta automatización del sistema y accesibilidad completa de la interfaz de comunicación, como también, la selección de los sensores adecuados para una buena caracterización de los procesos mencionados anteriormente. Además, se propuso el pertinente acoplamiento del sistema de energización, que para este caso funciona de manera autosustentable con un sistema de energía fotovoltaica.

## **Objetivo general**

- Desarrollar un sistema de control para el almacenamiento de hidrógeno generado a partir de un reactor de CFIS, energizado con un sistema fotovoltaico.

## **Objetivos específicos**

- Caracterizar el proceso de almacenamiento del hidrógeno generado a partir de una CFIS, estudiando los métodos de almacenamiento y funcionamiento de los sensores requeridos.
- Realizar el sistema de adquisición y visualización de las variables de generación y almacenamiento de hidrógeno y del suministro energético del sistema fotovoltaico.
- Diseñar e implementar el sistema de control y automatización para el almacenamiento de hidrógeno.
- Validar la estrategia de control desarrollada en una simulación de un sistema de múltiples CFIS.

## Justificación

Evaluando y conociendo la problemática mundial en energización y exceso de uso en combustibles fósiles, se justifica una clara necesidad de utilizar combustibles amigables y alternativos que se puedan manipular y de alguna manera cambiar las formas convencionales de industria y desarrollo.

La generación de hidrógeno se realiza al aprovechar las características físico-químicas que presenta la materia orgánica (excrementos), “estos tienen gran variedad de elementos químicos, además, el hidrógeno es altamente inflamable, volátil y proclive a formar compuestos con otras partículas” 1; el hidrógeno, con estas características se produce en las CFIS y ha sido un generador de varias líneas de investigación en el proceso de manipulación y aprovechamiento del mismo, como en la automatización y control para su almacenamiento.

Por lo tanto, tras conocer los procedimientos empíricos en los cuales se desempeñó el proceso de almacenamiento, generación y energización que las celdas tenían en los reactores anteriores, es cuando se evidenció la necesidad de automatizar y controlar electrónicamente los procesos que se habían implementado para lograr un mayor aprovechamiento de los recursos y solventar la adquisición y manipulación de las variables de una manera mucho más confiable.

Lo más importante en esta investigación fue la buena caracterización del sistema y la identificación clara de los procedimientos que tendrían una mayor intervención de la electrónica. Para este caso, la propuesta hizo énfasis en controlar el almacenamiento y monitorizar y mejorar en cierta manera lo que se había implementado en la patente de las CFIS “No. patente internacional PCT/IB2018/058596, No. NC2017/0012602” 7 respecto a generación, apoyados de una tarjeta de desarrollo Raspberry Pi, bajo lenguaje de programación (PYTHON) e incluyendo sensores de concentración de hidrógeno, voltaje, corriente, flujo y presión.

Además, se evalúo un posible campo de estudio, escalando el reactor, aumentando el número de celdas (CFIS) y las baterías de energización, produciendo una mayor demanda de energía requerida por el sistema y una visualización en una pantalla interactiva con el usuario. El proyecto se vio motivado por una implementación en un vehículo experimental y la obtención de los resultados al tener inmersa a la electrónica y volver la propuesta una idea mucho más versátil y completa.

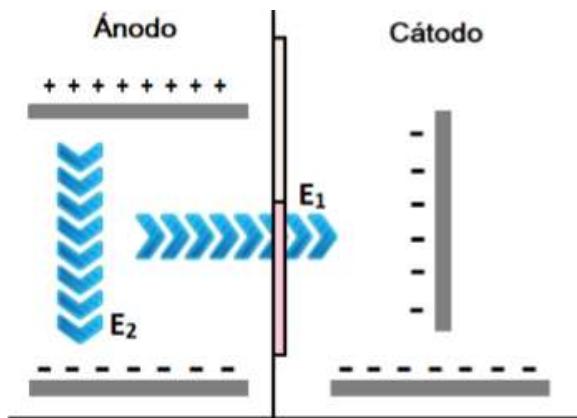
## 1. CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE ALMACENAMIENTO GENERADO A PARTIR DE UNA CFIS.

La sigla CFIS denominada así por su nombre “Celda de flujo iónico selectivo”, es un reactor diseñado para la producción de hidrógeno gaseoso a partir de orina humana mediante电解sis. Su patente e invención corresponde al docente de la Universidad de Nariño Juan José Lozada Castro con su registro (No. patente internacional PCT/IB2018/058596, No. NC2017/0012602, Resolución SIC N° 17294) y los aportes desde el grupo de investigación en estudios de sistemas contaminantes del departamento de química de la Universidad de Nariño.

La CFIS es un sistema que entre su estructura posee un par de membranas que sirven de intercambiador de sustancias entre el ánodo y el cátodo selectivos a determinadas especies, además cuenta con un sistema de puentes eléctricos que ayudan a direccionar iones por caminos determinados debidos a los campos eléctricos como se muestra en la **Figura 1**.

A causa de lo anterior esta celda electrolítica lleva el nombre de célula de flujo iónico selectivo 7.

**Figura 1.** Representación general de los campos eléctricos de la celda.



Fuente: Tomada de 7

## 1.1 FUNCIONAMIENTO CFIS.

En este apartado se despliega el sistema de generación de hidrógeno y se detalla de mejor manera el desempeño de la CFIS. La celda tiene un sistema de membranas entre el cátodo y el ánodo, una membrana que es de nafion y otra de papel film o celofán. El compartimiento del PVC presenta orificios para el intercambio y las membranas son adheridas con cinta y pegamento para que de esta manera el cátodo y el ánodo no se comuniquen o hagan contacto directamente, sino con el intercambio protónico a través de ellas y la diferencia de potencial.

El cátodo y el ánodo dispuestos en su diseño hacen un transporte eléctrico de manera selectiva para conseguir una generación de hidrógeno con valores superiores al 90% de concentración, producto de que las reacciones electroquímicas queman hasta un 150% de la energía aplicada y por lo tanto el hidrógeno gaseoso generado tiene un alto índice de pureza. “Cabe aclarar que el 10% restante de la reacción se presenta en forma de vapor de agua” 7.

En la **Figura 2**, se muestra la construcción de la celda y el sistema de membranas mencionadas anteriormente. cabe resaltar que la elaboración de la celda se hizo de manera manual por el docente inventor Juan José Lozada y los estudiantes autores de esta investigación.

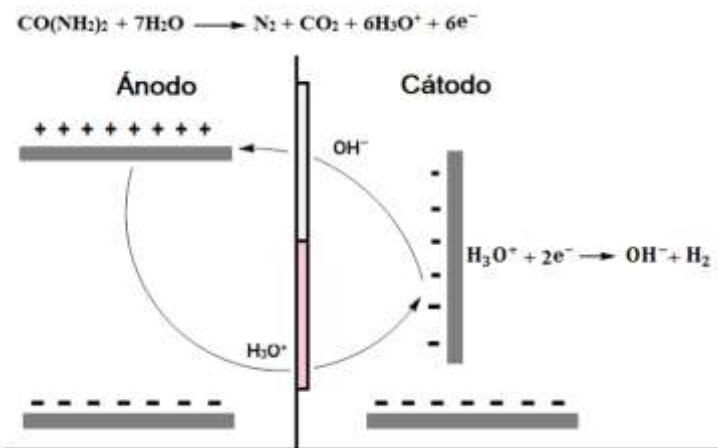
**Figura 2.** Construcción de la CFIS



Fuente: Registro Fotográfico, Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Debido a la configuración de la CFIS, la tendencia en el ánodo es que los iones  $\text{H}_3\text{O}^+$  producidos tras la oxidación en las placas positivas migren hacia las placas negativas del mismo compartimento a causa de la diferencia de potencial. Sin embargo, en este sistema los iones se desvían de su primera trayectoria hacia el cátodo atravesando la membrana de intercambio catiónico (Nafion), membrana inferior en la **Figura 3**. También es posible que una determinada fracción de protones atraviesen la membrana stretch (membrana superior en la **Figura 3**) debido a que los protones caben cómodamente por los poros de este film que tiene un tamaño de poro alrededor de los 30 Å, “mientras que los iones hidronio tienen un tamaño cercano a los 3 Å y no habría impedimento alguno para su trasferencia” 8.

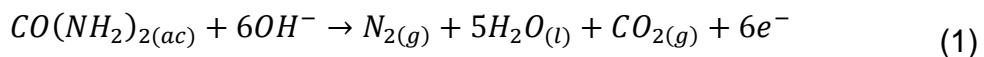
**Figura 3.** Representacion del movimiento de los campos electricos.



Fuente: Tomada de 8.

A pesar del uso de diversos electrolitos, los experimentos se realizaron en el ánodo con urea y unas sustancias “siempre en medio básico” y el cátodo en “medio ácido”. Las reacciones electroquímicas que ocurren para generar hidrógeno en la CFIS están representadas en las siguientes ecuaciones

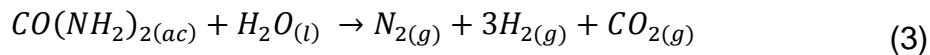
## Anodo



## Catodo



Ecuacion total



En el ánodo, la urea se oxida en medio alcalino produciendo nitrógeno, agua, dióxido de carbono y electrones. Estos electrones viajan hasta el cátodo donde se reduce el agua y se genera hidrógeno e iones hidroxilo, que son la materia prima y el elemento a manipular que son uno de los ejes centrales por los cuales se desarrolló esta investigación.

### 1.1.1 Implementación de la celda

La celda tiene disoluciones acuosas. “En el anodo existe un medio básico que es la orina o úrea y en cátodo está la solución ácida de agua y ácido fosfórico alrededor de una concentración del 80%” 7.

Mediante experimentos y montajes previos de la celda se determinaron algunas características y condiciones óptimas de los electrolitos y las distancias entre las membranas y la placa de acero para una mayor eficiencia de producción de hidrógeno gaseoso.

#### 1.1.1.1 Reactivos del ánodo.

- Orina
- Úrea sólida
- Azúcar
- Hidróxido de sodio.

#### 1.1.1.2 Reactivos del Cátodo

- Agua
- Ácido Fosfórico

En la **Figura 4** se muestra la CFIS en funcionamiento, donde se observa claramente la disolución acuosa del anodo compuesta de los reactivos anteriormente mencionados. De igual manera las burbujas presentes en el recipiente, son muestra

de que el intercambio protónico se está dando de manera óptima entre las membranas.

**Figura 4. Implementación CFIS.**



Fuente: Registro Fotografico, Carlos Benavides, Cristian Enriquez

## **1.2 MONTAJE EXPERIMENTAL CFIS Y SENSORES.**

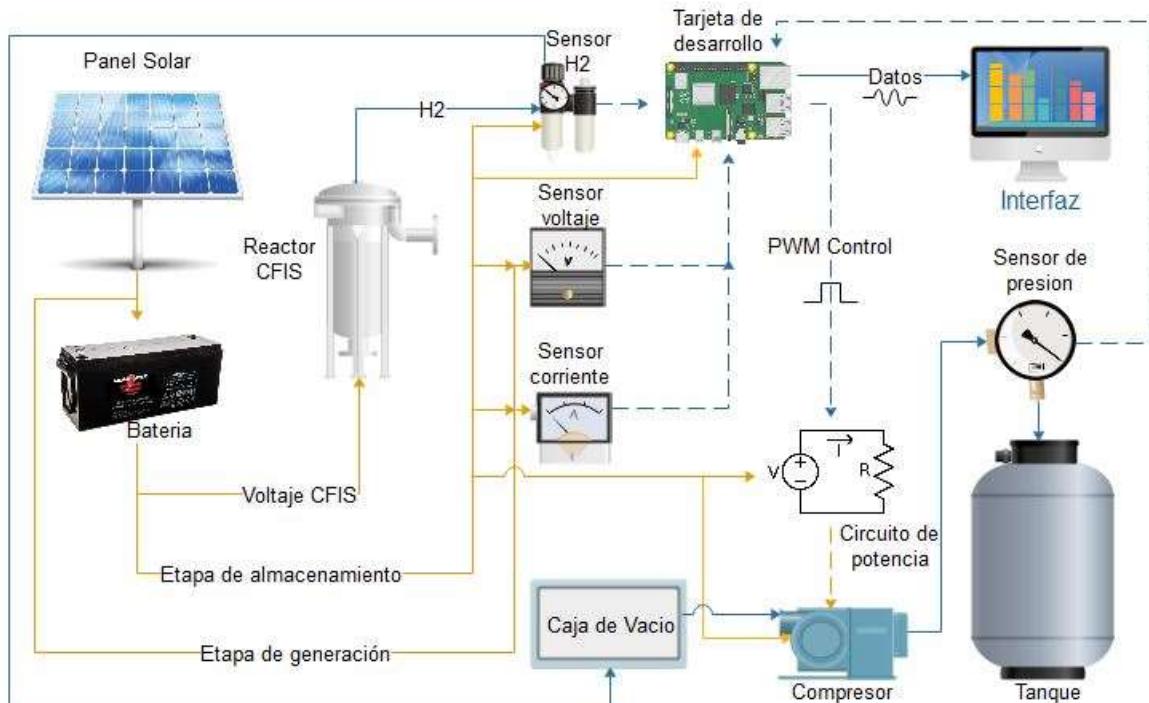
Para la implementación del sistema de generación y almacenamiento de hidrógeno, se dio continuidad al montaje experimental desarrollado por el docente responsable y los estudiantes antecesores de esta tecnología referenciados en 2, 7 y 8. Se tienen en cuenta los elementos de laboratorio y los dispositivos electrónicos adecuados

para el desarrollo del mismo junto los ajustes realizados por los autores de este documento y el acompañamiento por parte del asesor de esta investigación.

En el presente capítulo se expone acerca de las tecnologías, sensores, protocolos de comunicación y propiedades del hidrógeno, como elemento químico al cual, se le aplican los métodos de medición y control aplicables en el proyecto.

Además, también se realiza una exploración de las propiedades y comportamiento del gas hidrógeno, como también un estudio de los sensores idóneos que se usaron para el desarrollo de esta investigación. Para tal motivo, en la **Figura 5** se muestra el diagrama general de conexión con los transductores y los diferentes procesos que se llevaron a cabo.

**Figura 5.** Diagrama general, sensores y procesos.



Fuente: Realizada en Edraw Carlos Benavides, Cristian Enriquez.

### 1.2.1 Hidrógeno

El hidrógeno es el elemento químico de numero atómico 1, que se representa por el símbolo H, es el más ligero y el de la molécula más pequeña de todos los elementos de la tabla periódica. “Además, es el elemento más abundante en el universo, como consecuencia se encuentra presente en el 75% de la materia, aunque no en forma elemental” 8.

Al mismo tiempo, el hidrógeno a temperatura ambiente se presenta como una molécula diatómica llamada, di hidrógeno representada por H<sub>2</sub>, compuesta por dos átomos de hidrógeno. “Es un gas insípido, incoloro e inodoro, siendo el menos denso de los elementos químicos y tiende a disiparse rápidamente después de ser liberado” 9.

La **TABLA 1** muestra las propiedades básicas y químicas del hidrógeno 10.

TABLA 1. CARACTERÍSTICAS DE HIDRÓGENO

Átomo de Hidrógeno
Numero atómico: 1
Peso atómico: 1.00782519 u
Molécula de Hidrógeno
Formula: H <sub>2</sub>
Estructura química: H-H
Apariencia: Gas incoloro e inodoro a temperatura ambiente
Densidad (gas): 0.0899 kg/m <sup>3</sup> (0°C, 1 atm)
Límites de explosión: 4-76% (vol. % en aire)
Temperatura de auto ignición: 500-571 °C
Coeficiente de difusión: 0.61 cm <sup>2</sup> /s (en aire)
Energía de ignición: 0.017 mJ (en aire)

\*Temperatura Ambiente: 20- 25 °C aproximadamente

Fuente: Tomada de 2

### 1.2.1.1 Sensor de hidrógeno AMS HPS-100

Con una base de datos previa en el trabajo de grado de Cristian Casanova en 2, se manipuló el sensor AMS HPS-100 y se evaluó un mismo rango de operación porcentual de concentración de hidrógeno de 0 a 100%. El sensor empleado es un dispositivo de funcionamiento térmico que internamente posee una unidad de procesamiento que recoge la señal del sensor semiconductor para convertirla a mensajes digitales que cumplen con el protocolo CAN.

Este sensor está diseñado para la conexión en proceso a través de una rosca tipo tornillo con la cual se conecta y asegura el sensor a la línea de proceso en la que se realiza la medición de hidrógeno. Posee tres partes características como se muestra en la **Figura 6**.

**Figura 6.** Partes principales y vista de conectores del sensor AMS HPS-1.



Fuente: Tomada de 2

Su disposición normal de trabajo es vertical con el conector de energía y bus CAN en la parte superior y en la parte inferior el conector tipo tornillo. El conector eléctrico del sensor posee 4 pines como se observa en la **Figura 6** que corresponden a pines de conexión como se muestra en la **TABLA 2**, más adelante se muestran otras características propias del sensor.

TABLA 2. PINES DE CONEXIÓN DEL SENSOR AMS HPS – 100

Pin	Función	Pin	Función
1	VCC	2	CAN H (High)
3	GND- Tierra	4	CAN L (Low)

Fuente: Tomada de 2

En la **TABLA 3** y en la **TABLA 4**, se muestran las características típicas, eléctricas y rangos específicos de funcionamiento del sensor extraído de 2.

TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE TÍPICAS DEL SENSOR HPS-100

Descripción	Valor	Descripción	Valor
Gas Objetivo	Hidrógeno	Sensibilidad	Ninguna de HC, H2S, CO, CO2, NOx
Rango	0-100%Vol. H2 en Aire	Influencia de la humedad	Dependiendo de la aplicación +-1% Vol. – Corrección substrayendo 1.5%
Precisión	+/- 2%Vol.	Tiempo de inicio	<5seg
Tiempo de respuesta (t90)	<5seg	Tiempo de Vida	5 años o 3000 horas de operación
Velocidad de Recuperación	<5seg	Rango de temperatura	-40°C a 90°C

TABLA 4. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS SENSOR HPS-100

Descripción	Valor	Descripción	Valor
Rango de Voltaje	8.5-16V	Consumo de corriente	70mA típicos @ 13.8V y 20°C Fase de inicio <200mA <1seg

Interfaz CAN	Versión 2.0 ISO 11898	Conektor	MQS de 4 Pines
Precisión	+/- 2%Vol.	Protección contra descarga electrostática	Protección ESD/ Polaridad invertida
Tiempo de respuesta (t90)	<5seg	Tiempo de Vida	5 años o 3000 horas de operación

Fuente: Tomada de 12

#### Trama de datos generada sensor hidrógeno.

“El sensor genera una trama de datos adecuada para el bus CAN después de 5 segundos de energización del dispositivo con una velocidad de 500kbps, el ID de identificación CAN es 1120 (0x0460)” 12. El sensor trasmite un conjunto de 8 bytes en formato hexadecimal, como se muestra en la **Figura 7**

**Figura 7.** Trama de datos generada por el sensor AMS HPS-100,

Byte 0	Byte 1	Byte 2	Byte 3	Byte 4	Byte 5	Byte 6	Byte 7
Concentración de H2	Estado del sensor	Temperatura de la tarjeta interna	Versión del software	Versión del hardware	Contador de mensaje	Sin uso	

Fuente: Tomada de 12

#### 1.2.1.2 Sensor de flujo.

El sensor 1136 con +/- 2kpa de rango, posee una salida radiométrica con respecto a la diferencia de presión presente en los dos terminales que posee. Internamente el transductor convierte la presión diferencial a una señal eléctrica. En la **Figura 8** se muestra la arquitectura del sensor y **TABLA 5** se muestran las características eléctricas y de funcionamiento.

**Figura 8.** Arquitectura Sensor de flujo.



Fuente: Tomada de 2

TABLA 5. CARACTERÍSTICAS ELÉCTRICAS Y DE FUNCIONAMIENTO SENSOR 1136

Características de funcionamiento		Características Eléctricas	
Descripción	Valor	Descripción	Valor
Tipo de sensor	Presión diferencial en gases	V de alimentación DC	4.8 – 5,3 V
Salida del Sensor	Radiométrica	Consumo de corriente	10 mA
Presión diferencial min/max	+/- 2 kPa	Impedancia de Salida	
Presión máxima	75 kPa	Voltaje mín de salida	5 mV
Resolución de presión	5 Pa	Voltaje máx de salida	4,5 V
Error en la medida	+/- 6.5%		
Tiempo de respuesta	1ms		

Fuente: Tomada de 12

La diferencia de presión es directamente proporcional al voltaje de salida con una tolerancia de +/- 6,5%, además cada variación del valor de flujo volumétrico del hidrógeno que atraviesa el sensor se obtiene indirectamente basado en la presión diferencial que genera el fluido al estrecharse el tubo que lo contiene. Esta

aplicación se basa en el principio de la conservación de la energía y masa de flujo, tomando la diferencia de presión que existe entre dos puntos de diferencia área 2.

### **1.2.1.3 Tarjeta PiCAN 2.0**

La tarjeta PiCAN 2.0 proporciona la capacidad de CAN-Bus para la tarjeta de procesamiento digital de esta investigación que es Raspberry Pi.

Utiliza el Controlador CAN Microchip MCP2515 con transceptor CAN MCP2551, donde sus conexiones son hechas a través de DB9 o terminal de tornillo de 4 vías, los cuales serán explicados posteriormente. En esta placa también está disponible un pin 5V a 1A SMP el cual se puede alimentar a través del terminal de tornillo o el conector DB9 Controlador SocketCAN fácil de instalar. Otro aspecto para tener en cuenta es que la programación de configuración y ejecución se puede hacer en lenguaje C o Python, lenguaje de programación que es la base de esta investigación.

#### **1.2.1.3.1 Características Tarjeta PiCAN 2.0**

A continuación, se muestran las especificaciones y características del dispositivo electrónico PiCAN 2.0 y así mismo en la **Figura 9** se muestra la arquitectura de la tarjeta integrada.

- Velocidad de Trasmisión CAN v2.0B a 1 Mb / s
- Interfaz SPI de alta velocidad (10 MHz)
- Conexión CAN mediante conector sub-D estándar de 9 vías o terminal de tornillo
- Compatible con cable OBDII
- Puente de soldadura para establecer diferentes configuraciones para el conector DB9
- Terminal de 120Ω
- LCD en serie listo
- Indicador LED
- Impresión de pie para dos mini botones
- Cuatro agujeros de fijación para tarjeta Raspberry pi3
- Controlador SocketCAN, aparece como can0 para la aplicación

- Interrupción RX en GPIO25.

**Figura 9.** Arquitectura electronica tarjeta PiCAN 2.0,



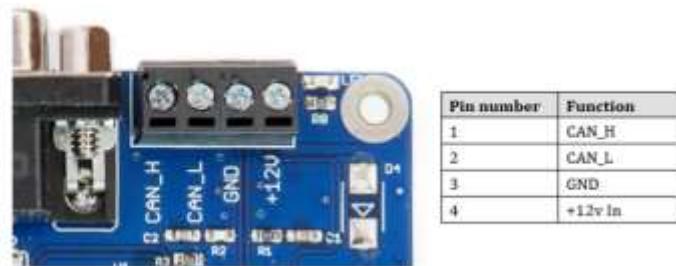
Fuente:Tomada de 12

#### 1.2.1.3.2 Instalación de hardware

Para la instalación de la placa, toca tener la seguridad de que la tarjeta Raspberry esté apagada, después alinear cuidadosamente el conector de 40 vías en la parte superior de la Pi. Se debe usar espaciador y tornillo (elementos opcionales) para asegurar en el tablero.

En este caso puntual por facilidad del cableado del sensor de hidrógeno AM HS-1000 mencionado en capítulos anteriores, la conexión CAN se realizó a través del terminal de tornillo de 4 vías, como se muestra en la **Figura 10**.

**Figura 10.** Conexión terminal screw o tornillo.



Fuente:Tomada de 12

Nota: La entrada + 12v solo se usa en la placa PiCAN2 con la opción SMPS instalada.

#### 1.2.1.4 Protocolo Can-Bus

El módulo PiCan 2.0 maneja una comunicación de tipo Can (*Controller Area Network*) de alta velocidad, aprovechando los módulos de comunicación SPI que posee Raspberry pi3. El manejo de los bytes de la trama de datos entregado por el sensor y la instalación del software se explica en el **Anexo A**.

La capacidad que tiene este protocolo permite trabajar con buses independientes y separar así las tareas de control netamente asociadas al reactor, tales como la concentración de hidrógeno y la temperatura. Además, es altamente utilizado en tareas de automatización como bus de campo, principalmente por el bajo costo de los controladores y procesadores CAN.

##### 1.2.1.4.1 Descripción del protocolo CAN

“El protocolo CAN está especificado en el estándar ISO 11898” 13, contiene diversas normas específicas para distintos aspectos del protocolo y diversos tipos de funcionamiento. Por ejemplo, la norma ISO 11898-2 estandariza el protocolo CAN de alta velocidad, alcanzando velocidades de hasta 1 MB/s, o la norma ISO 11898-3 que estandariza el protocolo CAN de baja velocidad tolerante a fallos. Cada norma o establecimiento define una descripción clara del comportamiento del protocolo CAN.

En la **TABLA 6** se hace una comparación respecto a la longitud del bus, la velocidad de trasmisión en bit/s y el tiempo que tarda en la trasmisión de datos.

TABLA 6. VELOCIDAD DE TRASMISIÓN DEL CAN BUS RESPECTO A LA DISTANCIA

Longitud del Bus	Velocidad en bits/s	Tiempo máximo de transmisión
Hasta 25m	1 Mbit/s	129 $\mu$ s
Hasta 100m	500 Kbit/s	258 $\mu$ s
Hasta 500m	125 Kbit/s	1032 ms
Hasta 1000m	50 Kbit/s	2580 ms

Fuente: Tomada de 3

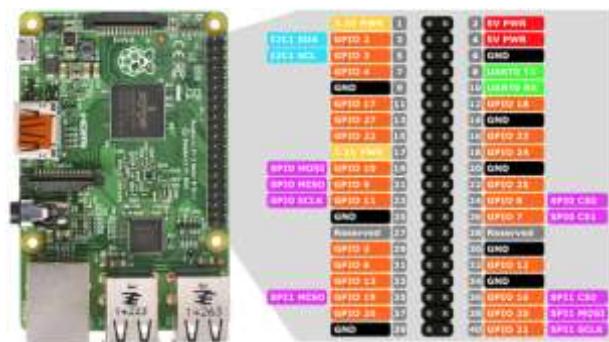
Tomando en cuenta el montaje experimental de la investigación con el protocolo en la tarjeta PiCAN 2.0 que fue explicada anteriormente, se afirma y se comprueba la fiabilidad de la comunicación del sensor de hidrógeno con la unidad de procesamiento con un cableado desde el sensor hasta la tarjeta de adquisición de datos que no sobrepasa los 2 metros y cumple con la velocidad y los parámetros de trasmisión 14.

## 1.2.2 Unidad de procesamiento

Para la presente investigación la unidad lógica de procesamiento que se implementó es un procesador integrado de software libre denominado Raspberry pi3 16.

En la **Figura 11** se muestra la arquitectura y los pinos de la unidad Raspberry pi3, en la cual se observan las conexiones utilizadas para los protocolos de comunicación, los conversores y la tarjeta PiCan 2.0 que corresponden a la implementación del hardware 17.

**Figura 11.** Pines de conexión tarjeta Raspberry pi3.



Fuente: Tomada de 15.

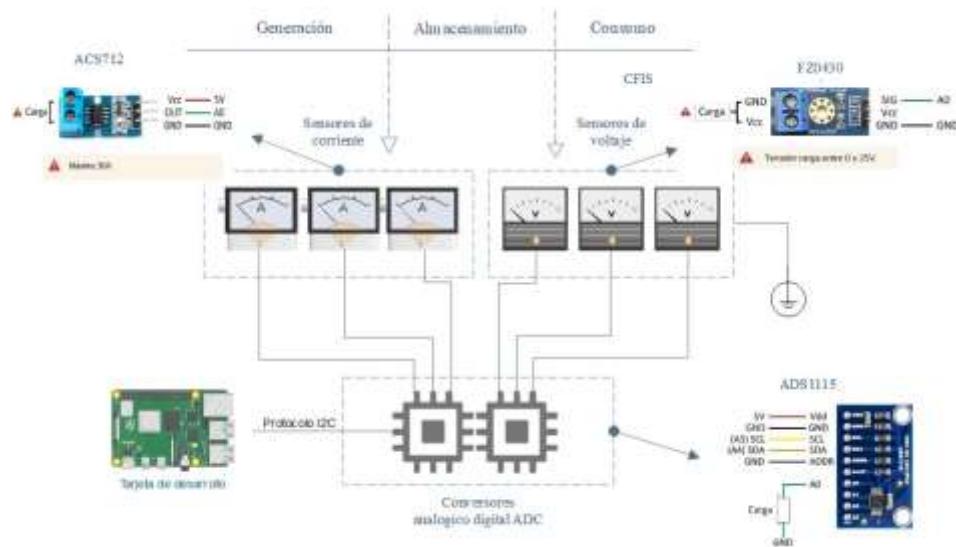
La Raspberry pi3 se conecta con la tarjeta Pican 2.0 para comunicarse con el sensor de hidrógeno. Si bien se dispone de 40 pines de conexión, “solo se utilizan los pines correspondientes a las funciones I2C y SPI para conectar los sensores analógicos con sus respectivos conversores analógicos-digitales” 17.

### 1.2.3 Sensores de energía

Los diferentes sensores utilizados para esta investigación registran los elementos de generación como el panel solar, de almacenamiento como lo es la batería y

consumo energético general de la CFIS en conjunto con todo el sistema de control para la CFIS. Entre ellos se encuentran el sensor de voltaje FZ0430 y el sensor de corriente ACS712, cada uno de ellos se comunica con la unidad de procesamiento (Raspberry) a través de un módulo de conversión analógico digital ADS1115, que es posible gracias al protocolo de comunicación I2C el cual tiene un rango de conversión de datos de 12 Bits y 4 entradas independientes. En la **Figura 12** se presenta el esquema de las conexiones para los sensores.

**Figura 12.** Esquema de conexión sensores de energía



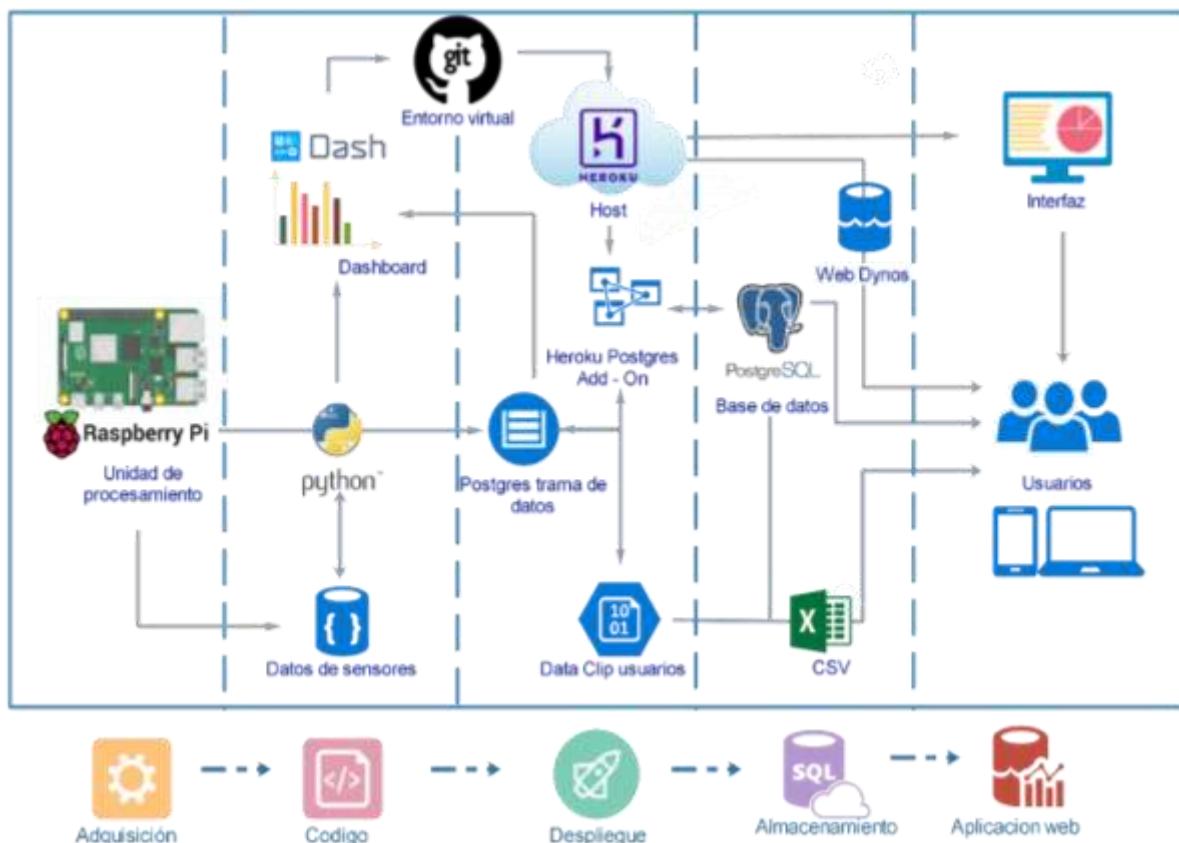
Fuente: Realizada en Edraw por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

- El sensor de voltaje FZ0430 utilizado en esta investigación es un transductor de voltaje que tiene dos puntos de resistencia, y puede hacer que el voltaje de entrada se reduzca hasta 5 veces el voltaje original. “También utiliza tecnología de 10 Bits, por lo que la resolución de este módulo es de aproximadamente 0.00489V” 18.
- El sensor de corriente ACS712 empleado en esta investigación es un sensor de efecto Hall que detecta el campo magnético que se produce por inducción de la corriente que circula por la línea que se está midiendo 19.
- En este caso, es indispensable utilizar un convertidor analógico digital (ADC) externo como el ADS1115, para la adquisición de las señales análogas de los sensores de voltaje y corriente anteriormente mencionados 20.

## 2. INTERFAZ DE VISUALIZACIÓN Y ADQUISICIÓN

Para comprender el diseño de la conexión web y la interfaz de usuario sobre la adquisición de datos, se diseñó un diagrama presentado en la **Figura 13** a manera de resumen. En este se observa toda la estructura y las instancias vinculadas a la investigación de una solución tipo IoT<sup>1</sup> sobre la programación, el despliegue y el almacenamiento en línea de una aplicación que visualiza datos en tiempo real sobre el control de almacenamiento de hidrógeno a partir de una CFIS.

**Figura 13.** Diseño del proceso de adquisición, programación, despliegue y almacenamiento de datos



Fuente: Realizada en Edraw por Carlos Benavides, Cristian Enriquez.

<sup>1</sup> El internet de las cosas, IoT, se refiere a la interconexión digital de los objetos cotidianos con internet.

## 2.1 GUI: INTERFAZ GRÁFICA

La tarjeta de desarrollo Raspberry Pi ofrece varias herramientas de desarrollo básicas y avanzadas. La más popular y base del funcionamiento de esta investigación es Python, un lenguaje de programación interpretado, dinámico y multiplataforma 24, que, por su soporte de orientación a objetos, entornos de trabajo para visualización de análisis de datos, creación de servidores y despliegue de aplicaciones web lo hace ideal para el trabajo de adquisición y visualización en tiempo real de manera remota para los sensores y el sistema de control.

Para desarrollar una GUI o interfaz gráfica de usuario en Python, se contemplaron 3 distintas herramientas de visualización: Matplotlib, Seaborn y Plotly. A continuación, se hace una comparación en base a los requerimientos del proyecto entre las 3 opciones.

TABLA 7. COMPARACIÓN DE HERRAMIENTAS DE VISUALIZACIÓN EN PYTHON

Criterio	Matplotlib	Plotly*	Seaborn**
Manejo y visualización	Librería de fácil acceso y desarrollo en Python	Servidor web y librería de fácil acceso en Python y R	Librería para Python basada en Matplotlib con gráficas avanzadas.
Herramientas de análisis interactivas avanzadas	Gráficos y esquemas básicos en Python, carece de herramientas interactivas	Manejo de diferentes tipos de gráficos, tablas y estadísticas de alto grado de interacción	Complementa a Matplotlib, en esquemas y gráficos estáticos
Entorno de trabajo	Python	Python-Dash	Python-Matplotlib
Conexión a la nube y despliegue	Servidor o Host independiente	Flask, Dash Enterprise, Heroku	Azure, Julia Wrapper
Base de datos y servidor	-	Soporte auto gestionado para Postgresql en Heroku y cualquier otro tipo de SQL	Mysql, Postgresql y cualquier tipo de SQL disponible en los servidores

independiente en los demás servidores

---

\*Plotly es una empresa de informática técnica con sede en Montreal, Quebec, que desarrolla herramientas de análisis y visualización de datos en línea, así como bibliotecas de gráficos científicos para Python, R, MATLAB, Perl, Julia, Arduino y REST.

\*\* Seaborn es una librería para Python que permite generar fácilmente elegantes gráficos. Seaborn está basada en Matplotlib y proporciona una interfaz de alto nivel de fácil manejo y aprendizaje.

---

Fuente: Desarrollada por los autores Cristian Enriquez, Carlos Benavides

Teniendo en cuenta lo anterior, la mejor herramienta para el desarrollo de la aplicación será Plotly por varias ventajas observadas en la **TABLA 7** frente a otras herramientas de visualización en Python.

## 2.2 DASH: ENTORNO DE TRABAJO

La plataforma Dash Plotly, es un Framework (entorno de trabajo) productivo de Python para crear aplicaciones web. Las aplicaciones de Dash son servidores web que ejecutan Flask y comunican paquetes JSON a través de solicitudes HTTP. “La interfaz de Dash procesa componentes usando React.js, además, la biblioteca de interfaz de usuario de JavaScript está escrita y mantenida por Facebook” 24.

Dash es ideal para crear aplicaciones de visualización de datos con interfaces de usuario altamente personalizadas en Python puro, posee un código de acceso abierto bajo licencia MIT y actualmente está impulsando aplicaciones de misión crítica en Fortune 500 26 de la mano de Amazon, Terpel, Target y Cisco.

### 2.2.1 Arquitectura y funcionamiento

Dado que las aplicaciones de Dash se ven en el navegador web, Dash es inherentemente multiplataforma y está listo para dispositivos móviles. Estas aplicaciones se basan en la creación de un servidor Flask para despliegue local o web, mientras, que su funcionamiento interno se debe a tres macro componentes compatibles con distintos navegadores: los componentes Dash HTML, Dash Core, y componentes externos Css. De esta manera se mezclan los componentes del

Layout principal similares a las GUI de desarrollo en Matlab y marcos responsivos desarrollados por Materialize, Bootstrap y Codepen<sup>2</sup>.

## 2.3 GIT: ENTORNO VIRTUAL Y REPOSITORIO

Con Git es posible controlar todos los cambios que se hacen en la aplicación y en el código, por ende, cuando se acaba de desarrollar una actualización de código en Python, se utiliza Git para mezclar los cambios con los otros integrantes, que en este caso serán únicamente el servidor web 28. Cabe resaltar que todo se trabaja desde una emulación BASH<sup>3</sup>, utilizada para ejecutar Git desde la línea de comandos similar a entornos UNIX Y LINUX<sup>4</sup>

### 2.3.1 Flujo de trabajo

Para trabajar en un entorno virtual en línea, se necesita crear un repositorio que contiene cada script y archivo de configuración que se ha desarrollado de manera local en un ordenador. Para esto, el flujo de trabajo básico en Git, descrito en la **Figura 14**, se puede resumir en los siguientes pasos:

- 1) Modificar una serie de archivos en el directorio de trabajo.
- 2) Preparar los archivos, añadiéndolos a el área de preparación.
- 3) Confirmar los cambios, es decir, tomar los archivos tal y como están en el área de preparación, y almacenar esas instantáneas de manera permanente en el directorio de Git.

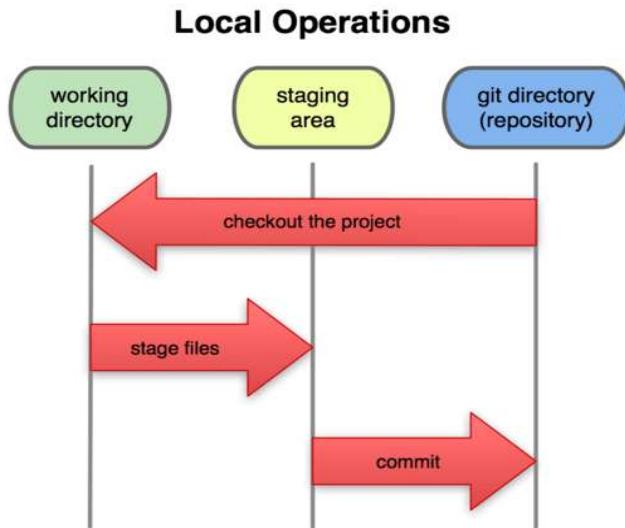
**Figura 14.** Directorio de trabajo, area de trabajo y directorio de Git.

---

<sup>2</sup> Bibliotecas multiplataforma o conjunto de herramientas de código abierto para diseño de sitios y aplicaciones web. Contienen plantillas de diseño y otros elementos basados en HTML y CSS, así como extensiones de JavaScript adicionales.

<sup>3</sup> Programa informático, cuya función consiste en interpretar órdenes, y un lenguaje de consola.

<sup>4</sup> Sistemas operativos de distribución y acceso gratuito con Kernel compartido.



Fuente: Tomado de 27

## 2.4 HEROKU: PLATAFORMA DE APLICACIONES EN LA NUBE

Heroku es uno de los PaaS<sup>5</sup> más utilizados en la actualidad en entornos empresariales por su fuerte enfoque en resolver el despliegue de una aplicación. Además, permite manejar los servidores y sus configuraciones, escalamiento y la administración. Solo se debe especificar qué lenguaje de backend (Python) se está utilizando o qué base de datos se va a utilizar mientras se trabaja únicamente en el desarrollo de la aplicación.

El panel de control intuitivo Heroku hace que sea fácil administrar la aplicación y obtener una mayor visibilidad del rendimiento, además este PaaS proporciona tres complementos de servicio de datos totalmente administrados: **Heroku Postgres**, Heroku Redis y Apache Kafka en Heroku.

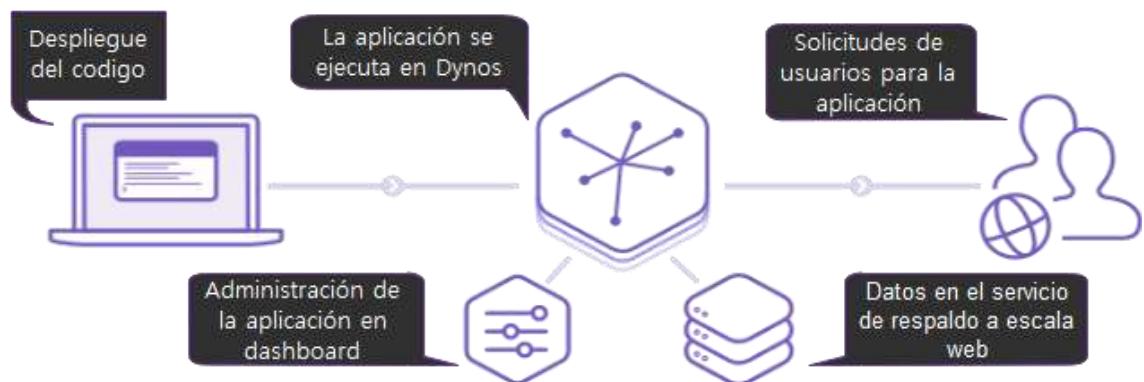
Tras implementar una aplicación en Git (explicado anteriormente) y previamente en Python, “Heroku ejecuta estas dentro de dynos: contenedores inteligentes en un entorno de tiempo de ejecución confiable y totalmente administrado” 30. Para

---

<sup>5</sup> Plataforma como servicio (PaaS) es un entorno de desarrollo e implementación completo en la nube, con recursos que permiten entregar todo, desde aplicaciones sencillas basadas en la nube hasta aplicaciones empresariales sofisticadas.

entender con mayor claridad el método de trabajo de la plataforma de desarrollo Heroku, se ha implementado el diagrama de la **Figura 15**.

Figura 15. Funcionamiento de la plataforma Heroku.



Fuente: Adaptado de 30

#### 2.4.1 Despliegue de aplicaciones Dash en Heroku

Dash usa Flask como servidor y soporte. Esto facilita su implementación, ya que se puede desarrollar una aplicación Dash tal como se haría con una aplicación Flask dado que, casi todos los proveedores de servidores en la nube tienen una guía para implementar aplicaciones de Flask, así como la tiene Heroku 30. Los pasos para despliegue de la aplicación en Heroku se explican detalladamente en el **Anexo E**, cada paso se ejecuta desde la ventana de comandos de Git Bash y se pueden resumir de la siguiente manera:

- 1) **Crear una ruta (carpeta) para el proyecto en la unidad de procesamiento local.**
- 2) **Inicializar la carpeta con git y un entorno virtual:** Se debe crear una instancia nueva en Python y se agrega la dependencia de gunicorn<sup>6</sup>.

---

<sup>6</sup> Servidor WSGI HTTP de Python utilizado para administrar peticiones simultáneas entre usuarios y desarrolladores.

- 3) **Agregar código fuente y archivos de configuración:** Además de la aplicación principal en Python se debe crear un archivo **gitignore**, **requirements.txt** y un **Procfile** para la implementación, tal como se muestra en el Anexo D.
- 4) **Inicializar Heroku, agregar los archivos al repositorio en Git y desplegar:** Como se explica en la anterior sección, los archivos de Git deben ser compartidos con el servidor.
- 5) **Actualización del código y múltiple despliegue:** Una vez es creado un entorno virtual y repositorio en Git que se vincula a Heroku, es posible modificar la aplicación localmente.

## 2.5 POSTGRESQL: BASE DE DATOS

PostgreSQL es un sistema robusto de base de datos relacional de objetos de código abierto con más de 30 años de desarrollo activo, el cual se ha escogido como base de datos central, debido a que “Heroku tiene el servicio de Host auto sustentado y totalmente gratuito para 10000 datos con el 99.5% de tiempo de respuesta por medio del complemento Heroku Postgres” <sup>32</sup>. Su funcionamiento es simple y similar a todos los entornos de trabajo que utilizan SQL<sup>7</sup>, además, con la base de datos será posible almacenar datos de los sensores para poder visualizarlos en Dataclips o CSV

## 2.6 APPLICACIÓN WEB E INTERFAZ DE USUARIO

Como producto final se ha implementado una aplicación web analítica interactiva, la cual permite convertir datos e información complejos en paneles interactivos, informes y visualizaciones asimilables, que pueden ser entendidos y puestos en práctica por todos los interesados. En el Anexo B se muestra la programación en Python con la posibilidad de uso local y web.

Cabe resaltar que, dentro del desarrollo de la aplicación, se aborda el concepto del patrón MVC: Modelo - Vista - Controlador, que separa la interfaz de usuario visible,

---

<sup>7</sup> Lenguaje de dominio específico utilizado en programación, diseñado para administrar, y recuperar información de sistemas de gestión de bases de datos relacionales.

el modelo de la base de datos y la lógica de funcionamiento. En la **Figura 16** se observa un esquema general del patrón, y las líneas de interacción entre las partes.

**Figura 16.** Esquema del funcionamiento del patrón MVC.



Fuente: Tomado de 32

### 2.6.1 Estructura de la interfaz

Se ha dividido la interfaz web en 4 secciones principales para la visualización de datos en tiempo real y análisis de resultados:

- 1) Configuración inicial
- 2) Controles y parámetros
- 3) Sensores CFIS
- 4) Sistema de control y sensores de energía

Las secciones descritas se identifican en la **Figura 17**, donde se pueden apreciar gráficas, tablas y controles interactivos.

Figura 17. Interfaz de visualización web en Dash Plotly.



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

### 2.6.1.1 Configuración inicial

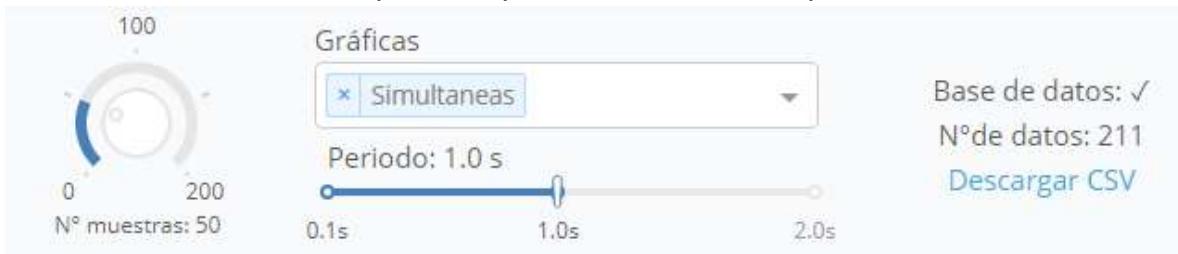
En la sección de configuración inicial, de izquierda a derecha se encuentran ubicados un elemento para cambiar el tema general de la aplicación y un botón que muestra instrucciones de uso de la aplicación para los usuarios. Además, las dos pestañas inferiores de sensores y estadísticas muestran respectivamente lecturas en tiempo real y los resultados totales de la adquisición.

### 2.6.1.2 Controles y parámetros

**Hora:** Para configurar la hora de la finalización de adquisición de datos y visualización de las medidas de los sensores se debe ingresar la hora deseada en un formato de 12 horas. Tal como se observa en la hora de inicio, si no se ingresa ningún valor o un valor erróneo la aplicación seguirá funcionando indefinidamente.

**Parámetros:** Esta sección además de mostrar la hora de inicio y final en conjunto con el valor que retornan 3 sensores, se despliega un submenú para cambiar la configuración de la gráfica sobre los sensores del reactor. Será posible configurar el periodo de muestreo, el número de muestras que se grafican, el tipo de gráficas y adicionalmente se visualizan detalles sobre la comunicación con la base datos y un enlace para descargar el archivo CSV del total de datos recopilados hasta el momento. En la **Figura 18** se puede observar el menú con sus funciones.

**Figura 18.** Captura de pantalla del menu de parámetros.



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

**Inicio:** Este componente se utiliza para poder iniciar o detener manualmente la aplicación, como también para observar con más detalle acontecimientos en la adquisición de datos. Para esto, se puede hacer uso de los controles de cada gráfica.

**Control:** Para la señal de control se ha proporcionado un indicador que visualiza si esta energiza o no el compresor para introducir hidrógeno en el tanque, mientras que el botón 'on/off' desactiva globalmente la señal.

En la sección de control se observan controles para los actuadores del sistema y además una figura que capta en tiempo real el volumen total del tanque que almacena el hidrógeno. Por cuestiones de seguridad y de funcionamiento, estos componentes solo se activarán en el modo local de la aplicación, puesto que, la manipulación simultánea de varios usuarios puede generar errores de desempeño en el sistema de control.

### 2.6.1.3 Sensores CFIS

Una de las secciones más importantes de la interfaz se basa en un periodo y número de muestras definidos en el área de parámetros, además esta sección puede cambiar entre un modo simultáneo de graficación, un modo individual y un modo mixto para que haya mayor versatilidad en la visualización. En la **Figura 19** se muestra el modo de gráficas mixto (simultáneas e individuales) y se observan en la esquina superior derecha, algunas funcionalidades interactivas de Dash Plotly en la generación de gráficas.

**Figura 19.** Gráficas simultáneas e individuales en Dash Plotly.



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

### 2.6.2 Sistema de control y sensores de energía

En esta sección de la interfaz, se observan 2 pestañas (*Energía, Sx control*), en donde se puede seleccionar respectivamente el visualizar un panel de muestra para los sensores de energía o visualizar el comportamiento de las señales de control tanto para el almacenamiento de hidrógeno como para la polarización del voltaje en el reactor. El contenido de cada pestaña se puede observar en la **Figura 20** y **Figura 21** respectivamente

Figura 20. Elementos de visualización para sensores de energía

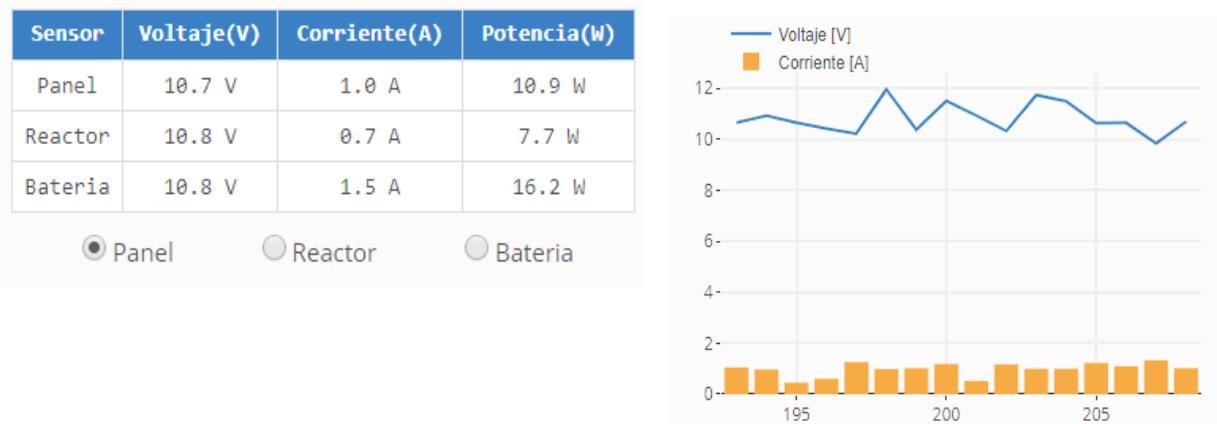
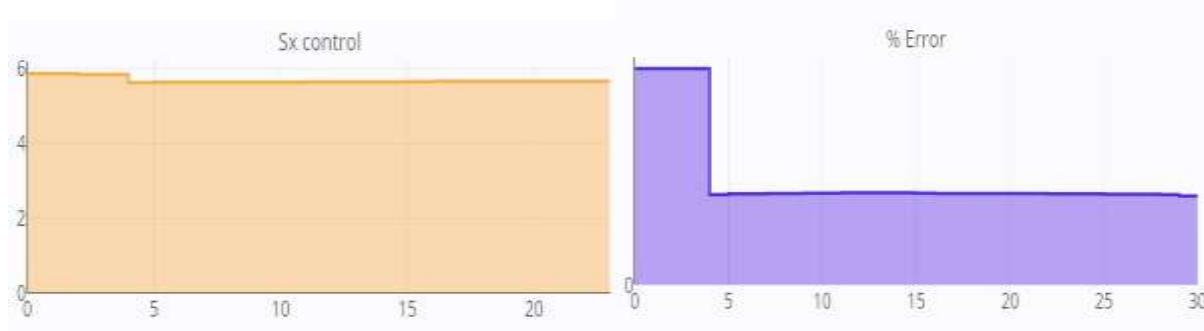


Figura 21. Elementos de visualización para las señales de control.



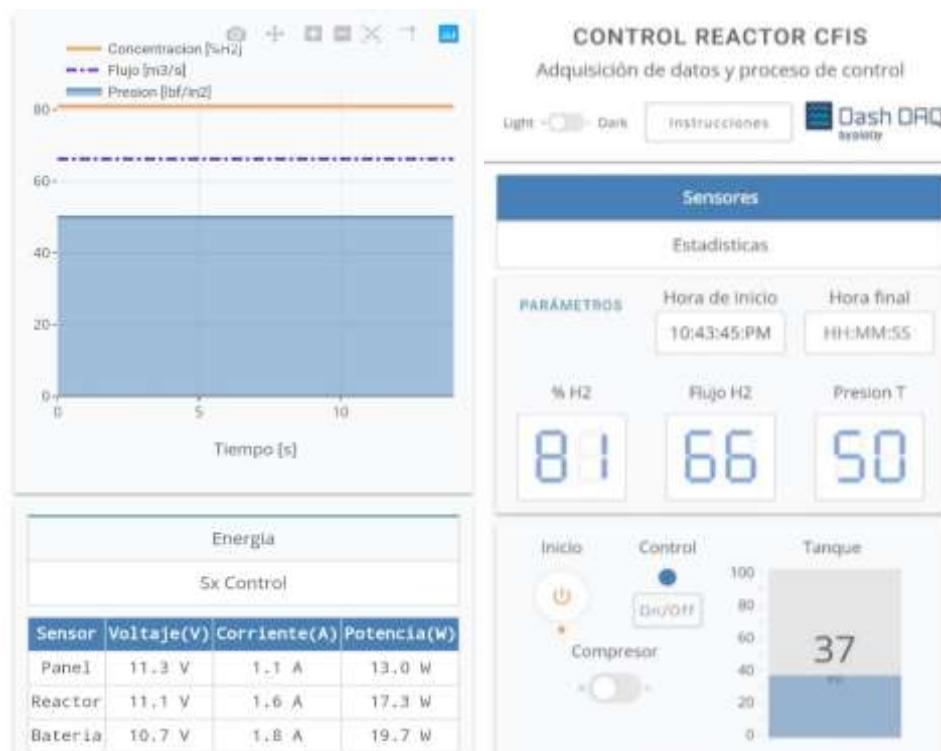
Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

### 2.6.3 Diseño responsivo

Como parte del desarrollo de la aplicación es importante acoplar un diseño web adaptativo o responsivo, esto, debido al crecimiento y uso de las tecnologías móviles como celulares y tabletas. El objetivo del diseño web responsivo es adaptar la apariencia de las páginas web al dispositivo que se esté utilizando para visitarlas.

En este ámbito juega un papel importante la hoja de estilos CSS ( Anexo C ) y los marcos responsivos ofrecidos por terceros. En la **Figura 22** se observa el diseño de la aplicación para un dispositivo móvil.

**Figura 22.** Captura de pantalla de aplicación web en dispositivos móviles.



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

## 2.7 RECOPILACIÓN DE DATOS

Para la recopilación de datos en la base de datos y adecuada visualización en la aplicación web, se deben seguir los siguientes pasos:

- 1) Encender la unidad de procesamiento Raspberry y acceder a la aplicación en Python para la adquisición.
- 2) Escoger una de las siguientes opciones dentro de la aplicación del Anexo F

- Nueva adquisición de datos
  - Continuar adquisición
- 3) Verificar el envío de datos en la pantalla de comandos en Python. Por defecto la aplicación de recopilación guarda datos cada 5 segundos en Postgresql, mientras que la última columna de datos se actualiza a una velocidad aproximada de 1000 datos por segundo, velocidad suficiente para monitorear los sensores en tiempo real.
  - 4) Abrir un navegador web desde Raspberry o cualquier dispositivo con acceso a internet, e ingresar a la URL: <https://sensores-reactor.herokuapp.com>
  - 5) Observar el comportamiento de los sensores y los resultados de la adquisición en la pestaña de estadísticas. Adicionalmente se puede descargar el archivo CSV en el menú de parámetros como se observa en la **Figura 18**.

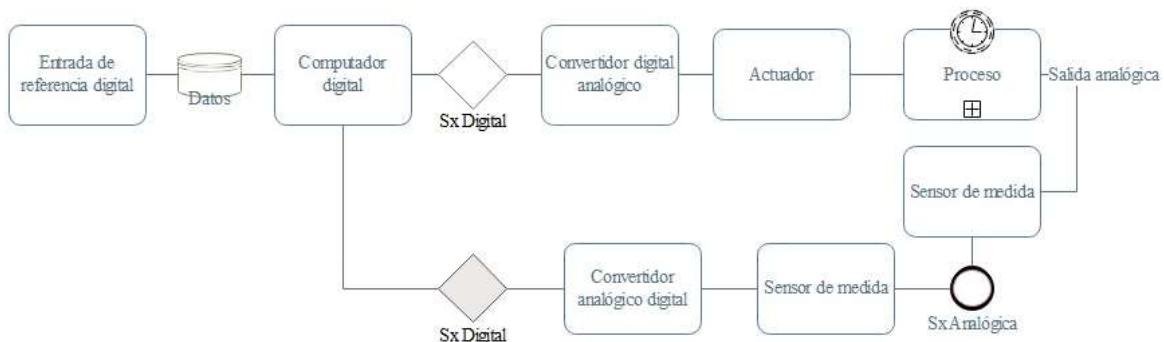
### 3. ESTRATEGIA DE CONTROL

El principal problema y objetivo de la investigación es desarrollar un sistema de control adecuado para el almacenamiento de hidrógeno, haciendo uso de las herramientas con las que ya se cuenta, tales como sensores analógicos y digitales, actuadores y transductores con protocolos de comunicación compatibles con Raspberry.

Se necesita entonces un control robusto y de tipo digital pensando en Raspberry como el actuador y unidad de procesamiento, que es un sistema digital que puede servir como un compensador o un controlador en un sistema de control realimentado. Puesto que recibe datos solo en intervalos específicos, es necesario desarrollar un método para describir y analizar el comportamiento de los sistemas de control por medio de un computador o unidad de procesamiento 33.

En la **Figura 23** se observa un diagrama de bloques de un sistema de control :

Figura 23. Diagrama general para el sistema de control.



Fuente: Adaptado de 33

#### 3.1 METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO DEL CONTROL

Antes de realizar un sistema de control es importante conocer varios aspectos, tales como el modelo y funcionamiento de la planta física (CFIS), determinar el problema de control (almacenamiento de hidrógeno) y determinar las variables de interés con sus señales características para la adquisición y sus limitaciones. Es decir, se

necesita conocer qué se puede sensar para controlar y de qué manera hacerlo. De esta manera surgen varias preguntas dentro del contexto del proceso del diseño, como, por ejemplo: ¿Cómo caracterizar matemática y físicamente el modelo dinámico de la planta?, ¿Qué variables son necesarias para llevar el proceso al comportamiento deseado?, y ¿Cuál sería la estrategia de control ideal para la aplicación?

Por tal motivo se propone una metodología para el diseño del control descrito en la **Figura 24**, en donde se puede observar un proceso iterativo, con unos pasos a seguir comenzando por el conocimiento del problema y terminando con la explotación o puesta en marcha del control en distintos contextos, esto debido a que la CFIS es una tecnología en proceso de implementación para distintas aplicaciones y se generaran distintos escenarios de aplicación de este sistema de control.

**Figura 24.** Metodología para el diseño del sistema de control.



Fuente: Adaptado de 34

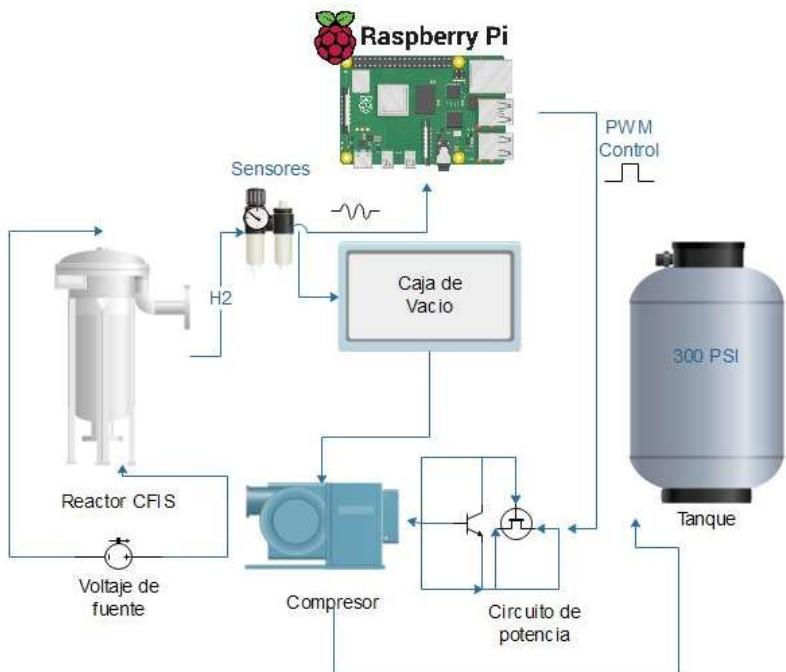
### 3.2 DESARROLLO DEL DISEÑO

Como se ha explicado anteriormente la celda de intercambio protónico que genera hidrógeno (CFIS), es principalmente alimentada de un panel solar que proporciona la energía al cátodo y ánodo. Con esto es posible la reacción química involucrada en la generación de este combustible, que, si bien presenta un flujo relativamente bajo, también tiene una concentración significativamente alta.

El problema radica entonces en el método de almacenamiento del hidrógeno, partiendo de que este es un combustible bastante volátil y fugaz, sensible a cambios de presión y temperatura, que afectan el flujo y concentración total al momento de almacenarse. Por lo tanto, se han tomado medidas de acople y prevención de fugas, tales como filtros y compensadores de presión como es la caja de vacío.

En la **Figura 25** se muestra un esquema de los elementos implicados en el sistema de control para el almacenamiento de hidrógeno.

Figura 25. Esquema de control para la CFIS.



Fuente: Realizado en Edraw por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Para la acción de almacenamiento, el principal actuador es un compresor de aire que internamente posee un pistón y un motor que se alimenta de corriente directa DC, y en el cual es posible la variación de voltaje de alimentación en el rango de 0 a 12 V que se refleja en el aumento y decremento del volumen de hidrógeno ingresado en el tanque. Sin embargo, si esta acción es prolongada o de gran intensidad, produce una disminución de la concentración del hidrógeno, un aumento del vapor de agua y fugas del contenido líquido del interior de la celda hacia el sensor de hidrógeno, esto debido a que se experimenta un flujo y presión más alta dentro de la celda por el paso del gas-hidrógeno hacia el tanque.

Se evidencia entonces la necesidad de establecer una concentración de hidrógeno constante o estable para el proceso de almacenamiento, sin dejar a un lado variables como el flujo y presión del combustible las cuales ayudaran a medir el volumen de hidrógeno generado durante cierto tiempo, variable que es importante para evitar alcanzar la capacidad máxima del tanque para almacenamiento. Por ende, se tienen las siguientes variables de interés:

$C_{h2}(t)$ : Concentración porcentual [%]

$F_{h2}(t)$ : Flujo generado  $\left[\frac{m^3}{s}\right] - \left[\frac{L}{H}\right]$

### 3.2.1 Especificaciones

Se entiende que las anteriores variables, son indicadores importantes del proceso de generación de hidrógeno, sin embargo, dentro del diseño del controlador será de vital importancia la concentración de hidrógeno para un proceso automatizado, y las demás variables solo se tendrán en cuenta para evitar un funcionamiento inapropiado de la generación – almacenamiento. Entre los comportamientos a evitar se destaca prevenir exceder la capacidad máxima del volumen de hidrógeno que se puede almacenar en el tanque, ya que este puede ser estimado a partir de la presión y el flujo generado de la celda.

En este caso particular no se somete la celda con sus procesos químicos a un modelado matemático puesto que esta se ha optimizado de manera diferente en anteriores trabajos de grado tales como en 8. En complemento al modelo de la

planta, el trabajo de esta investigación se enfoca en el almacenamiento apropiado del hidrógeno.

### 3.2.2 Modelado

Para modelar sistemas dinámicos variantes en el tiempo se han utilizado modelos matemáticos de sistemas físicos convencionales con el fin de diseñar y analizar sistemas de control. “La conducta dinámica se describe generalmente mediante ecuaciones diferenciales ordinarias, existiendo sistemas mecánicos, hidráulicos y eléctricos” 36, y al igual que en la mayoría de casos, en el trabajo experimental se observó un sistema no lineal que puede ser descrito mediante una relación de entrada-salida de componentes y subsistemas en forma de funciones de transferencia.

Al trabajar con un sistema como es el del reactor CFIS, la tarea de buscar un modelo matemático descriptivo similar se vuelve muy complicada e inexacta. Por ende, existen diferentes técnicas para estimar un modelo matemático o función de transferencia del sistema, como el uso de las curvas de reacción generadas en la salida del proceso  $y(t)$  al someterlo a una señal o escalón  $u(t)$  que modifica directamente el comportamiento del sistema.

#### 3.2.2.1 Toma de datos

Tal y como se observa en la **Figura 25**, se pretende controlar el voltaje que ingresa al compresor de aire en función de la concentración de hidrógeno medida a la salida del reactor. Para esto se hace uso de Raspberry como unidad de procesamiento, basándose en una señal digital que modula el ancho de pulso o ciclo de trabajo más bien conocida como PWM. Con esto surge un problema de acople y potencia para el compresor, puesto que la amplitud máxima del pulso generado por Raspberry es de 3.3 V y 16 mA, mientras que la tensión de trabajo del compresor oscila entre los 2.5 y 15 V, consumiendo alrededor de 3.5 A en cargas altas de trabajo.

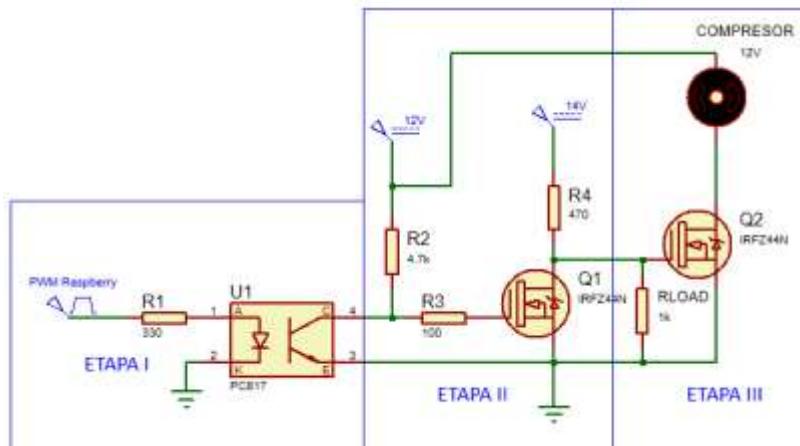
Con lo anterior se debe trabajar en el desarrollo de un circuito de potencia, que ayude no solo a la toma de datos para la estimación del sistema dinámico sino también al funcionamiento continuo y adecuado del sistema de control.

### 3.2.2.2 Circuito de potencia

En este apartado se explica el circuito de potencia utilizado en el sistema de control del compresor dispuesto para la extracción de hidrógeno de la cámara de vacío como se muestra en la **Figura 25**.

La implementación de este circuito se basa en la tecnología de transistores como dispositivos electrónicos semiconductores que son capaces de modificar una señal eléctrica de salida como respuesta a una señal de entrada. En la **Figura 26** se muestra el plano circuital en el cual se basó la implementación de la etapa de potencia en el sistema de control planteado. Asimismo, se observan las tres etapas que serán explicadas posteriormente.

Figura 26. Plano del circuito de potencia



Fuente: Realizado en Proteus por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Antes de explicar más a detalle las etapas de potencia planteadas, es importante enfatizar en los componentes electrónicos que se utilizan en el montaje.

## Dispositivos Electrónicos.

El opto acoplador/optoaislador con salida a transistor Bipolar NPN se usa para la adaptación de señales lógicas, protege galvánicamente las entradas y salidas digitales a las que se conecta y puede trabajar en conmutación como relé estático o para regular la potencia entregada a la carga. En este caso puntual, se usa como protección para la unidad lógica de procesamiento al aislar las tierras de los dispositivos y adaptar la señal lógica a las etapas de potencia para el control de la carga (compresor) que se muestran en la Figura 26.

## Etapas de Control.

Con base en la **Figura 26**, se explica de una manera más detallada las ecuaciones y el comportamiento de los transistores para el sistema de control de la carga (compresor), en las diferentes etapas de potencia.

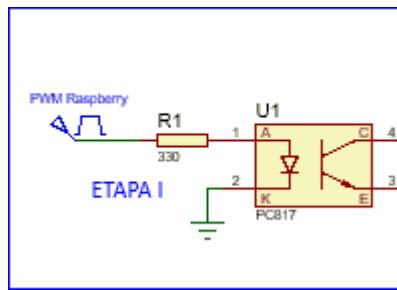
En la etapa I se tiene la señal lógica desde la unidad de procesamiento (Raspberry Pi3), presentada como un PWM con ciclo útil de una señal cuadrada que varía desde 0% a 50% con una frecuencia definida de 100 Hz para la conmutación de los transistores.

Con un voltaje de salida desde la Raspberry de 3.3 V se tiene un voltaje RMS del PWM de 0 V hasta 1.65 V RMS, que son utilizados para las etapas posteriores. El voltaje RMS referido en este apartado se lo encuentra aplicando la ecuación (4) .

$$V_{rms} = V_{in} * \frac{\% \text{ Ciclo Util}}{100\%} \rightarrow \left[ \begin{array}{l} 3.3V * \frac{0\%}{100\%} = 0 \text{ Vrms} \\ 3.3V * \frac{50\%}{100\%} = 1.65 \text{ Vrms} \end{array} \right] \quad (4)$$

Como se muestra en la **Figura 27**, se tiene una R1 con un valor de 330  $\Omega$ , una resistencia de un valor comercial adecuado para regular la corriente del diodo presente en el cátodo y el ánodo del PC817. Si se aplica la ley de Ohm, la corriente que llega a este diodo va desde los 0A hasta los 5 mA, corriente adecuada que no sobrepasa los 20 mA de energización de un diodo convencional.

**Figura 27.** Etapa A de Potencia



Fuente: Realizado en Proteus por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Si bien se conoce del aislamiento galvánico que presenta el PC817, gracias a su hoja de datos referida en 37 , también se conoce que si el diodo da señales de pulsos el transistor NPN comienza la conmutación con el voltaje que tiene en su colector y la resistencia que tiene conectada. En las ecuaciones (5) y (6), se muestran los resultados de las ecuaciones eléctricas del comportamiento del transistor NPN y los valores teóricos y prácticos que se apoyan el entorno de simulación visual de circuitos Proteus y las medidas realizadas por los autores de este documento.

Como se muestra en la **Figura 28**, la etapa II presenta el primer MOSFET que necesita de una corriente y un voltaje de conmutación para enviar los pulsos al siguiente IRFZ44N. La corriente que llega al gate del primer MOSFET de igual manera es regulada por una resistencia de  $100\ \Omega$  .

$$V_{CE} = V_{CC} - R_C I_C = 12 - (4.7 * 10^3)(2.55 * 10^{-3}) = 0.25\ V \quad (5)$$

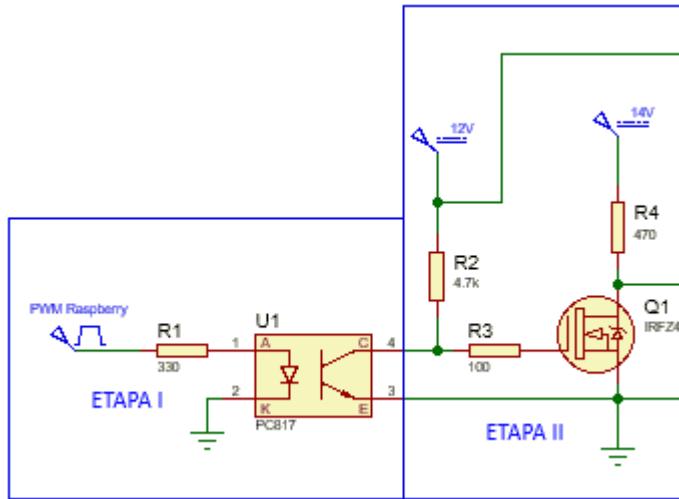
$V_{CE}(\text{Práctico medido}) = 0.22V$

$$I_C = \frac{V_{CC}}{R_C} = \frac{12}{4.7 * 10^3} = 2.55\ mA \quad (6)$$

$I_C (\text{Práctico medido}) = 2.51\ mA$

Los resultados de las ecuaciones (5) y (6) hacen referencia a la salida del colector del transistor NPN presente en el dispositivo PC817, el voltaje y la corriente conmutada varían de acuerdo a la señal lógica enviada por la Raspberry y la saturación y corte del transistor con dos estados de 0.22 V, 12 V y 2.55 mA, 0 mA respectivamente.

**Figura 28.** Etapa A y B de potencia.



Fuente: Realizado en Proteus por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Ahora bien, con la señal lógica de salida de la Raspberry amplificada de 0 V y 3.3 V a 0.22 V y 12 V respectivamente, se procede a estructurar la implementación del circuito y a evaluar el comportamiento de los transistores IRFZ44N.

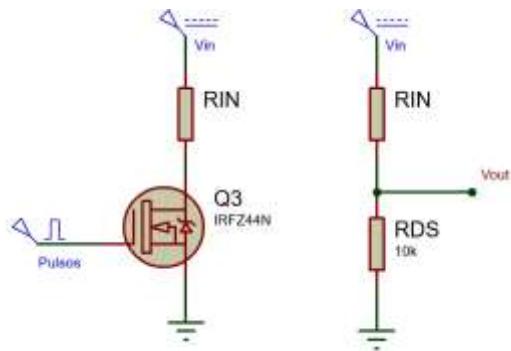
Basándose en la hoja de datos referida en 39 y en el montaje experimental de los transistores MOSFET, el comportamiento que tienen en condiciones de encendido con la conmutación de pulsos se resume en las ecuaciones (7) y (8); como se muestra en la **Figura 29** el circuito es evaluado como un divisor de voltaje de fácil interpretación.

$$V_{GS(on)} = I_{DS(on)} * R_{DS(ON)} \quad (7)$$

$$\left( V_{out} = \frac{Vin * (R_{DS})}{(Rin + R_{DS})} \right) \quad (8)$$

El IRFZ44N dispone de unas características óptimas de conmutación para cargas que demandan corrientes nominales superiores a 2 A. estas características referidas en su hoja de datos en 39 facilitan parámetros específicos del dispositivo como RDS de 0,022 Ω ID= 25 A(ON) y VGS=10 V para una aplicación de las ecuaciones mencionadas.

**Figura 29.** Simplificación MOSFET IRFZ44N



Fuente: Realizado en Proteus por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

$$\left( V_{out} = \frac{14 * (0,022R)}{(470 + 0,022)} = 13.99V \right), V_{out\,practico} = 14,02V$$

La conmutación de los pulsos en la etapa II se toma a 14 V porque su alimentación se da directamente con el voltaje de salida del panel solar. Además, este voltaje facilita los estados de corte y saturación del MOSFET al que está conectado al compresor, como carga final y alimentación de 12 V como se muestra en la **Figura 26.[a1]**

El sistema de potencia para ejecutar la estrategia de control planteada en esta investigación, además de tener inmersos los MOSFET dispuestos en el circuito anteriormente mencionado, consta de un **conversor BUCK [a2]** para estabilizar la alimentación de voltaje y reducir la salida del panel solar a 12 V. En la **Figura 30** se muestra el resultado final en PCB del plano circuital planteado en esta sección del documento.

**Figura 30.** Circuito impreso en PCB MOSFET



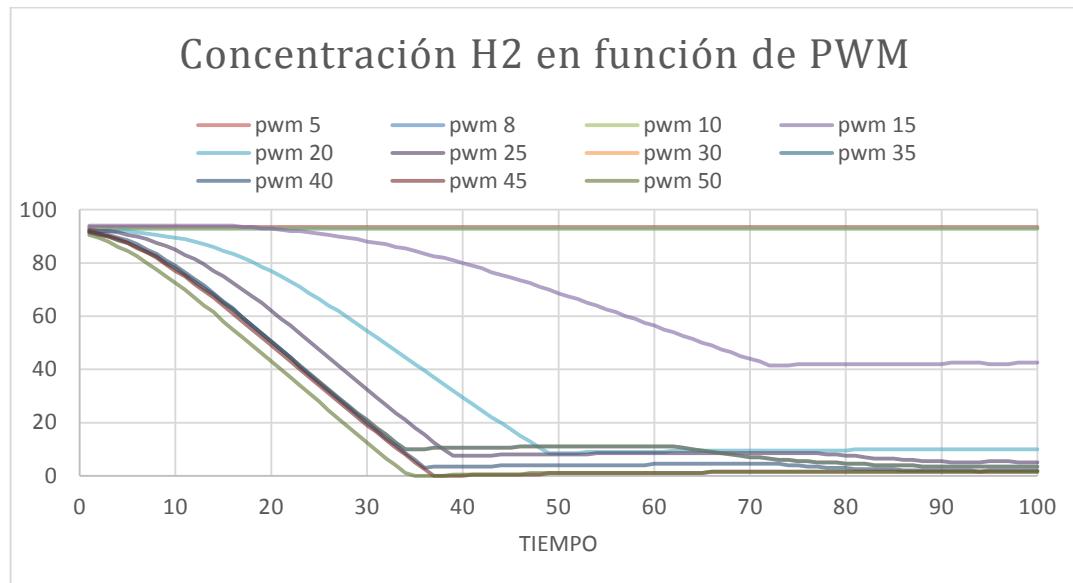
Fuente: Registro Fotografico, Carlos Benavides, Cristian Enriquez

### 3.2.2.3 Curva de reacción

Para la sintonización de los controladores de un lazo de control realimentado es necesario contar con información del comportamiento dinámico del proceso o sistema controlado, normalmente en forma de un modelo de orden reducido (primero o segundo orden, más tiempo muerto) 36.

La identificación del modelo dinámico de almacenamiento requiere calcular ciertos parámetros tales como ganancia proporcional, constante de tiempo y retardo. Estos parámetros se calculan a partir de la respuesta del proceso a un cambio de escalón en la entrada, denominada curva de reacción. En la **Figura 31** se observa la respuesta de la planta del reactor frente a distintas señales de PWM para el compresor.

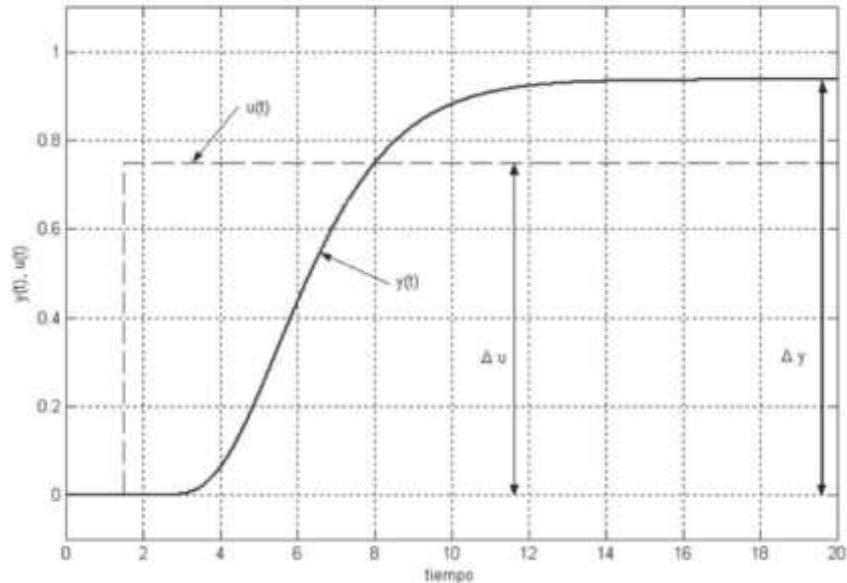
**Figura 31.** Curvas de reacción de la planta



Fuente: Realizado en Excel por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Ahora bien, existen diversos métodos para identificar un modelo a partir de su curva de reacción, procedimientos de identificación que emplean la información del proceso obtenido a partir de una prueba de lazo abierto tal y como se realizó anteriormente. Se considerará como entrada, una señal escalón  $u(t)$  de amplitud  $\Delta u$  y como respuesta del sistema una señal  $y(t)$  así como se muestra en la **Figura 32**.

**Figura 32. Ejemplo curva de reacción y parámetros.**



Fuente:Tomado de 37

#### 3.2.2.4 Modelo de polo doble más tiempo muerto (PDMTM)

Se evidencia en la **Figura 31** que, en la curva de reacción de la planta, existe un retardo significativo o estancamiento del valor porcentual de concentración de hidrógeno al inicio de la reacción. Este valor varía dependiendo de la amplitud de la señal de control PWM, además que el valor mínimo al que cae la concentración se ve afectado por la variación de la señal. Por esta razón, se toma el modelo de polo doble más tiempo muerto, generalizado explicado en 37 y representado en la ecuación (9), para calcular la función de transferencia del sistema con base en una curva de reacción intermedia de la planta como la señal  $u(t)$  con amplitud de 20 unidades (ciclo útil de 20% del PWM).

$$G_p(s) = \frac{ke^{-t_m s}}{(\tau s + 1)^2} \quad (9)$$

- a) Ganancia del modelo

La ganancia proporcional es una constante determinada por el cociente entre la amplitud de la respuesta del modelo o salida del sensor, sobre la amplitud del escalón de entrada o señal de control como se muestra en la ecuación (10).

$$k = \frac{\Delta_y}{\Delta_u} \quad (10)$$

b) Respuesta del modelo

Para calcular el retardo y la constante de tiempo, se toma la ecuación (11), que describe la respuesta del modelo con un tiempo muerto o retardo inicial.

$$y(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t \leq t_m \\ k \left[ 1 - \left[ 1 + \left( \frac{t - t_m}{\tau} \right) \right] e^{-\frac{t-t_m}{\tau}} \right] \Delta_u, & t_m \leq t \end{cases} \quad (11)$$

Definiendo el tiempo normalizado  $t = (t - t_m)/\tau$ , se puede encontrar que la respuesta normalizada del modelo en dos instantes  $t_1$  y  $t_2$  esta dada por:

$$\begin{aligned} x_1 &= 1 - (1 + t_1) e^{-t_1} \\ x_2 &= 1 - (1 + t_2) e^{-t_2} \end{aligned} \quad (12)$$

El sistema de ecuaciones de (12) debería resolverse para determinar  $t_1$  y  $t_2$  en función de  $x_1$  y  $x_2$ , para a partir de ellos obtener  $t_m$  y  $\tau$ .

Como no es posible una solución analítica de las ecuaciones (12), se supondrá que existe una función  $f_2(x)$  que permite determinar el tiempo requerido  $t_x$  para alcanzar el punto  $x$  en la curva de respuesta como

$$t_x = t_m - f_2(x)\tau \quad (13)$$

El valor de  $x$  se refiere al punto fraccional que se desea alcanzar en respuesta, generalmente entre un rango normalizado de [0 1].

### 3.2.2.5 Método 1/4 – 3/4

Este es un método de identificación de modelos bastante útil en sistemas de primer orden, con un solo polo o polo doble más tiempo muerto. Aquí se requieren solamente dos puntos sobre la curva de reacción, por lo que se utilizará los tiempos  $t_{25}$  y  $t_{75}$  entendidos como el tiempo transcurrido para que se desarrolle el 25% y 75% de la reacción del proceso.

Al calcular el valor de los dos puntos en la ecuación, se genera un sistema de ecuaciones planteado en (12), para finalmente determinar los valores de la constante de tiempo( $\tau$ ) y el retardo o tiempo muerto ( $t_m$ ).

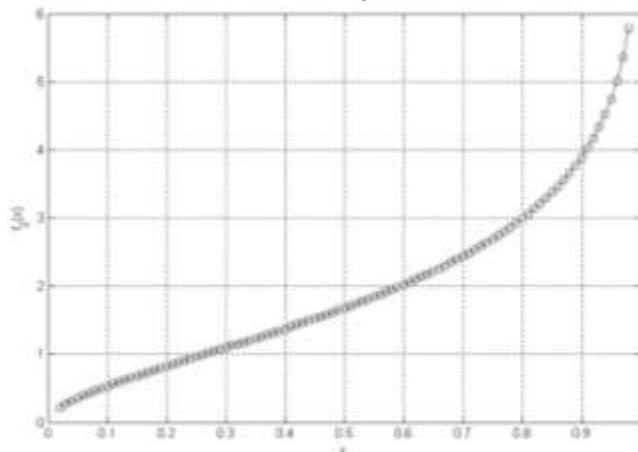
$$\begin{aligned}\tau &= a_1(t_2 - t_1) \\ t_m &= b_1 t_1 + (1 - b_1) t_2\end{aligned}\tag{14}$$

en donde las constantes de (14) se definen como:

$$\begin{aligned}a_1 &= \frac{1}{f_2(x_2) - f_2(x_1)} \\ b_1 &= a_1 f_2(x_2)\end{aligned}\tag{15}$$

Para obtener la función  $f_2(x)$  buscada, se empleó una ecuación de la forma (12) que determina los tiempos requeridos para alcanzar puntos en la curva de respuesta desde 0.02 hasta 0.98 (2 por ciento al 98 por ciento), y determinar de éstos los valores de  $f_2(x)$ , los cuales se muestran en la **Figura 33**.

**Figura 33.** Valores de la función  $f_2(x)$  de la ecuación (13).



Fuente:Tomado de 37

Un ajuste de curvas por mínimos cuadrados permite determinar las siguientes expresiones para  $f_2(x)$ :

$$f_2(x) = \frac{0,0840 + 3,6888x - 0,4114x^2 - 2,8474x^3}{0,6581 + 2,2713x - 4,4782x^2 + 1,6201x^3}, \text{ para } 0,02 \leq x \leq 0,98 \quad (16)$$

$$f_2(x) = \frac{0,3566 + 4,0587x - 2,6865x^2}{1,4103 - 0,4542x - 0,6532x^2}, \text{ para } 0,10 \leq x \leq 0,90 \quad (17)$$

A continuación, en la estimación del modelo se puede observar que los puntos de interés sobre la curva de reacción están ubicados entre  $0,10 \leq x \leq 0,90$ , por lo que la ecuación más simple (17), se puede utilizar en conjunto con las ecuaciones (14), (15) y (10) para determinar los parámetros del modelo, utilizando los tiempos para alcanzar los puntos  $t_{25}$  y  $t_{75}$ .

### 3.2.2.6 Estimación del modelo

Tras analizar el comportamiento de la celda frente a diferentes señales de voltaje PWM para el compresor, así como se observa en la **Figura 31**, se determinó que la respuesta del sistema al escalón de amplitud 20 es ideal para estimar el modelo matemático y función de transferencia de la planta.

Por lo anterior, se utiliza el método de  $\frac{1}{4}$  -  $\frac{3}{4}$  explicado en la Sección 3.2.2.5 y se calcula las constantes requeridas para el modelo representado en la **Figura 34**.

Figura 34. Respuesta escogida para estimación de la planta.



Fuente: Realizado en Excel por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

a) Ganancia

$$k = \frac{\Delta y}{\Delta u} \rightarrow -\frac{82.5}{20} = -4.125 \quad (18)$$

a) Constante de tiempo

$$\begin{aligned} \tau &= a_1(t_2 - t_1) \rightarrow \frac{1}{f_2(x_2) - f_2(x_1)}(t_{75} - t_{25}) \\ \tau &= 0.5776(42 - 18) \rightarrow 13.86 \end{aligned} \quad (19)$$

b) Tiempo muerto

$$\begin{aligned} t_m &= b_1 t_{25} + (1 - b_1) t_{75} \\ t_m &= 1.5552(18) - 0.5552(42) = 4.7 \end{aligned} \quad (20)$$

A partir del modelo propuesto en la ecuación (9) y las constantes calculadas en las ecuaciones (18),(19) y (20), se deduce la función de transferencia (21).

$$G_p(s) = \frac{-4.125e^{-4.7s}}{(13.86s + 1)^2} \quad (21)$$

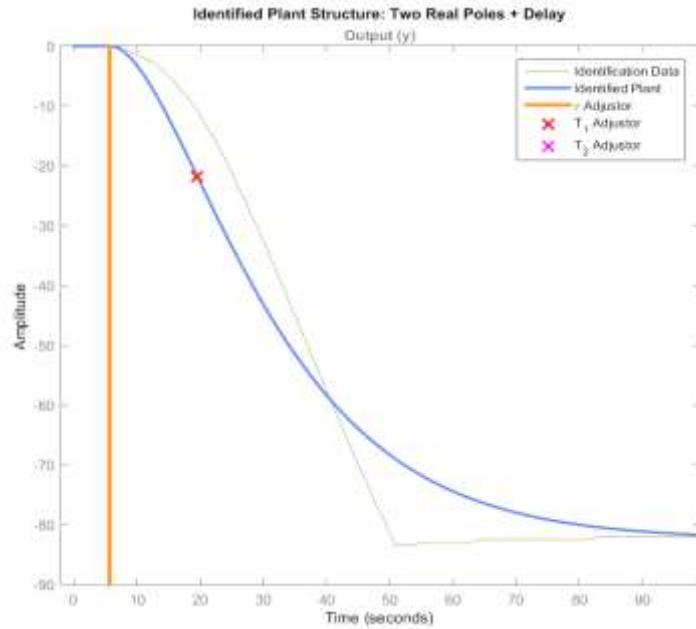
### 3.2.2.7 Validación de la respuesta del modelo con Matlab

La caracterización del modelo y función de transferencia de la planta con un método analítico, trae consigo discrepancias y diferencias con respecto al proceso real que busca representar matemáticamente. Por esta razón se puede hacer uso de herramientas y software como Matlab, con el fin de perfeccionar y hacer una caracterización más certera del proceso dinámico de la CFIS.

Dentro de Matlab existe una aplicación llamada PID Tuner, donde es posible usar el sintonizador PID con una planta representada por un modelo LTI numérico, como una función de transferencia (*tf*) o un modelo de espacio de estados (*ss*) 42. Además, posee una herramienta gráfica interactiva para observar la respuesta de la planta estimada con respecto a los datos experimentales de donde se obtuvo el modelo.

Haciendo uso de la ecuación (21), se puede definir un punto de partida para refinar las constantes de la función de transferencia de la planta dentro de la aplicación en Matlab como se observa en la **Figura 35**.

Figura 35. Planta identificada en la estimación teórica.



Fuente: Realizado en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

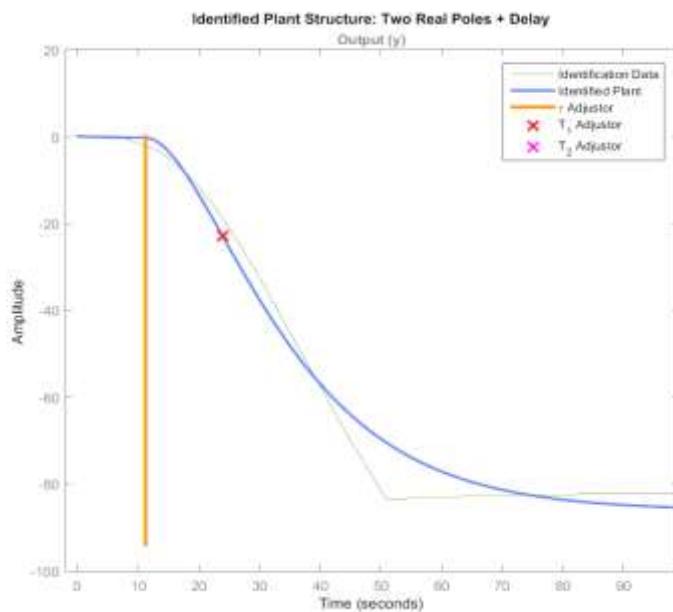
El modelo estimado teóricamente, realiza un ajuste suficiente para diseñar un sistema de control robusto, con un porcentaje de exactamente el 81% de coincidencia con los datos experimentales, pero, también existe la posibilidad de una estimación automática dentro de la aplicación que genera un ajuste del 90% y se presenta en la **Figura 36**.

A pesar de que la planta identificada con Matlab (22) logra realizar un ajuste más preciso, es fácil distinguir que el tiempo muerto de la respuesta del modelo aumenta ligeramente a un valor de alrededor 10 segundos, esto, con el fin de compensar el ajuste general de la curva y el tiempo en el que la curva se establece en un valor mínimo.

$$G_p(s) = \frac{-4.302e^{-10.2s}}{(12.73s + 1)^2} \quad (22)$$

Este valor de retardo o tiempo muerto se puede controlar con modelos de control predictivo o compensadores de tiempo muerto que se presentan continuación basándose en un sistema de control PI retroalimentado.

Figura 36. Planta identificada en Matlab.



Fuente: Realizado en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

### 3.2.3 Diseño del controlador: Predictor de Smith

Al igual que en diversos procesos industriales, la celda de generación de hidrógeno CFIS presenta retrasos en las dinámicas de su proceso y sensado de variables. “Este retardo es un fenómeno que trascurre por el desplazamiento temporal que puede aparecer entre una o más variables de control y puede ser generado, por ejemplo, por el tiempo necesario para transportar masa, energía o información” 43.

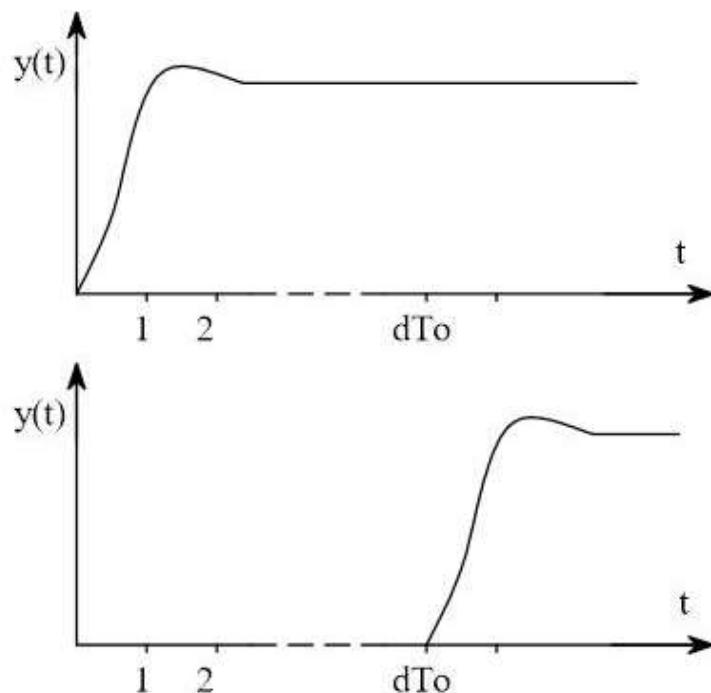
Como se explica en la Sección 0, el sensor AMS HPS-100 se basa en un principio de conductividad térmica, y así como en distintos procesos industriales de intercambio de calor, esto representa un retraso en la dinámica del proceso. En este caso la concentración porcentual de hidrógeno sensado, además, el micro controlador interno del sensor que se encarga de transformar los valores medidos en tramas de datos del estándar CAN, retorna un nuevo valor después de 5

segundos si se reinicializa la comunicación del protocolo. Todo esto sumado genera un retardo relativamente pequeño de 4 a 10 segundos. Para tratar este tipo de problemas de control con retardos se pueden diseñar controladores robustos como compensadores de tiempo muerto (DTC) y controles predictivos basados en modelo (MPC).

### 3.2.3.1 Principio de Smith

El “Principio de Smith” plantea como objetivo de diseño lograr que la respuesta del sistema con retardo, tenga las mismas características dinámicas del sistema sin retardo, es decir, que tenga la misma respuesta a la entrada escalón, pero desplazada en el tiempo el valor del retardo. La **Figura 37** presenta la respuesta a una entrada escalón unitario para un sistema sin retardo y con retardo. “Se puede observar que la salida con retardo tiene las mismas características dinámicas pero desplazada en el tiempo el valor del retardo” 44.

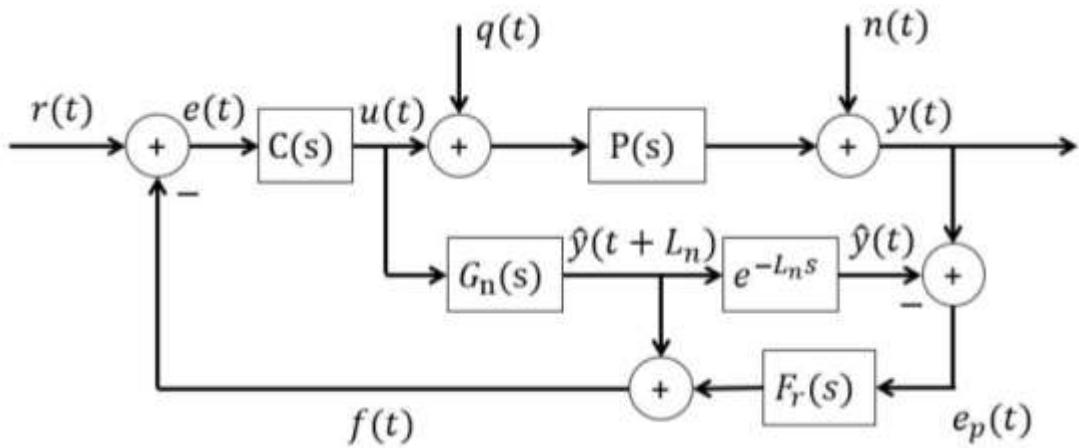
**Figura 37.** Repuesta de un modelo que cumple el principio de Smith.



Fuente:Tomado de 44

La estructura del predictor de Smith (PS) viene dada por la **Figura 38** como representación de modelo interno:

**Figura 38.** Modelo interno predictor de Smith.

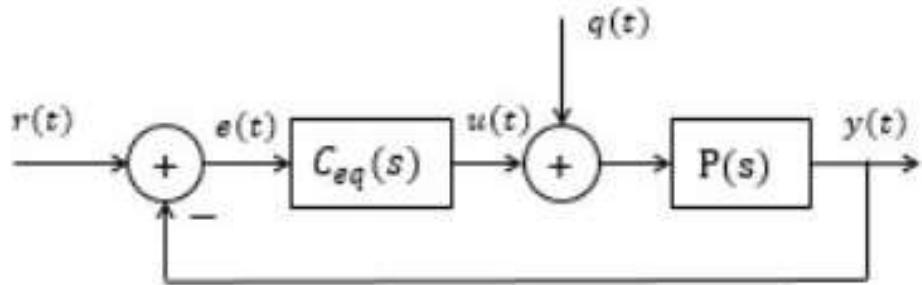


Fuente:Tomado de 45

En la estructura, el control primario es  $C(s)$ , el proceso real es  $P(s)$ , el modelo rápido o modelo sin retardo es  $G_n(s)$ , el retardo viene dado por la expresión  $e^{-L_n s}$  y  $F_r(s)$  es un filtro que aumenta la robustez del sistema frente a perturbaciones. Además, si el modelo calculado para la planta es igual al proceso real implica que  $P_n(s) = G_n(s)e^{-L_n s} = P(s)$ . Esa estructura es capaz de predecir la salida del proceso real  $y(t)$  por medio de la dinámica sin retardo  $G_n$ , o sea que con esa estructura el control es capaz de predecir el comportamiento del proceso real  $P(s)$  en un tiempo igual al retardo  $L_n$ .

La estructura del predictor de Smith, se puede reducir utilizando álgebra de bloques a la representación equivalente que se observa en la **Figura 39**:

Figura 39. Estructura del predictor simplificado.



Fuente: Tomado de 45

En donde el control equivalente viene dado a continuación por la ecuación (23).

$$C_{eq} = \frac{C(s)}{1 + C(s)G_n(s) - C(s)P_n(s)} \quad (23)$$

Así, las relaciones de la entrada  $r(t)$  y la salida  $y(t)$  suponiendo  $P(s) = P_n(s)$  vienen dadas por la ecuación (24):

$$H_{yr}(s) = \frac{y(t)}{r(t)} = \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \quad (24)$$

Es notable que, gracias a la estructura del predictor de Smith, la ecuación característica del proceso queda libre de la influencia del retardo, y la relación de la entrada  $q(t)$  y salida  $y(t)$  viene dada por la ecuación (25):

$$H_{yq}(s) = \frac{y(t)}{q(t)} = P_n(s) \left[ 1 - \frac{C(s)P_n(s)F_r(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \right] \quad (25)$$

### 3.2.3.2 Limitaciones del predictor

- El predictor de Smith solo sirve para procesos estables, esto quiere decir que al someter el modelo de la planta a una prueba de estabilidad y si alguno de sus polos resulta inestable el controlador no funcionara de forma correcta.
- La estructura no es capaz de acelerar la dinámica del rechazo de perturbaciones.

- c) No se puede usar la estructura del predictor de Smith en procesos integradores o en procesos inestables porque la estructura es internamente inestable, lo que quiere decir que, si entra una perturbación, la estructura se inestabilizará para estos dos procesos
- d) Pequeños errores de modelo, por ejemplo, cuando el proceso estimado es diferente del proceso real, puede hacer que la estructura entre rápidamente a la inestabilidad.

Estas limitaciones del predictor de Smith, pueden ser tratadas por medio de una modificación propuesta en 51 adicionando a la estructura un filtro. Esa nueva estructura se conoce como el Predictor de Smith Filtrado que se presenta adelante.

### 3.2.3.3 Controlador PI

Para calcular el control equivalente  $C_{eq}$  es necesario partir de una estrategia de control primaria  $C(s)$ , que si bien ha sido mencionado en las ecuaciones (23),(24) y (25) no se ha tratado a profundidad. Se trata de un control de acción proporcional-integral, el cual actúa con una acción reguladora proporcional (instantáneamente) mientras que la integral actúa durante un intervalo de tiempo. La función de transferencia del bloque  $C(s)$  observado en la **Figura 38** se describe mediante la ecuación (26):

$$C(s) = K_P \left( 1 + \frac{1}{T_i \cdot s} \right) \quad (26)$$

Si el controlador recibe la señal de error  $e(t)$  como entrada, la salida del controlador  $u(t)$  esta dada por la ecuación (27):

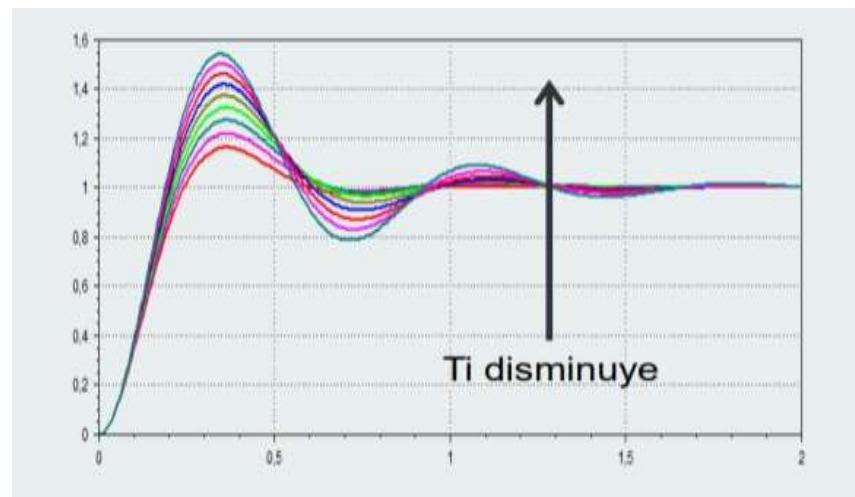
$$u(t) = K_P [e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt] \quad (27)$$

En donde  $K_p$  ,  $T_i$  son parámetros que se pueden modificar según las necesidades del sistema. Por ejemplo, si  $T_i$  es grande la pendiente de la rampa, correspondiente al efecto integral será pequeña y, su efecto será atenuado y viceversa.

Como se observa en la **Figura 40**, para la respuesta a una entrada de escalón unitario del controlador PI, el error en régimen permanente con respecto a la referencia se elimina y aunque la velocidad del controlador aumenta la estabilidad

empeora y el sobrepico crece, por tal razón es importante sintonizar de manera adecuada las constantes del controlador.

**Figura 40.** Respuesta a escalón unitario del control PID.



Fuente: Tomado de 46

### 3.2.4 Simulación

En primera instancia, se debe tener en cuenta para la simulación la respuesta del sistema de control y la planta modelada a un escalón unitario en Matlab. Esta prueba se realiza para examinar las condiciones necesarias y el diseño preliminar del predictor de Smith como sistema de control final del proceso de almacenamiento de hidrógeno. Posteriormente, se evaluará la respuesta del sistema en una simulación del proceso real dentro de Simulink bajo diferentes condiciones lo que garantizará su correcta operación al momento de implementarse. Tanto el Script de Matlab como los diagramas de bloques en Simulink se incluyen en el **Anexo G** y el **Anexo H** respectivamente.

#### 3.2.4.1 Respuesta a escalón unitario

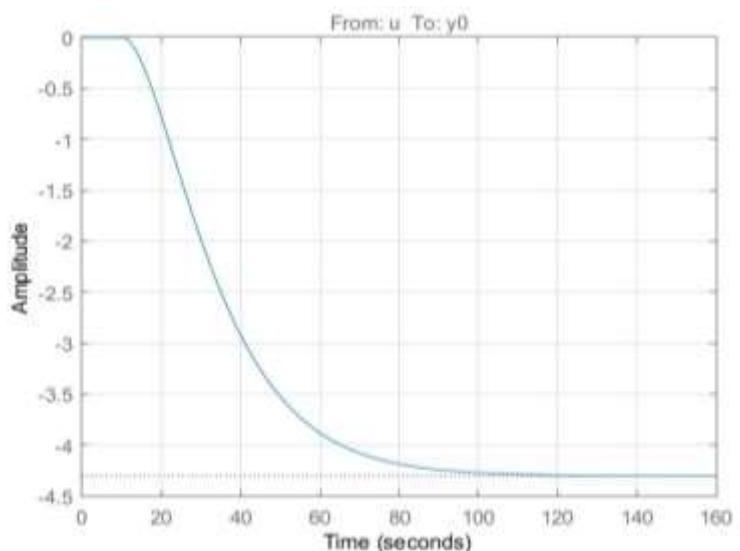
Esta es una de las pruebas más comunes y de mayor importancia, cuyo objetivo es mostrar las limitaciones del control de PI para procesos con tiempo muerto

prolongado e ilustra los beneficios de una estrategia de control llamada "Predictor de Smith". Cabe resaltar que la estrategia y metodología de la simulación esta mayormente inspirada y basada en varios de los ejemplos presentados en 47 dentro de la sección de compensadores de tiempo muerto.

### 3.2.4.1.1 Planta

La respuesta del proceso en circuito abierto se modela como un sistema con tiempo muerto de segundo orden, el cual tiene una constante de tiempo de 12.73 segundos y un retraso de 10.2 segundos, así como se muestra en el modelo de la ecuación (22), Esta respuesta se observa en la **Figura 41** :

**Figura 41.** Respuesta a escalon para la planta CFIS



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

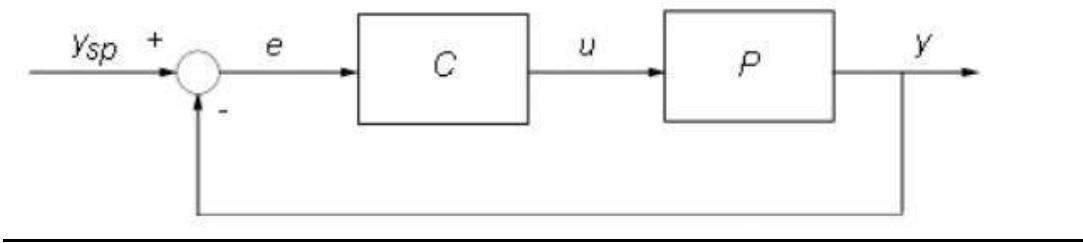
En este caso se ha tomado a  $u$  como la entrada y  $y0$  la salida del sistema para la función de transferencia  $P$ . Además, la gráfica de la **Figura 41** y las posteriores mencionadas en esta sección se generan usando la función "step" en el script o editor principal de Matlab.

### 3.2.4.1.2 Controlador PI

El siguiente paso es analizar el funcionamiento del controlador PI de forma independiente, haciendo uso de alguno de los métodos de sintonización propuestos

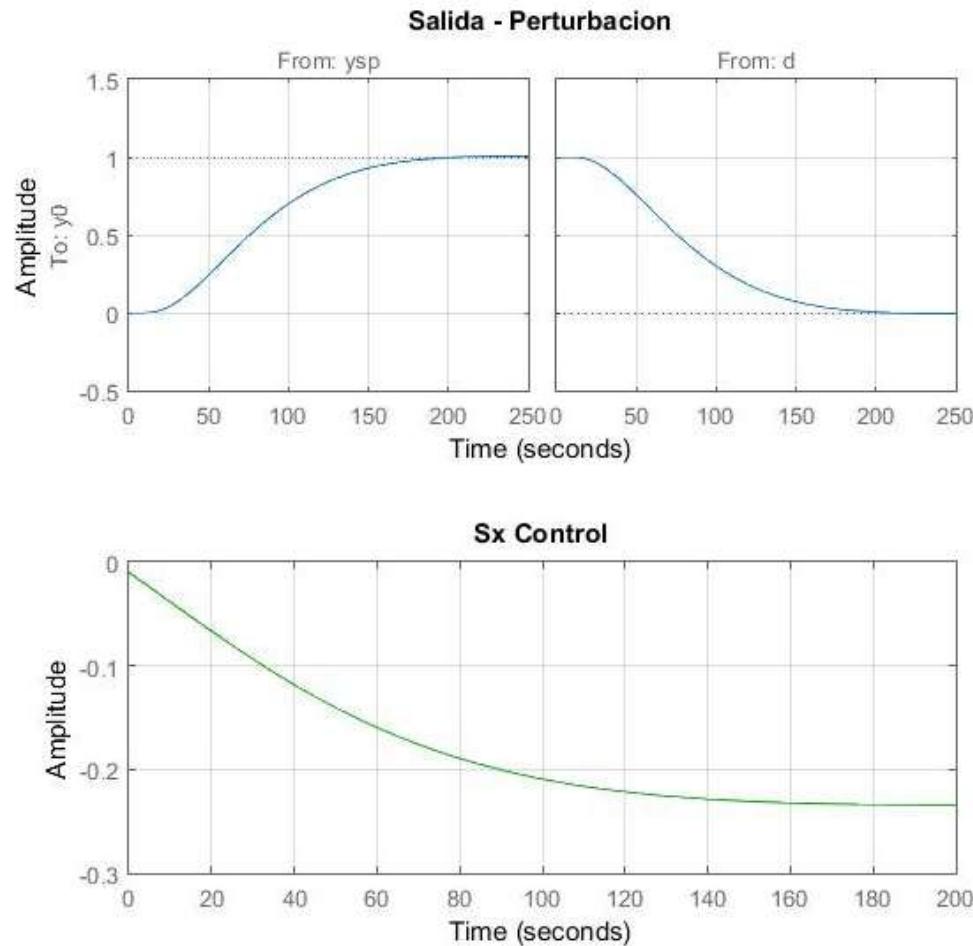
en 47 como el de Ziegler-Nichols o también es conveniente una sintonización por medio de funciones en Matlab. Para evaluar el rendimiento del controlador, se hace un cierre del bucle de retroalimentación con el proceso normal estimado representado en la **Figura 42** y se simula las respuestas a los cambios de paso en la señal de referencia  $y_{sp}$  y la señal de perturbación de salida  $d$  como se observa en la **Figura 45**. El comportamiento del controlador se observa en la **Figura 43**. Posteriormente se sintoniza nuevamente las constantes usando la función “pidtune” lo que arroja unos resultados de  $K_p = -0.001$  y  $T_i = 3.47$ .

**Figura 42.** Arquitectura de control con PI.



Fuente: Adaptado de 47

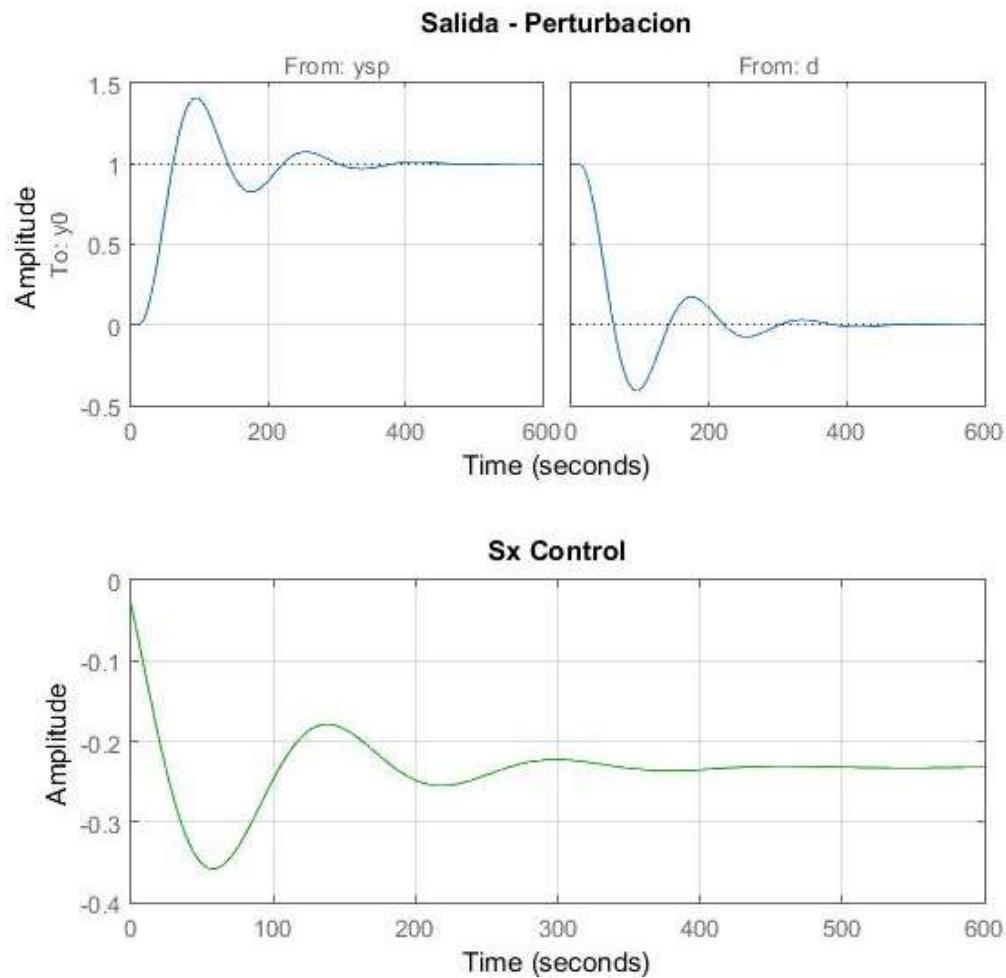
**Figura 43.** Respuesta a escalon del controlador PI.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Es notable en la respuesta del controlador, que este alcanza la referencia y tiene un comportamiento regular frente a perturbaciones, puesto que la elimina en un tiempo de 200 segundos, además no se observan oscilaciones ni sobre picos de establecimiento. Sin embargo, el tiempo que toma en establecerse es de alrededor de 200 segundos, lo que lo cataloga como un sistema sobre amortiguado bastante robusto, pero demasiado lento para implementarse. Para solventar este problema, lo normal sería aumentar la ganancia proporcional, ya que  $K_p$  acelera la respuesta, pero también aumenta significativamente el sobre impulso y conduce rápidamente a un comportamiento oscilatorio que se evidencia en una respuesta subamortiguada como se observa en la **Figura 44**.

**Figura 44.** Respuesta subamortiguada del controlador PI



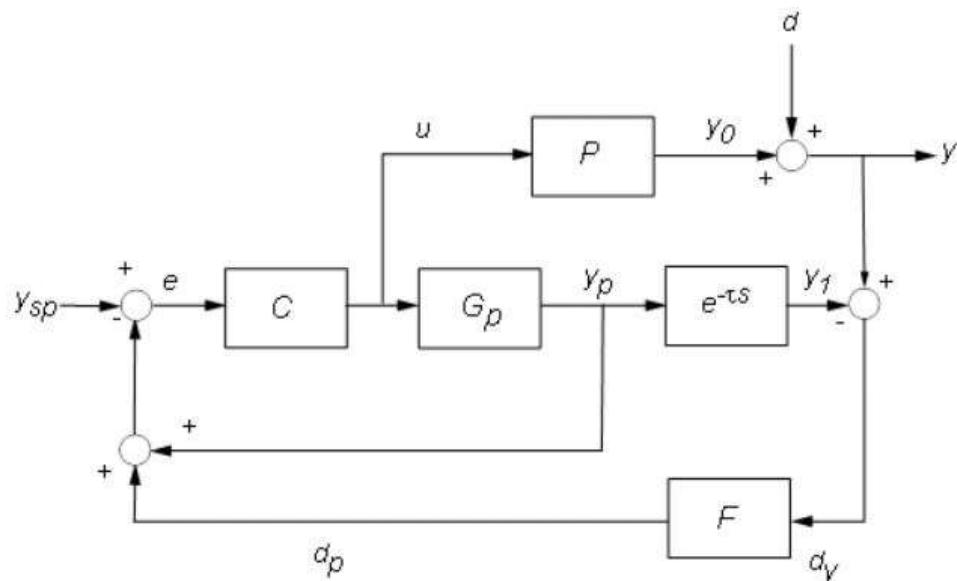
Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Es en este punto que se encuentra la necesidad de un compensador de tiempo muerto como lo es el predictor de Smith, de modo que el tiempo de establecimiento y la respuesta contra perturbaciones disminuya sin hacerlo de forma inestable. Además, se puede observar que la respuesta de la señal de control  $u(t)$  satisface los requerimientos de que el ciclo útil de entrada para el compresor sea inferior al 50%.

### 3.2.4.1.3 Predictor de Smith SISO

Como es evidente, el rendimiento del controlador PI está severamente limitado por el tiempo muerto del sistema. Esto se debe a que el controlador PI no tiene conocimiento del tiempo muerto y reacciona demasiado rápido frente la salida real y no coincide con el punto de ajuste deseado  $ysp$ . Una mejor estrategia consistiría en esperar que surta efecto un cambio en la concentración de hidrógeno antes de realizar más ajustes y una vez aprendido qué ajuste de voltaje ofrece la concentración deseada, se podrá obtener la concentración porcentual de hidrógeno correcta en el tiempo que tarda la CFIS en reaccionar. Esta estrategia de control es la idea básica detrás del esquema del predictor de Smith, el cuál es presentado en la **Figura 45**.

**Figura 45.** Estructura de control para simulación del predictor de Smith.



Fuente: Adaptado de 47

El Predictor de Smith utiliza un modelo interno  $G_p$  para predecir la respuesta sin demora  $y_p$  del proceso. Luego compara esta predicción  $y_p$  con el punto de ajuste deseado  $ysp$  para decidir qué ajustes son necesarios (control  $u$ ). Para evitar la deriva y rechazar las perturbaciones externas, el predictor de Smith también

compara la salida real del proceso con una predicción  $y1$  que tiene en cuenta el tiempo muerto.

La diferencia  $dy = y - y1$  se retroalimenta a través de un filtro  $F$  y contribuye a la señal de error global  $e$ . Finalmente, se debe tener en cuenta que  $dy$  equivale al desajuste de concentración de hidrógeno percibido después de esperar el tiempo suficiente para que la CFIS reaccione.

Para ensamblar el modelo de ciclo cerrado de  $[ysp, d]$  hasta  $y$  se tiene en cuenta que:

$$\begin{aligned} e &= ysp - yp - dp \\ y &= y0 + d \\ dy &= y - y1 \end{aligned} \tag{28}$$

De tal manera que ahora, para el controlador  $C$  la señal de error no solo depende de la diferencia entre la salida del proceso  $y$  y la referencia  $ysp$ , si no que como se observa en las ecuaciones de (28), todo el sistema ha sido modificado, generando una nueva planta a la cual responderá el controlador PI.

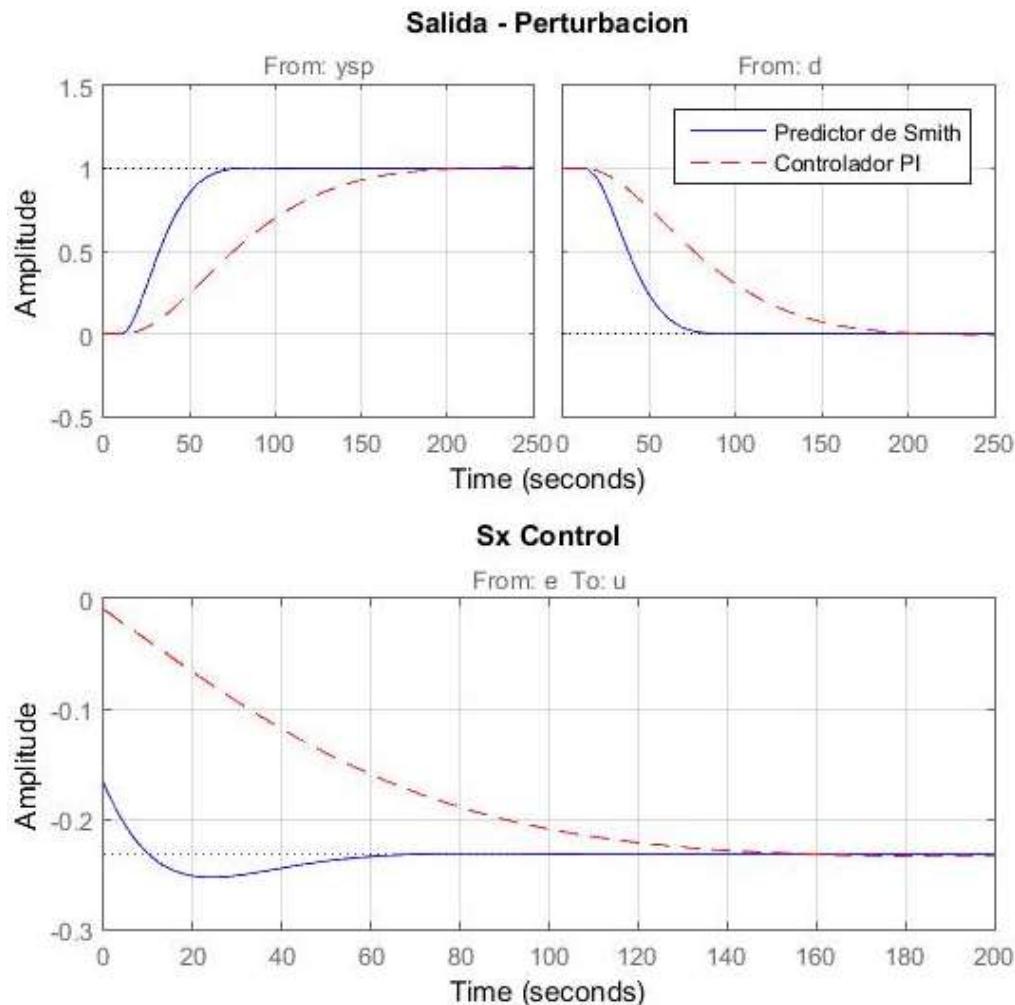
En consecuencia, se debe rediseñar el controlador PI con la nueva planta, que incluye dinámicas de  $P$ ,  $Gp$ ,  $F$  y tiempo muerto. Con la ayuda de la estructura de control de Predictor de Smith, es posible aumentar el ancho de banda de bucle abierto para lograr una respuesta más rápida y aumentar el margen de fase para reducir el sobre impulso 49 . Tanto el ancho de banda como el margen de fase son parámetros de diseño en el dominio de la frecuencia que afectan directamente las constantes de sintonización del PI ( $K_p, T_i$  ).

Estos parámetros de diseño pueden ser modificados con la función de Matlab “pdtune”, en donde se indica la planta y el tipo de PID a usar, es decir si tendrá todas las constantes (proporcional, integral y derivativa) o solo algunas de ellas (en este caso PI). Por lo tanto, se determinó que los valores de ancho de banda y margen de fase ideales para la sintonización del controlador haciendo uso de la función pdtune serían respectivamente de  $0.04 \text{ rad/seg}$  y  $71^\circ$ , que resultan la siguiente función de transferencia del controlador PI:

$$C(s) = \frac{-0.17 * (17.5s + 1)}{17.5s} \tag{29}$$

Finalmente se presenta en la **Figura 48** la respuesta del sistema de control **PI** en conjunto del **Predictor de Smith** descrito en la **Figura 45**, en donde es clara la rapidez y estabilidad de la respuesta con respecto al sistema descrito en la **Figura 42**, que únicamente utilizó el controlador **PI** diseñado en el capítulo 3.2.3.2.

**Figura 46.** Respuesta del Predictor de Smith vs PI.



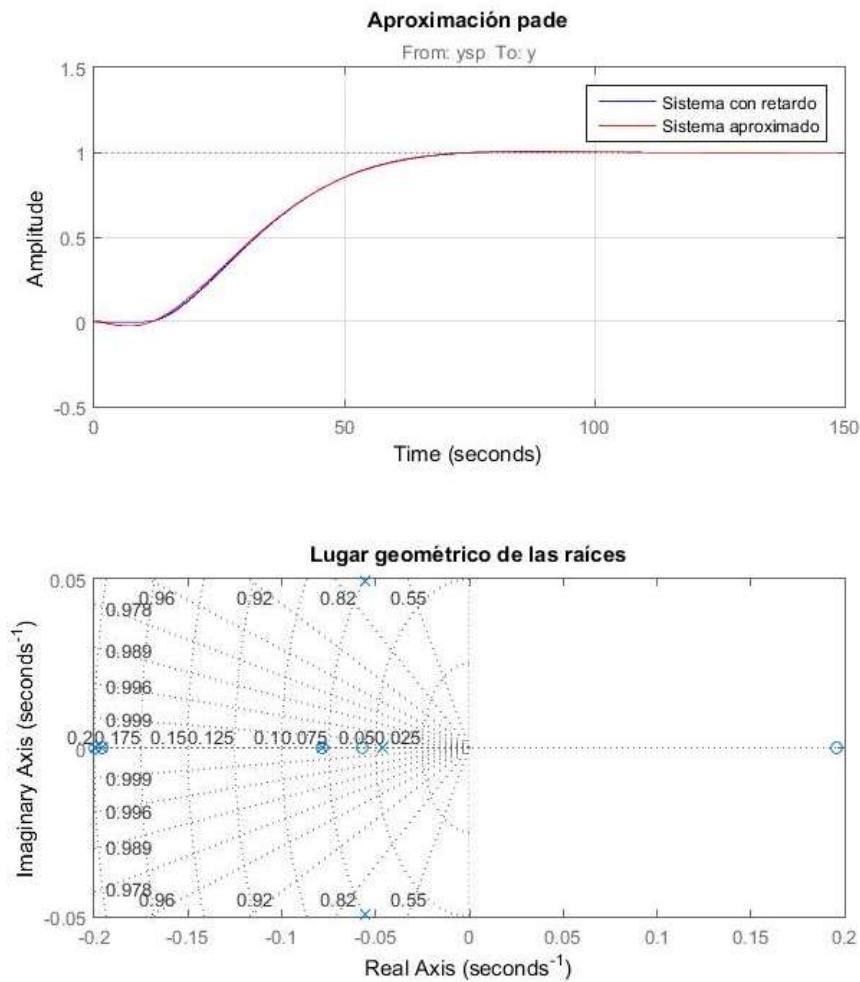
Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Al hacer el uso de la estructura del Predictor de Smith se gana más de 100 segundos de tiempo de establecimiento, ya que este logra establecerse en un poco menos de

80 segundos, convirtiéndolo en un sistema de control mucho más rápido y completamente robusto.

Ahora bien, como se mencionó anteriormente la estructura interna del predictor de Smith es susceptible a perturbaciones o desajustes del modelo ya que se torna fácilmente inestable, por esta razón es importante hacer un análisis de estabilidad del sistema observando el lugar geométrico de sus raíces, esto es posible tras aproximar la respuesta en lazo cerrado del sistema a una respuesta sin retardos, así como se observa en la **Figura 47**:

**Figura 47.** Aproximación de pade y lugar geométrico de las raíces.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

$$\frac{1}{\alpha \cdot s + 1} \quad (30)$$

Como se puede observar todos los polos de la respuesta del sistema se encuentran en la parte negativa del diagrama pero también cerca de convertirse en inestables. Por lo tanto, con fin de comprender la acción del filtro en el dominio de la frecuencia, este fue omitido en la respuesta de la **Figura 46** y ahora se presenta la respuesta del Predictor de Smith en la **Figura 48** con un filtro pasa bajos propuesto en 50.

El filtro de la nueva respuesta posee una constante  $\alpha$ , que como se expresa en 49 debería ser mayor que la constante  $T_i$  para el nuevo diseño conjunto del PI y predictor de Smith, cuyo comportamiento se rige por la ecuación

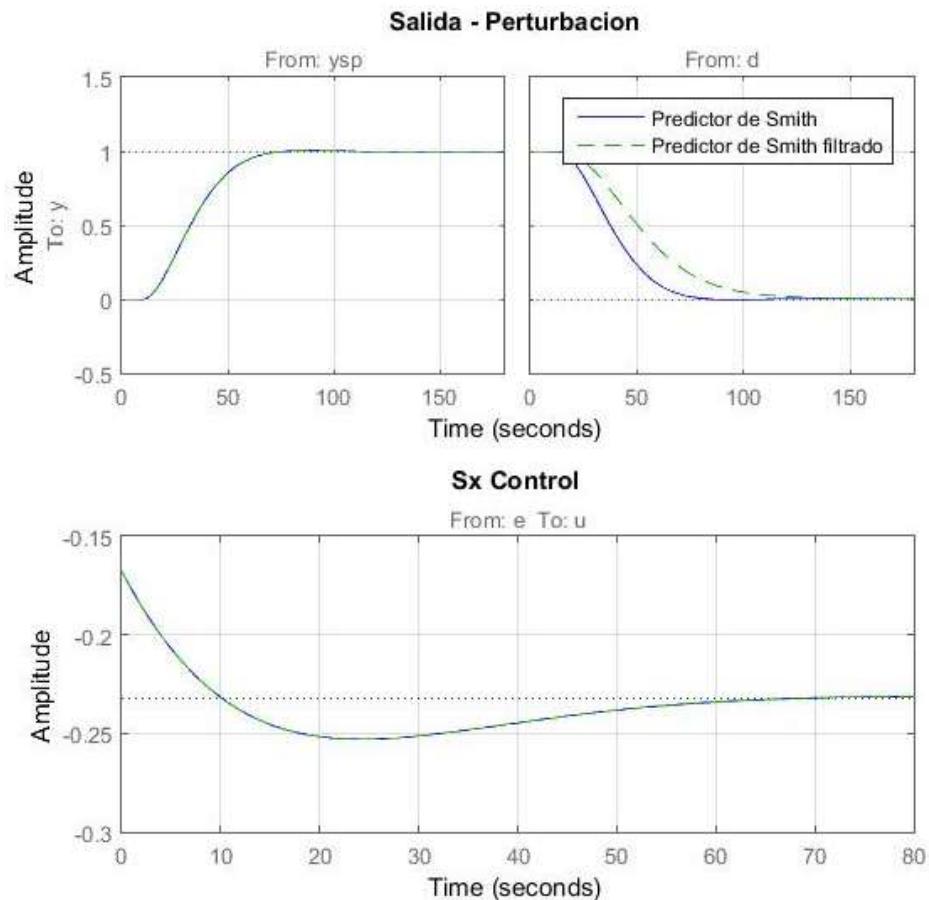
Siendo que las constantes de sintonización del nuevo controlador PI son:

$$\begin{aligned} K_p &= -0.17 \\ T_i &= 17.4 \end{aligned} \quad (31)$$

Y, además, teniendo en cuenta que  $\alpha$  es un parámetro que suele tomarse en un rango de  $\alpha = [1,100]$  dado el carácter del sistema y reduciendo el módulo de un tipo de frecuencias, se tiene que con  $\alpha = 20$  resulta el siguiente filtro:

$$F = \frac{1}{20s + 1} \quad (32)$$

**Figura 48.** Predictor de Smith vs predictor de Smith filtrado.

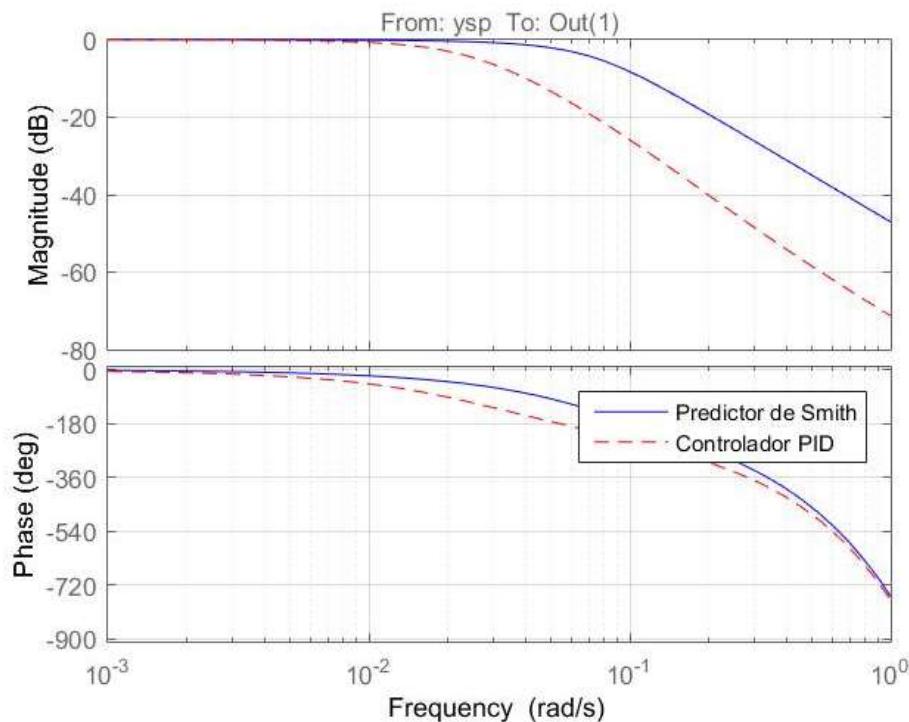


Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Claramente la respuesta de los controladores en la **Figura 48** es exactamente la misma respecto a la referencia *ysp*, sin embargo, se observa una atenuación en la rapidez en que el control maneja las perturbaciones. Esto parecería una desventaja a simple vista, pero los beneficios del filtro serán apreciados más adelante cuando se someta el sistema a pruebas por desajuste o inexactitud del modelamiento del proceso de la planta, ya que el filtro añade una dinámica extra que permite mover los polos integradores o los polos inestables.

Adicionalmente, se puede apreciar que la diferencia también es visible en el dominio de la frecuencia al trazar la respuesta de Bode en bucle cerrado de  $ysp$  hacia  $y$  presentada en la **Figura 49**. Nótese el mayor ancho de banda para el predictor Smith, que afecta directamente las constantes de sintonización del controlador, en especial el decremento de la constante proporcional  $K_p$ , con respecto al valor anterior obtenido, tal y como se muestra en las ecuaciones de (31).

**Figura 49.** Diagrama de Bode del Predictor de Smith vs PI.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

#### 3.2.4.1.4 Robustez frente a desajustes del modelo

En el análisis anterior, se supuso que el modelo interno coincidía exactamente con el modelo de proceso  $P$ . En situaciones prácticas, el modelo interno es solo una aproximación de la verdadera dinámica del proceso, por lo que es importante comprender cuán robusto es el Predictor de Smith ante la incertidumbre sobre la dinámica del proceso y el tiempo muerto.

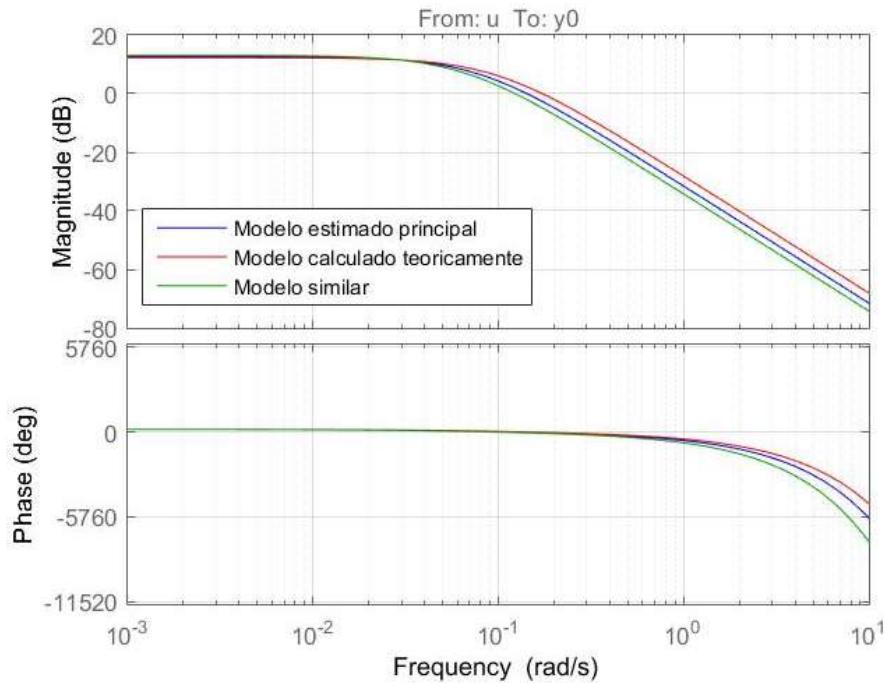
Para tal propósito, se considera dos modelos de planta perturbados (ver (33)) representativos del rango de incertidumbre sobre los parámetros del proceso, los cuales son similares en su respuesta al modelo principal estimado.

$$P_1 = \frac{-4.1e^{-8.5s}}{(10.2s + 1)^2} \quad (33)$$

$$P_2 = \frac{-4.5e^{-13s}}{(13.8s + 1)^2}$$

De entre ellos se destaca el modelo de la planta  $P_1$ , puesto que es bastante similar al estimado en el capítulo 3.2.2.6 como el modelo teórico de base, mientras que el modelo  $P_2$  posee un retardo y constante de tiempo mayor. La respuesta en frecuencia de las tres plantas se observa en la **Figura 50**.

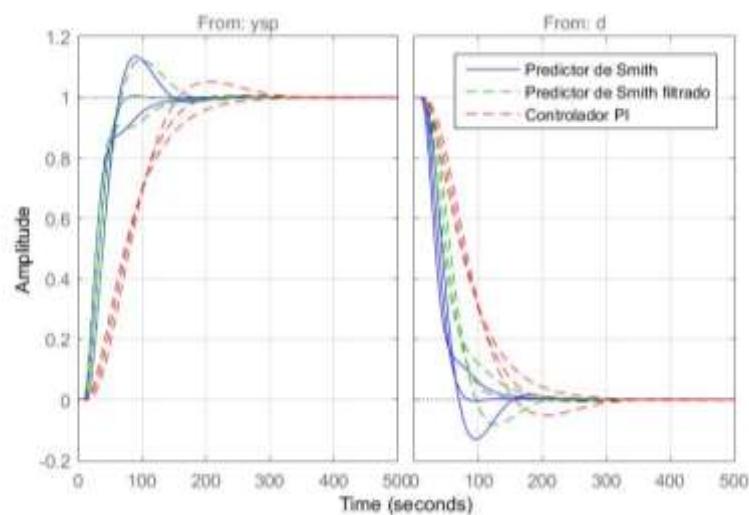
**Figura 50.** Respuesta en frecuencia del modelo nominal y modelos con perturbaciones.



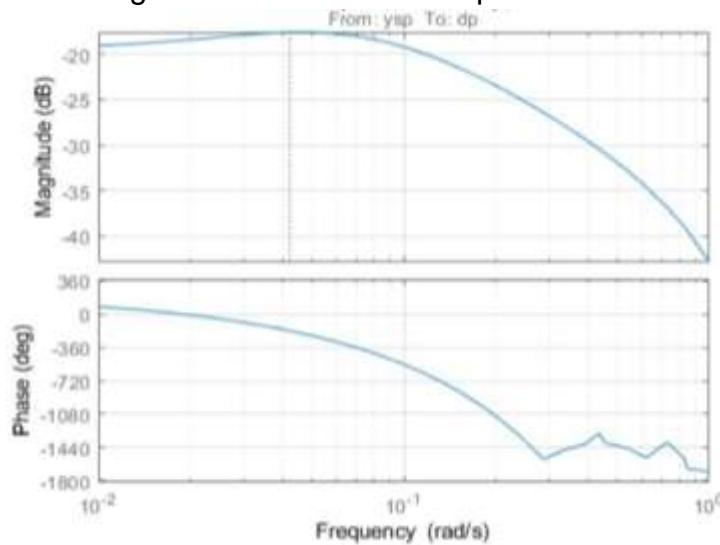
Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Ahora bien, es necesario observar la acción del filtro propuesto en la ecuación (32) al variar el valor de la constante  $\alpha$ . En la **Figura 51** se observa la respuesta del predictor de Smith sin filtro sobre las 3 plantas distintas. Además, para obtener una idea de los márgenes de estabilidad en el dominio de la frecuencia para el bucle externo o respuesta en lazo abierto, se debe trabajar con uno de los modelos de proceso perturbados, por ejemplo  $P_1$ , esto se aprecia en la **Figura 52**.

**Figura 51.** Predictor de Smith filtrado con  $\alpha = 20$ .



**Figura 52.** Margenes de estabilidad de planta  $P_1$  en lazo abierto.



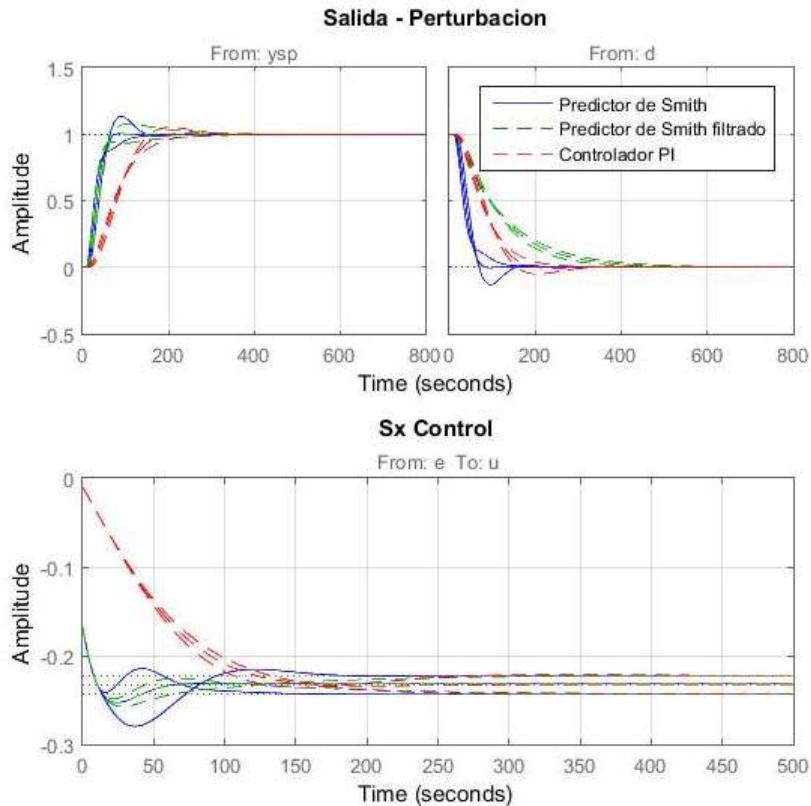
Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

En la **Figura 51** se observa que el filtro pasabajas logra atenuar muy sutilmente los sobre impulsos de establecimiento para los modelos perturbados, además se evidencia en el análisis frecuencial de una de las plantas en la **Figura 52**, que la curva de ganancia tiene una joroba cercana a 0.04 rad /s que reduce el margen de ganancia y aumenta el sobre impulso en la respuesta al escalón en lazo cerrado.

Por lo anterior, vale la pena evaluar un nuevo filtro (34) propuesto en 50, el cual se activa antes y tiene una respuesta más rápida para el establecimiento ya que la constante  $\alpha$  se incrementa y además se agrega una dinámica extra en el numerador. La respuesta de este nuevo filtro dentro del sistema de control se presenta en la **Figura 53**.

$$F = \frac{1 + 10s}{1 + 100s} \quad (34)$$

**Figura 53.** Predictor de Smith con nuevo filtro.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

La acción de filtro es crucial y sumamente notoria para los dos casos, ya que para un valor bajo de  $\alpha$  los sub-sistemas de (33) se tornan inestables, los sobre picos aumentan y el tiempo de establecimiento se eleva considerablemente, mientras que con valores más altos de esta constante y una dinámica extra como en el último filtro, hay una respuesta más estable y robusta, sin embargo, también se puede distinguir que el tiempo de respuesta a perturbaciones se incrementa notablemente. Esto genera un sistema más robusto, pero igualmente más vulnerable a dinámicas de perturbaciones en el tiempo.

### 3.2.4.1.5 Filtro con dinámica de rechazo para perturbaciones

En la anterior sección del capítulo se explicó la necesidad de un filtro para mejorar la robustez del sistema frente a desajustes e incertidumbre del proceso estimado con respecto al proceso real. Este filtro es claramente una mejora para el predictor de Smith, pero tiene la desventaja de que la respuesta a perturbaciones es mucho

más lenta. Por esto se propone un nuevo filtro que suplirá las ventajas del primero y mejorará el tiempo de respuesta a perturbaciones.

Según lo explicado en 51, se debe plantear un filtro de segundo orden que además de cancelar los polos lentos, también cancele la dinámica de lazo cerrado. De esa forma se escogería diseñar un filtro con la siguiente manera:

$$F_r(s) = \frac{N_r(s)}{D_r(s)} \quad (35)$$

Este filtro (35) se basa en dos condiciones para su diseño:

La primera sería atenuar las dinámicas lentas o inestables y si es posible reemplazar estas dinámicas por unas deseadas, por lo tanto, siendo  $F_r(s)$  un filtro de orden  $n$  planteado, se tiene que la dinámica de lazo abierto del diagrama de bloques planteado en la **Figura 38** es:

$$H_{yq} = \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \left[ 1 - \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} \frac{N_r(s)}{D_r(s)} e^{-L_n s} \right] \quad (36)$$

$$H_{yq} = \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \left[ \frac{D_r(s)(C(s)P_n(s)) - N_r(s)(1 + C(s)G_n(s))e^{-L_n s}}{D_r(s)(1 + C(s)G_n(s))} \right] \quad (37)$$

Se entiende que la dinámica  $D_r(s)(C(s)P_n(s)) - N_r(s)(1 + C(s)G_n(s))e^{-L_n s}$  evaluada en el valor del polo  $s = -1/T_n$  cancelaría la dinámica de lazo cerrado del denominador de la planta, y ahora la velocidad de rechazo de perturbaciones se regiría por la dinámica  $D_r(s)(1 + C(s)G_n(s))$ . Con lo anterior, la ecuación (37) se puede entender como:

$$H_{yq} = \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \left[ \frac{X'(s)(T_n s + 1)^2}{D_r(s)(1 + C(s)G_n(s))} \right]$$

En donde  $X'(s)$  es un polinomio residual tras cancelar la dinámica de lazo abierto, lo que supondría una respuesta más rápida a perturbaciones, resultando en:

$$H_{yq} = K_n e^{-L_n s} \left[ \frac{X'(s)}{D_r(s)(1 + C(s)G_n(s))} \right] \quad (38)$$

La segunda condición dice que el filtro debe ser de ganancia 1 para que no afecte el tiempo de respuesta de establecimiento en la referencia. Esto se describe en la ecuación (39):

$$F_r(0) = \frac{N_r(0)}{D_r(0)} = 1 \quad (39)$$

Para cumplir esta condición se debe evaluar en cero el numerador de la ecuación (37)  $D_r(s)(C(s)P_n(s)) - N_r(s)(1 + C(s)G_n(s))e^{-L_n s}$  el cual ha sido evaluado previamente en el valor del polo de la planta para cumplir la condición 1.

Ahora bien, se sabe que la dinámica de lazo cerrado viene dada por:

$$H_{ry}(s) = \left[ \frac{CP_n}{1 + CG_n} \right] \quad (40)$$

Por lo tanto, se debe plantear un controlador primario  $C(s) = K_c \frac{NC(s)}{DC(s)}$  que solo será utilizado para el diseño del filtro. Esto es posible ya que las condiciones del filtro garantizan que la respuesta de establecimiento de la referencia del controlador PI calculado en (30) no sea afectada. Para demostrar lo anterior se plantean 3 controladores, el primero será el ya obtenido en (30) con función de transferencia (41), el segundo es un controlador PI (42) con:  $K_p = K_c$  y  $T_i = T_n$  y el último es un controlador PID (43) de constantes  $K_p = K_c$ ,  $T_i = 2T_n$  y  $T_d = \frac{T_n}{2}$ . Como es notable estos dos últimos, se calcularon con el método de cancelamiento de polos, lo que simplificará el denominador de la dinámica de lazo cerrado, de modo que el filtro resultante será de un orden variable.

$$C_1(s) = K_c \left( \frac{T_i s + 1}{T_i s} \right) \quad (41)$$

$$C_2(s) = K_c \left( \frac{T_n s + 1}{T_n s} \right) \quad (42)$$

$$C_3(s) = K_c \left( \frac{2T_n \left( \frac{T_n}{2} \right) s^2 + 2T_n s + 1}{2T_n s} \right) = K_c \left( \frac{(T_n s + 1)^2}{2T_n s} \right) \quad (43)$$

Con las anteriores ecuaciones y metodología planteada ya es posible realizar el diseño del filtro de orden  $n$ . Por lo tanto, el primer paso sería obtener la respuesta en lazo cerrado que viene dada por:

$$H_{ry} = \frac{C(s)P_n(s)}{1 + C(s)G_n(s)} = \frac{K_c \frac{NC(s)}{DC(s)} * \left( \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \right)}{1 + \left( K_c \frac{NC(s)}{DC(s)} * \left( \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} \right) \right)}$$

La dinámica del numerador del controlador es la encargada cancelar parte de la dinámica de los polos de la planta, reduciendo el orden de la misma y simplificando la ecuación significativamente de la siguiente forma:

$$H_{ry} = \frac{1}{1 + \frac{1}{\frac{K_c NC(s)}{DC(s)} * \left( \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} \right)}} e^{-L_n s}$$

$$H_{ry} = \frac{1}{1 + \frac{DC(s)}{K_n K_c} * \frac{(T_n s + 1)^2}{NC(s)}} e^{-L_n s} \quad (44)$$

Se observa en (44) dos dinámicas distintas, la primera  $\frac{(T_n s + 1)^2}{NC(s)}$  tiene un orden variable dependiendo del controlador elegido para el diseño mientras que la segunda  $\frac{DC(s)}{K_n K_c}$  mantiene su orden y solo depende de constantes, de manera que se puede renombrar las anteriores dinámicas para generalizar la ecuación como se muestra en (45):

$$H_{ry} = \frac{1}{1 + X(s)T_r s} e^{-L_n s} \quad (45)$$

En donde:

$$T_r = \frac{T_i}{K_n K_c} \quad y \quad X(s) = \frac{(T_n s + 1)^2}{NC(s)} \quad (46)$$

El siguiente paso para el diseño del filtro es remplazar la respuesta en lazo cerrado obtenida en (45), dentro de la respuesta a perturbaciones o de lazo abierto (36) de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}
H_{yq} &= \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \left[ 1 - \frac{1}{1 + X(s)T_r s} * \frac{N_r(s)}{D_r(s)} e^{-L_n s} \right] \\
H_{yq} &= \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \left[ \frac{(1 + X(s)T_r s)D_r(s) - N_r(s)}{(1 + X(s)T_r s)D_r(s)} e^{-L_n s} \right]
\end{aligned} \quad (47)$$

Se aprecia en la respuesta de (47) que la dinámica de lazo cerrado dificulta la acción del filtro, por lo tanto, sería ideal cancelar también esta dinámica. Así, el numerador del filtro debería tener una dinámica para cancelar los polos de lazo cerrado y otra para los polos de lazo abierto, y se plantea un filtro modificado del ya propuesto en 51 con orden variable de la forma:

$$F_r(s) = \frac{(X(s)T_r s + 1)(\beta s + 1)}{(T_f s + 1)^2} \quad (48)$$

En donde  $T_f$  equivale al valor de los polos del filtro, y es un parámetro de libre elección. La literatura citada en 51 y 52 recomienda que el valor escogido suponga una mayor rapidez frente a la dinámica de lazo cerrado del sistema total presentada anteriormente en la ecuación (45), en donde al remplazar la dinámica del filtro propuesta en (48), se deduce la ecuación (49) presentada a continuación:

$$\begin{aligned}
H_{yq} &= \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \left[ 1 - \frac{1}{1 + X(s)T_r s} * \frac{(X(s)T_r s + 1)(\beta s + 1)}{(T_f s + 1)^2} e^{-L_n s} \right] \\
H_{yq} &= \frac{K_n}{(T_n s + 1)^2} e^{-L_n s} \left[ \frac{(T_f s + 1)^2 - (\beta s + 1)e^{-L_n s}}{(T_f s + 1)^2} \right]
\end{aligned} \quad (49)$$

Una vez calculada la dinámica de lazo cerrado del sistema, se debe lograr que el numerador  $(T_f s + 1)^2 - (\beta s + 1)e^{-L_n s}$  cancele los polos lentos de la planta  $(T_n s + 1)^2$ . Para tal motivo se debe evaluar el denominador con la raíz del polinomio (polo) (50) y finalmente encontrar el valor de  $\beta$  (51). Estos dos pasos finales se entienden como las condiciones necesarias para el nuevo filtro del predictor de Smith explicadas anteriormente.

$$\left( T_f \left( -1/T_n \right)^2 + 1 \right) - \left( \beta \left( -1/T_n \right) + 1 \right) e^{-L_n \left( -1/T_n \right)} = 0 \quad (50)$$

Así se tiene que:

$$\beta = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{T_f}{T_n} \right)^2 e^{-L_n/T_n} \right] T_n \quad (51)$$

Con  $T_f = 2$ ,  $T_n = \tau = 12.73$  y  $L_n = t_m = 10.2$  se define un valor de  $\beta = 8.7$  el cual es independiente del tipo de controlador que se utilice.

El último paso sería evaluar el filtro (48) cumpliendo las dos condiciones necesarias, para esto se utilizan los controladores planteados en (41),(42) y (43) de modo que se plantea el filtro generalizado de orden variable para usar en la respuesta de lazo abierto de la siguiente manera:

$$F_r(s) = \frac{(X(s)T_r s + 1)(8.7s + 1)}{(2s + 1)^2} \quad (52)$$

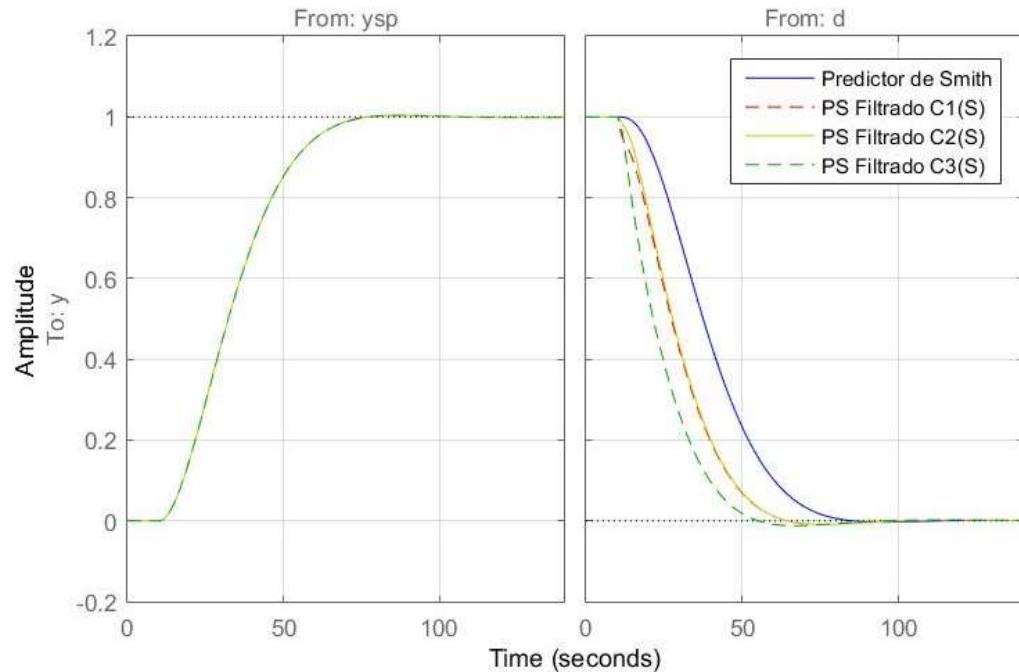
Cuya acción de rechazo de perturbaciones en la respuesta de lazo abierto (53), se observa en la **Figura 54**.

$$H_{yq}(s) = \frac{-4.302}{(12.73s + 1)^2} e^{-10.2s} \left[ 1 - \frac{1}{1 + X(s)T_r s} \frac{(X(s)T_r s + 1)(8.7s + 1)}{(2s + 1)^2} e^{-10.2s} \right]$$

$$H_{yq}(s) = \frac{-4.302}{(12.73s + 1)^2} e^{-10.2s} \left[ \frac{(2s + 1)^2 - (8.7s + 1)e^{-10.2s}}{(2s + 1)^2} \right] \quad (53)$$

**Figura 54.** Respuesta con los filtros de rechazo de perturbaciones.

**Figura 55.**



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

La respuesta del sistema utilizando cada uno de los filtros ha demostrado que el rechazo a perturbaciones se ha disminuido en un tiempo de entre 15 y 20 segundos, mientras la respuesta de establecimiento a la referencia se mantiene idéntica para el modelo nominal. Las funciones de transferencia de los filtros resultantes para cada controlador aplicado en la **Figura 54**, se presentan respectivamente en las ecuaciones (54), (55) y (56):

$$F_{1r(s)} = \frac{13.7s^4 + 3.7s^3 + 2.5s^2 + 0.4s + 0.01}{s^3 + 1.06s^2 + 0.3s + 0.01} \quad (54)$$

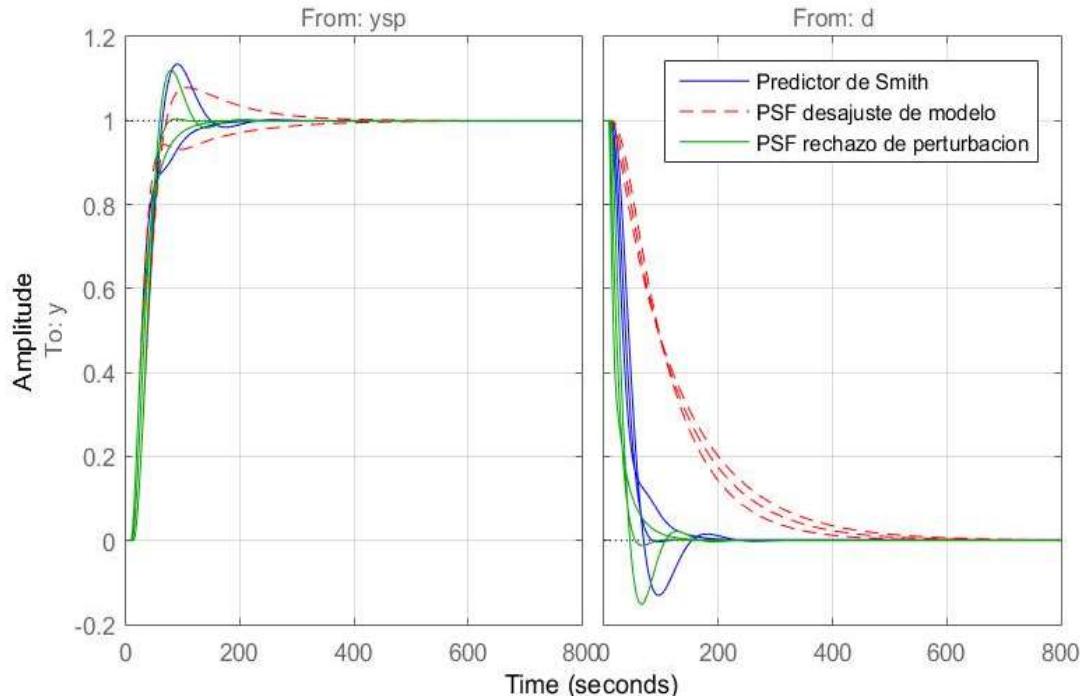
$$F_{2r(s)} = \frac{16.3s^3 + 3.2s^2 + 8.8s + 1}{4s^2 + 4s + 1} \quad (55)$$

$$F_{3r(s)} = \frac{51.3s^2 + 14.6s + 1}{4s^2 + 4s + 1} \quad (56)$$

Como se puede observar, el orden del filtro disminuye conforme las dinámicas del controlador cancelan las dinámicas lentas de la planta en la respuesta de lazo cerrado. Mientras que el primer filtro de orden 4 supone el desempeño ideal de cómo se comportaría el sistema a cabalidad con el controlador PI calculado en (29), el último de ellos tiene una respuesta más rápida y con un sobre impulso despreciable de establecimiento. Cabe resaltar que como se dijo anteriormente, el diseño para cada filtro (excepto el primero) ha sido calculado con controladores independientes del controlador PI primario.

Por lo anterior, se toma el filtro  $F_{3r(s)}$  como filtro de rechazo de perturbaciones principal, ya que su respuesta ha sido significativamente más rápida y este es un filtro de orden reducido más fácil de implementar y simular por su cantidad de ceros y polos. Su respuesta en comparación al filtro para desajuste de modelo planteado en (34) se puede apreciar en la **Figura 56**.

**Figura 56.** Comparación de filtros para el Predictor de Smith .



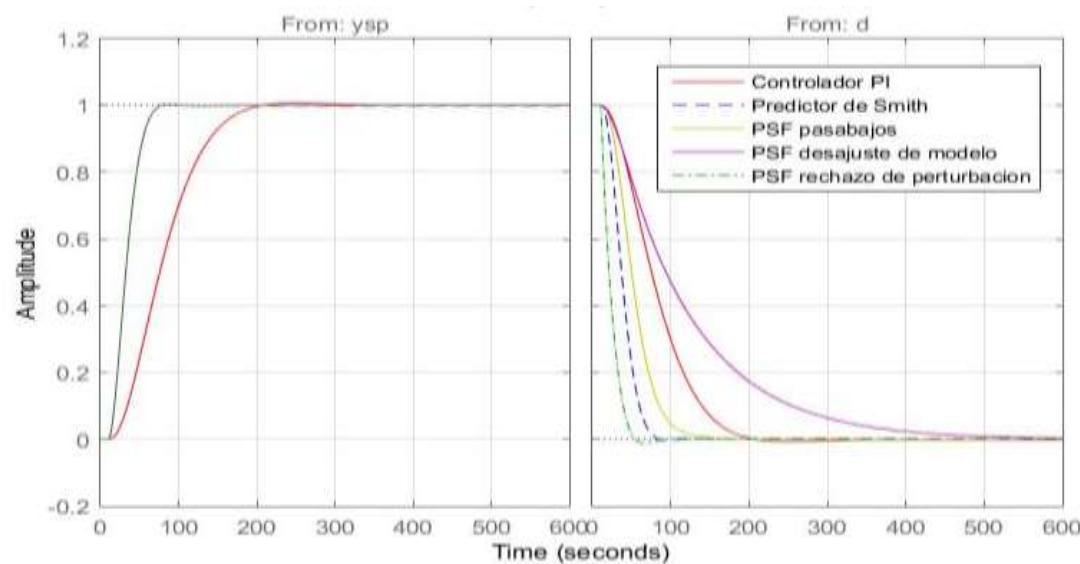
Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Se puede concluir que el predictor de Smith es una estructura de compensación de tiempo muerto bastante efectiva. Este logra disminuir el tiempo de establecimiento en la referencia para el sistema, sin embargo, tiene varios problemas de estabilidad frente a perturbaciones y desfase en el cálculo del proceso estimado respecto al proceso real. Por esta razón se plantearon dos filtros los cuales mejoraron el comportamiento general del sistema.

En consecuencia, se puede deducir de la **Figura 56** que el último filtro genera una respuesta de comportamiento intermedio entre robustez y rapidez, ya que es igual de rápido como el sistema con el predictor de Smith nominal para alcanzar la referencia mejorando levemente la respuesta de modelos inexactos por desajuste y además logra mejorar la respuesta de establecimiento frente a perturbaciones.

Para finalizar esta sección de diseño y simulación, se presenta en la **Figura 57** una comparación de la respuesta del sistema principal con el controlador PID, el predictor de Smith, el predictor con el filtro de pasa bajos y el filtro para desajustes del modelo y finalmente con el filtro de rechazo a perturbaciones.

**Figura 57.** Recuento de controladores simulados.



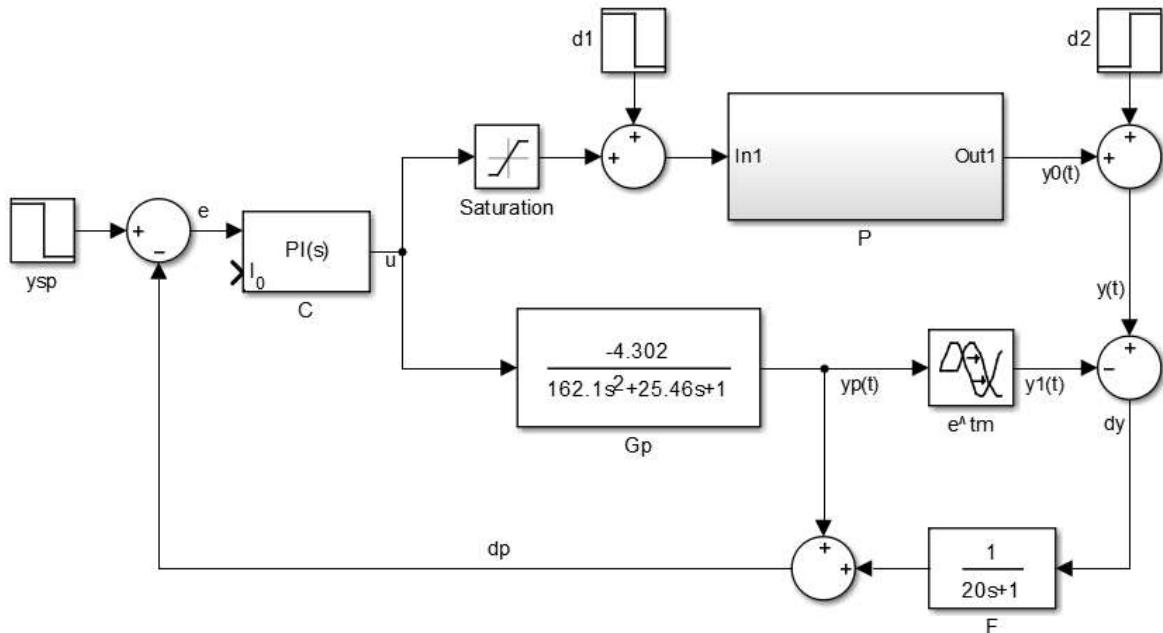
Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

## 4. RESULTADOS

### 4.1 SIMULACIÓN DEL PROCESO REAL EN SIMULINK

Una vez se han planteado distintas posibilidades de controladores basados en una misma estructura de diseño, se debe evaluar las condiciones reales en las cuales el proceso de almacenamiento de hidrógeno se va a realizar. Esta evaluación determinará qué tan robusto será el controlador frente a posibles perturbaciones físicas o químicas. Para tal propósito se ha implementado un diagrama de bloques en Simulink presentado en la **Figura 58**, el cual pretende simular la dinámica de este proceso de la forma más certera posible, de manera que al momento de implementar el controlador no existan problemas en el desempeño del mismo.

**Figura 58.** Simulación del proceso de control.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Dentro del anterior esquema se observa las partes implícitas en el proceso de control, utilizando la planta **G<sub>p</sub>** calculada anteriormente en (22), el controlador **PI** que se rige por las constantes estimadas en (31), uno de los filtros **F** descrito en la

ecuación (32), una perturbación de entrada **d1** y otra de salida del sistema **d2**. Adicionalmente se agrega un saturador de límite inferior 0 y límite superior 50, cuya función es crear un rango de trabajo del PWM cuyo comportamiento se rige mediante el controlador PI, esto con el fin de evitar valores muy altos o inferiores al voltaje mínimo de trabajo para el compresor.

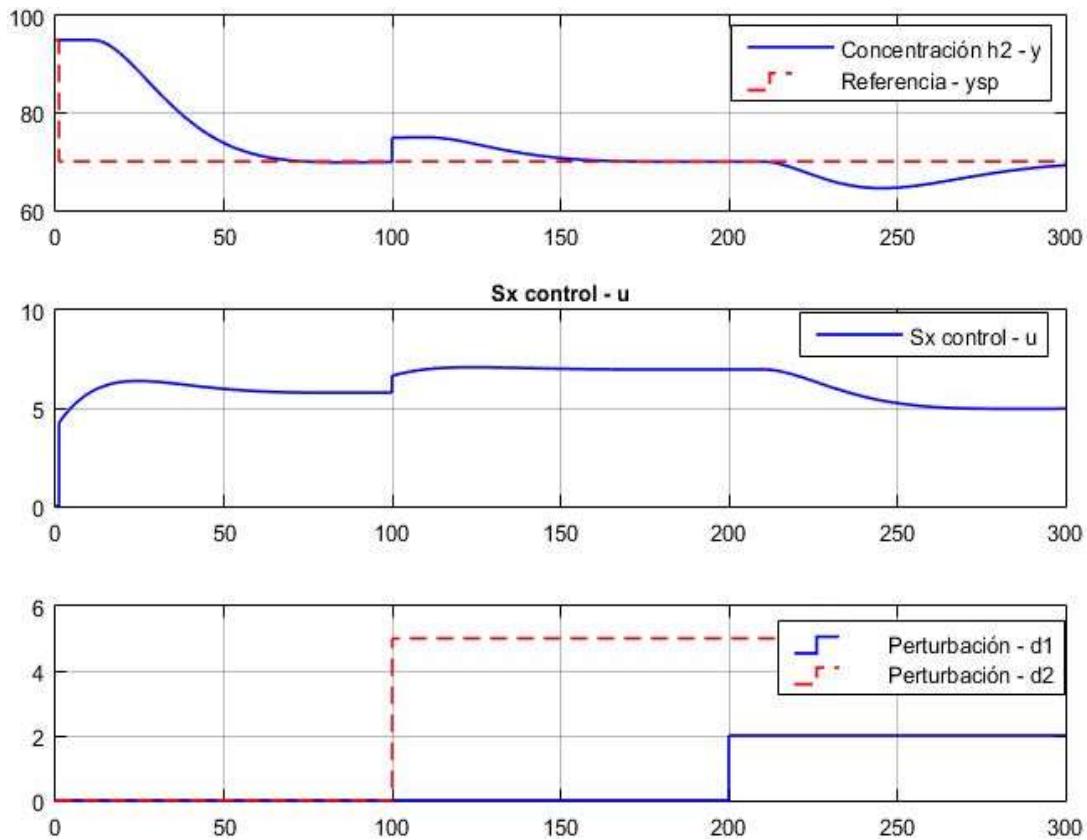
#### 4.1.1 Prueba preliminar

Como primera prueba de desempeño se ha dispuesto del sistema de control sin ningún filtro y únicamente se utiliza el controlador PI con la estructura del predictor de Smith. Ya que el modelo de la Planta CFIS se ha modelado con respecto a su almacenamiento, las dinámicas de generación se desprecian en la simulación, por lo que se toma un valor de referencia de concentración de hidrógeno alto de alrededor del 95%, el cual es un valor muy habitual de concentración máxima.

Siendo que la metodología de control de almacenamiento pretende obtener un valor de concentración fijo de referencia, este siempre debe ser de menor cantidad con respecto al valor máximo, ya que, si la referencia que se debe alcanzar es mayor al valor inicial, el controlador intentará generar valores negativos de PWM que en teoría supondrían un incremento de la concentración de hidrógeno. Sin embargo, en el caso práctico estos valores son despreciados por el saturador y convertidos a cero, mientras que la CFIS recupera su valor de concentración por si sola debido a su proceso natural de generación de hidrógeno.

A continuación, se presenta la **Figura 59** en la cual es posible observar como la concentración de h2 sigue una referencia del 70% y además se muestra el comportamiento de la señal de control en conjunto con las perturbaciones de entrada y salida.

Figura 59. Gráficas del proceso nominal en simulink.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Al hacer un análisis temporal se encuentra que la concentración de hidrógeno se establece en el 70% dentro un tiempo de 80 segundos, mientras que la señal de control genera un ciclo útil máximo para el PWM de un poco más del 5%, lo que advierte que el compresor trabajara con voltajes relativamente bajos.

Más adelante, a los 100 segundos se dispara la primera perturbación, la cual es una perturbación de salida del sistema. Esta perturbación está simulando desfases en la concentración final de hidrógeno esperada por el controlador, cuyas posibles causas físicas y químicas son factores externos al proceso de generación, tales

como variación de temperatura ambiente, variación del voltaje de fuente de la CFIS, fugas de hidrógeno, entre otras. En este caso se supone que la perturbación aumenta en un 5% el valor de concentración final y se observa que en esta situación la señal de control aumenta su amplitud levemente para que la concentración logre establecerse nuevamente al pasar 50 segundos.

Finalmente, pasados los 200 segundos aparece la segunda perturbación. Esta perturbación de entrada simula un desfase en los valores de voltaje de entrada para el compresor, los cuales son controlados mayormente por el PWM que genera el controlador primario PI. Sin embargo, al existir una etapa de potencia, la dinámica de los componentes de esta tales como mosfets, transistores, reductores de voltaje (buck), hacen que exista una incertidumbre con respecto al valor real de entrada de voltaje para el compresor, esta incertidumbre se simula con un aumento o decremento del ciclo útil de PWM. Para este propósito se ha aumentado el ciclo útil en un 2% y se observa que el controlador reduce la amplitud de la señal de control en forma discreta, mientras que la concentración vuelve a su valor de referencia tras poco más de 80 segundos.

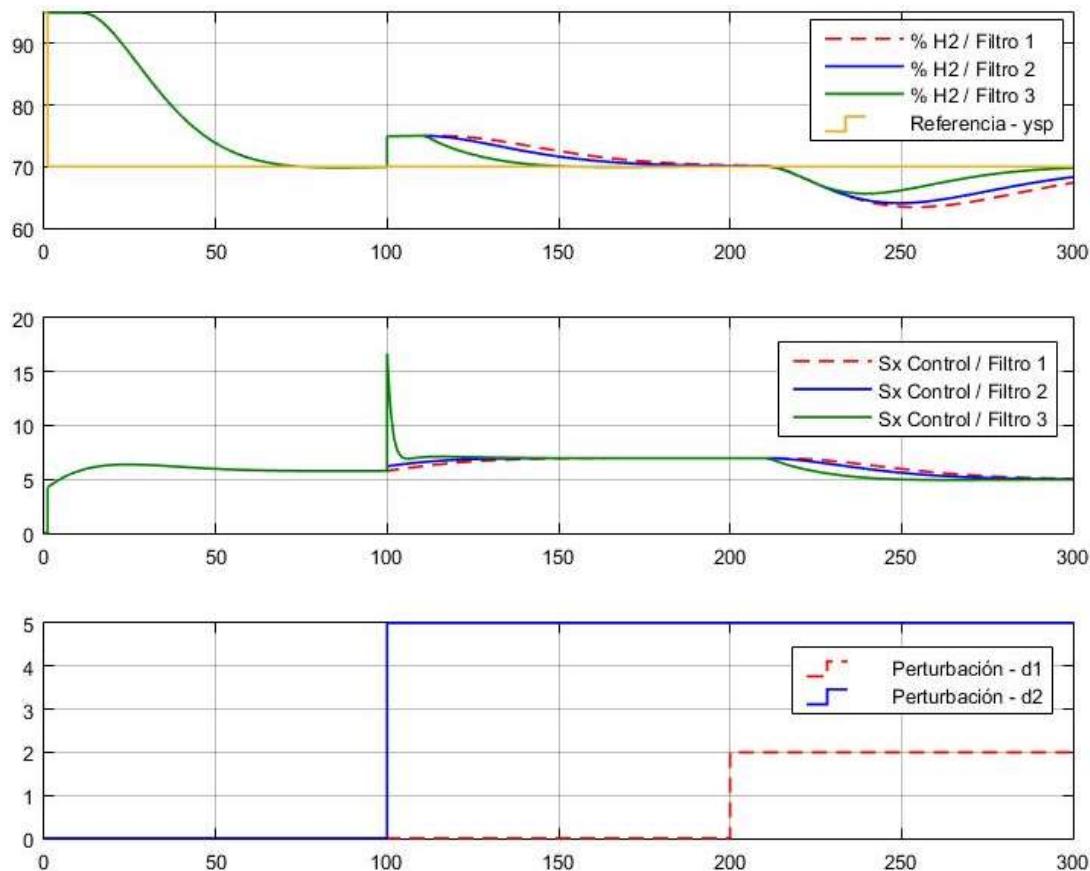
#### 4.1.2 Prueba de rechazo de perturbaciones con filtros

En la anterior sección se explica las equivalencias en el ámbito real y práctico de las perturbaciones tanto de entrada como de salida de la planta, en donde se aprecia que el sistema debe reajustarse para establecer nuevamente la concentración al valor de referencia. Aunque las perturbaciones de salida se manejan de forma más rápida que las de entrada, esto sigue siendo un factor en contra cuando se trata de un sistema de control basado en la estructura del predictor de Smith. Para esto se hizo un estudio variado de distintos filtros que se pueden implementar para compensar dicha problemática.

Tras implementar los filtros con su función de transferencia descritos en las ecuaciones (32),(34) y (56) dentro de Simulink, se obtienen los siguientes resultados presentados en la **Figura 60**. En la figura se observa que los dos primeros filtros no suponen ninguna mejora, ya que estos dos fueron diseñados pensando en compensar desajustes de la estimación del modelo dinámico de generación, mientras que el tercer filtro genera una mejora de establecimiento de alrededor de 20 segundos, con el costo de un sobre impulso en la señal de control con amplitud cercada al 15%. Sin embargo, este es un valor que encaja totalmente en el rango de trabajo del compresor y no presentaría ningún problema al momento de implementarse.

Este último filtro, es un filtro de segundo orden que fue calculado basándose en la metodología planteada en 51, que como se explicó anteriormente, tiene como finalidad mitigar las dinámicas lentas del denominador de la dinámica de lazo abierto del sistema. Adicionalmente reemplaza parcial o totalmente el numerador de la dinámica de lazo cerrado lo que garantiza no afectar la respuesta de establecimiento de concentración en la referencia, más sí acelera el tiempo de establecimiento frente a perturbaciones de entrada o salida de la planta CFIS.

**Figura 60.** Gráficas del proceso nominal con diferentes filtros en simulink.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

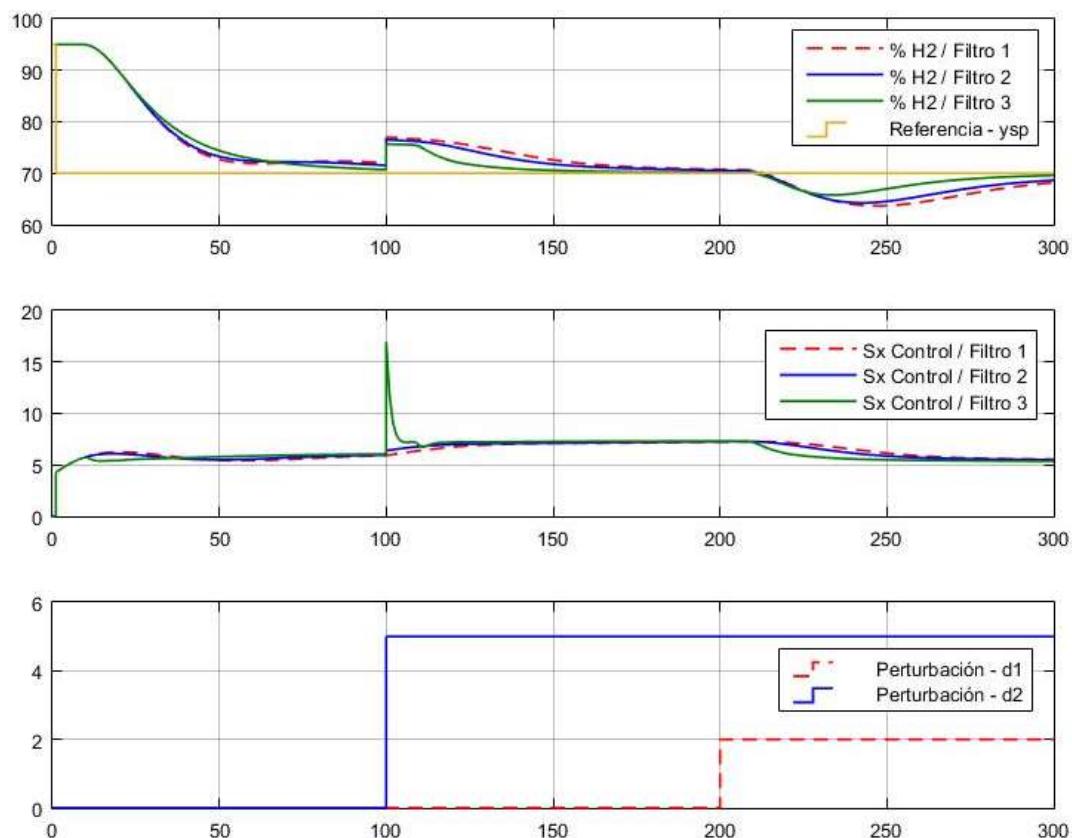
#### 4.1.3 Prueba para desajustes del modelo con filtros

Para concluir la sección de simulación, vale la pena analizar la respuesta de toda la estructura de control y los filtros calculados frente a posibles desajustes del modelo,

puesto que la estimación y cálculo matemático de las dinámicas de almacenamiento de hidrógeno para la planta son una aproximación, que, aunque bastante cercanas a un modelo real, generan cierto rango de incertidumbre del comportamiento general del sistema en una implementación práctica.

Para llevar a cabo dicha prueba, se hace uso de uno de los modelos de planta previamente planteada en la ecuación (33), y se utilizan los mismos filtros y valores de perturbación, los resultados son presentados a continuación en la **Figura 61**.

**Figura 61.** Gráficas del proceso con desajuste y diferentes filtros en simulink.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Se evidencia que el establecimiento de la concentración de hidrógeno ya no se logra a cabalidad, de hecho, este no alcanza su referencia tras pasar 100 segundos que es cuando se dispara la primera perturbación. Sin embargo, el rango de error

independiente del filtro que se utilice es de alrededor de 1.5, lo cual no supondría un problema drástico.

Ahora bien, para evaluar que tan robusto es cada filtro ante los desajustes del modelo, se debe hacer un énfasis en la primera parte de establecimiento de concentración, donde se logra apreciar que el filtro 2 posee una curva de atenuamiento más suave que los demás. De igual forma, el filtro 3 posee un comportamiento aceptable, lo que sumado a la aceleración en el tiempo de respuesta a perturbaciones lo convierte en el filtro ideal para la implementación.

## 4.2 IMPLEMENTACIÓN EN PYTHON

Para la implementación del sistema de control en la unidad de procesamiento Raspberry, se utilizó Python como lenguaje de programación principal. Por tal motivo fue pertinente trabajar en tiempo discreto, lo que implica una discretización de todas las variables y funciones de transferencia que conforman el sistema.

### 4.2.1.1 Controlador PI discreto

La principal ley de control se trasladó a tiempo discreto con un tiempo de muestreo  $T$  adecuado, Ziegler y Nichols proponen:

$$T < \frac{t_m}{4} \quad T = \frac{\tau}{20} \quad (57)$$

En donde  $t_m$  es el tiempo muerto de la planta y  $T$  la constante de tiempo que define el establecimiento del sistema.

Para este caso se escoge  $T = 1s < \frac{t_m}{4}$ ,  $1 < \frac{10.2}{4}$ .

Según lo que se plantea en 53 el controlador PID viene dado por:

$$C_{(z^{-1})} = \frac{u_k}{e_k} = \frac{q_0 + q_1 z^{-1} + q_2 z^{-2}}{1 - z^{-1}} \quad (58)$$

En donde:

$$\begin{aligned}
q_0 &= k_p \left[ 1 + \frac{\tau}{2t_i} + \frac{t_d}{\tau} \right] \\
q_1 &= -k_p \left[ 1 - \frac{\tau}{2t_i} + \frac{2t_d}{\tau} \right] \\
q_2 &= \frac{k_p * t_d}{\tau}
\end{aligned} \tag{59}$$

Despejando  $u(k)$ :

$$u_k = u_k z^{-1} + q_0 e_k + q_1 z^{-1} e_k + q_2 z^{-2} e_k \tag{60}$$

Aplicando la transformada inversa de Z:

$$u_k = u_{(k-1)} + q_0 e_{(k)} + q_1 e_{(k-1)} + q_2 e_{(k-2)} \tag{61}$$

Utilizando los valores de la planta en la ecuación (22) y las constantes del controlador PI de (29) se tiene que:

$$u_k = u_{(k-1)} - 0.23e_{(k)} + 0.11e_{(k-1)} \tag{62}$$

#### 4.2.2 Discretización de la planta y filtro

Para el caso de las funciones de transferencia tanto de la planta como del filtro, se hace uso de un retenedor de orden cero (ZOH) 55, cuya ecuación es de la forma:

$$G_p(z) = \frac{b_0 z^2 + b_1 z + b_2}{z^2 + a_1 z + a_2} (z^{-d}) \tag{63}$$

Siguiendo la estructura de la ecuación (63) y utilizando la función **tustin c2d** en Matlab se tiene que las funciones de trasferencia discretas de la planta y el filtro son respectivamente:

$$G_p(z) = \frac{-0.008147z^2 - 0.01595z - 0.0004585}{z^2 - 1.849z + 0.8546} (z^{-11}) \tag{64}$$

$$F_r(z) = \frac{12.83z^2 - 22.2z - 9.525}{z^2 - 1.213z + 0.3679} \tag{65}$$

Ahora bien, para poder usar las funciones de transferencia en Python se transformó cada función en una ecuación de diferencias, obteniendo así una salida del modelo nominal de la siguiente forma:

$$y_{(k)} = b_0u[k - d] + b_1u[k - 1 - d] + b_2u[k - 2 - d] - a_1y[k - 1] - a_2y[k - 2] \quad (66)$$

En donde  $y$  es la salida resultante de la dinámica discretizada y  $u$  es un vector de tamaño  $n$  que almacena los valores pasados obtenidos en el proceso de control. Las salidas de la planta y filtro en ecuaciones de diferencias serían respectivamente:

$$y_{G(k)} = -0.008147u[k - 11] - 0.01595u[k - 12] - 0.0004585u[k - 13] + 1.849y[k - 1] - 0.8546y[k - 2] \quad (67)$$

$$y_{F(k)} = 12.83u[k] + 22.2u[k - 1] - 9.525u[k - 2] + 1.213y[k - 1] - 0.3679y[k - 2] \quad (68)$$

En la presente sección se pone a prueba la estrategia de control desarrollada anteriormente. Por lo tanto, para validar la eficiencia del sistema de control se dispuso de una conexión del montaje con todos los sensores y contando con una previa revisión y calibración de la celda de flujo iónico para que esta alcanzara un valor de concentración del 95%, el cual es óptimo para evaluar el comportamiento de todo el sistema.

### 4.3 PROCEDIMIENTO DE IMPLEMENTACIÓN FÍSICA

La metodología para la adquisición de datos y puesta en marcha del sistema de control se divide en los siguientes pasos:

#### 4.3.1 Conexión y calibración

Una vez se pone en marcha la CFIS, cada uno de los sensores y actuadores mencionados en la Sección 1 se conectan al sistema de energía fotovoltaico. Posteriormente, se verifica que la unidad de procesamiento Raspberry reciba correctamente la trama de datos en el orden que se indica a continuación:

$$datos = ID, T, CH, FH, SX, E, VP, IP, VR, IR, VB, IB \quad (69)$$

En orden respectivo se tiene el número de dato, tiempo de adquisición, concentración de hidrógeno, flujo de hidrógeno, señal de control, error con respecto a referencia, voltaje del panel, corriente del panel, voltaje del reactor, corriente del reactor, voltaje de la batería y corriente de la batería, el proceso detallado de la adquisición de datos se explica en la Sección 2.7 y en el **Anexo F**.

#### 4.3.1.1 Implementación física de los sensores.

El hardware empleado en esta investigación se concentra en las capacidades de los sensores propuestos y sus resultados.

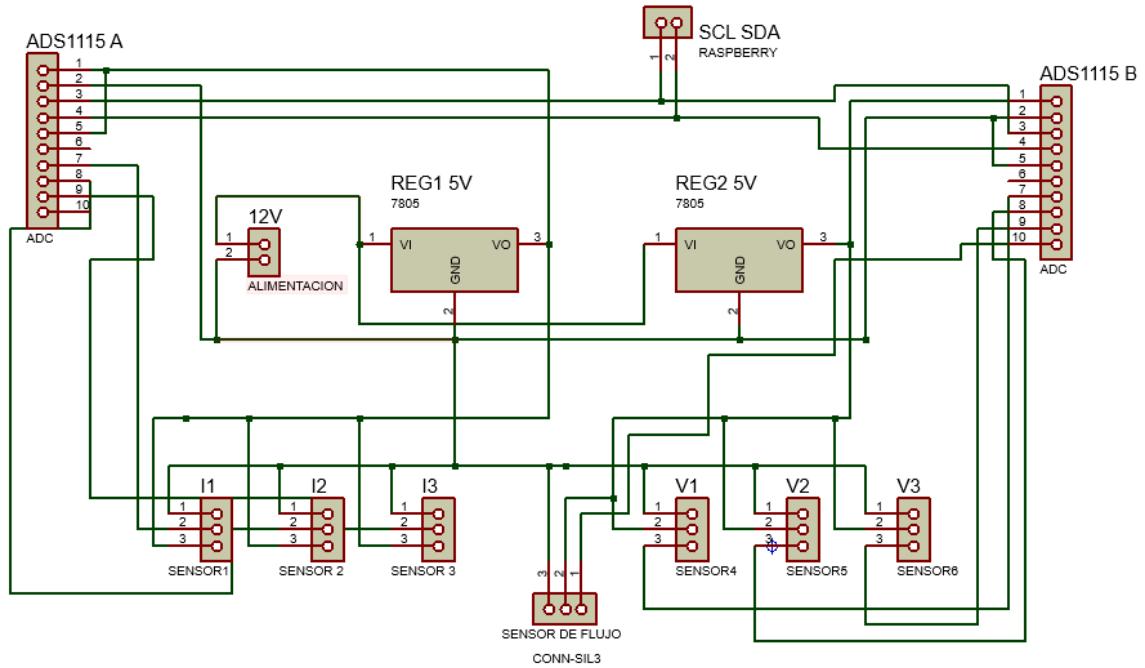
##### Voltaje, corriente y flujo.

Los registros de voltaje y corriente en las etapas de generación del panel solar, el almacenamiento de la batería y el consumo de la CFIS, agregando el sensor de flujo presente entre la etapa de generación y almacenamiento de hidrógeno como resultado de los transductores mencionados anteriormente, se ajustaron y se compararon con los valores medidos de instrumentos de medición presentes en los laboratorios de la universidad.

Las medidas obtenidas de estos sensores se intervienen por una etapa de muestreo y conversión de los ADS1115 antes de ingresar a la unidad lógica de procesamiento para el proceso detallado de adquisición de datos, así mismo esta etapa de sensado y conversión es acoplada a una fase de regulación para asegurar la alimentación estable de energía de los módulos.

Los diagramas circuitales de los sensores aparecen en la **Figura 62** y posteriormente se muestran los resultados físicos obtenidos en una placa de circuito impreso.

Figura 62. Diagrama circuital sensores de energia y flujo.



Fuente: Realizada en Proteus por Carlos Benavides, Cristian Enriquez  
 La implementación del plano circuital de los sensores en PCB se muestra en la 0:  
 Circuito impreso de sensores y conversores.



Fuente: Registro Fotografico, Carlos Benavides, Cristian Enriquez.

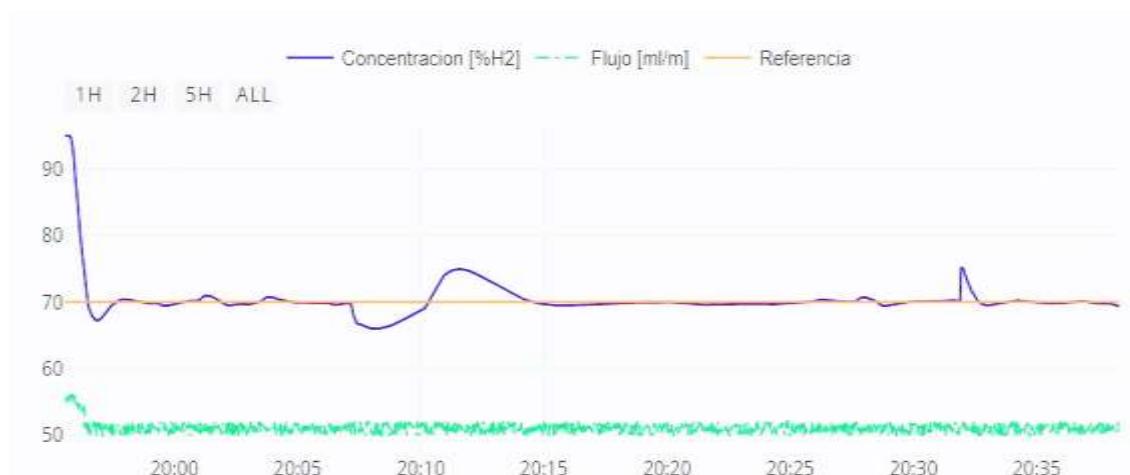
#### 4.3.2 Puesta en marcha del sistema

Para el manejo de todo el sistema se implementaron controles con los que se puede interactuar desde la aplicación. Por defecto la aplicación muestra el último vector de datos capturados en tiempo real en espera de una nueva adquisición y guarda los valores tomados con un intervalo deseado desde la aplicación local en Python. Esta aplicación se encuentra en el **Anexo I** e incluye el sistema de control, la comunicación con los sensores y la conexión en tiempo real con la base de datos de la aplicación de Dash previamente desplegada y almacenada en Heroku.

#### 4.3.3 Prueba de rendimiento

Esta prueba se realizó en condiciones normales para el desempeño de la CFIS durante un tiempo de alrededor de 30 minutos, logrando tomar más de 1800 datos los cuales se observan en las gráficas presentadas a continuación:

**Figura 63.** Resultados de concentración y flujo.



Fuente: Realizada en Ploty Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

**Figura 64.** Resultados de la señal de control.



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

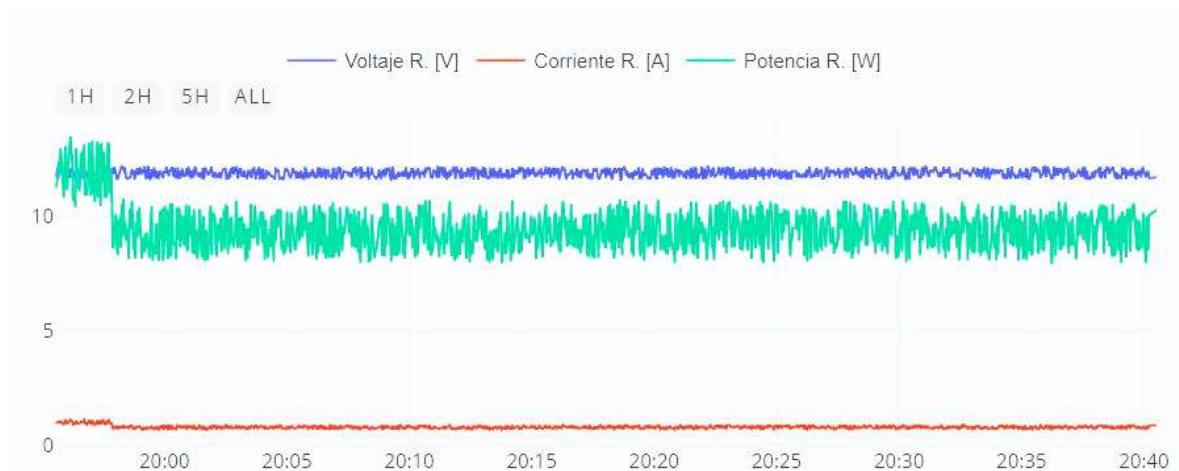
En la **Figura 63** se puede apreciar como la concentración de hidrógeno ya establecida en un valor del 95% empieza a caer en busca del valor de referencia en un 70%, valor que es idóneo para el almacenamiento constante del flujo de hidrógeno, así como se explica en 8. Además, se observa que el tiempo de establecimiento es de alrededor de 2 minutos, con el primer acercamiento a la referencia sucediendo a los 30 segundos, tal y como se esperaba basándose en las simulaciones planteadas en Matlab. Por otra parte, en la **Figura 64** la señal de control no supera un rango de 20% del ciclo útil para el PWM generado en Raspberry lo que corresponde alrededor de 2,4 V generados en la etapa de potencia por el MOSFET conectado a la carga. Esto indica que la actuación del compresor resulta ser de gran impacto para la concentración de hidrógeno de la celda, de tal forma que conserva un valor promedio del 6%, además se observa como la diferencia entre la concentración y la referencia deseada cae progresivamente mientras se establece la concentración.

La variable de flujo tiene un comportamiento relativamente constante ya que es medida de manera indirectamente por diferencia de presión, siendo sutilmente afectada por la acción del compresor y disminuyendo con mayor porcentaje de PWM, puesto que el hidrógeno aumentaría su paso en la caja de vacío para dirigirse hacia el tanque de almacenamiento.

Alrededor de pasados 10 minutos se indujo una perturbación de salida en el sistema, impidiendo el paso de hidrógeno momentáneamente al desconectar la CFIS del sensor de hidrógeno, lo que representa una recompensación del sistema que toma un par de minutos en restablecerse. Posteriormente, cerca de los 30 minutos se observa como el sistema responde ante una pérdida de la señal de control, en este caso por desconexión del circuito de potencia del compresor. Es entonces evidente que la recuperación del sistema se logra de forma más rápida para una perturbación de entrada con respecto a una perturbación de salida, sin embargo, en ningún momento se efectuó un desbordamiento del seguimiento de la referencia para ambos casos.

Ahora bien, pasando al ámbito de generación, almacenamiento y consumo energético, se observa en la **Figura 65** un voltaje y corriente mayormente constantes a lo largo del tiempo para la celda. Esto se debe a que la demanda de energía no se ve afectada por la actuación del sistema de control, y el compresor que es la carga más demandante de toda la implementación repercute más que todo en la batería.

**Figura 65.** Resultados de consumo energético del reactor (CFIS).

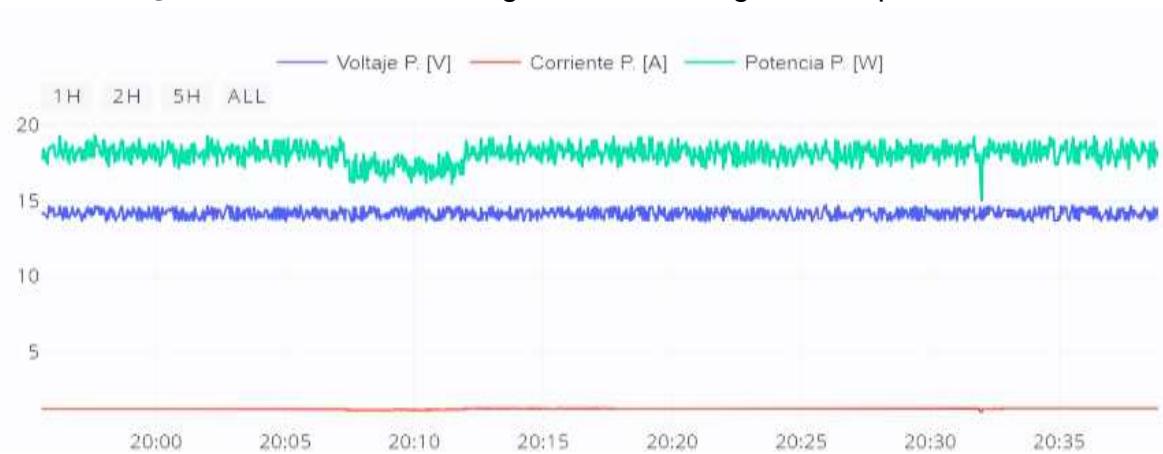


Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Para finalizar se presenta en la **Figura 66** y la **Figura 67**, las variables de eficiencia energética general del sistema fotovoltaico. Se evidencia un voltaje y corrientes

constantes en el panel solar ya que este administra la energía que requiere la batería a través del controlador, mientras que la batería sufre todo el peso de los cambios de consumo de las cargas de todo el montaje, en especial del compresor, siendo muy notorio cuando el control empieza ingresar hidrógeno al tanque en el inicio de la prueba.

**Figura 66.** Resultados de la generación energética del panel solar.



**Figura 67.** Resultados del consumo energético de la batería.



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

#### 4.3.4 Prueba de referencia variable

Para finalizar, se realizó una prueba de mayor complejidad para la planta o sistema dinámico ya que el valor de la referencia no es constante en el tiempo estipulado, sino que este varía por períodos. En esta prueba se logra apreciar diferentes comportamientos que demuestran la robustez de la estrategia de control empleada; lo anterior se puede observar en la **Figura 68**:

**Figura 68.** Seguimiento de referencia múltiple para la CFIS



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

En conclusión, el sistema de control evidencia un comportamiento eficiente y robusto, tanto al inicio del establecimiento en la referencia como en la respuesta frente a perturbaciones que simulan las posibles complicaciones del funcionamiento general en cualquiera que sea el propósito de aplicación para la generación de hidrógeno por medio la CFIS. Sin embargo, el desempeño general de la señal de control correspondía a un voltaje muy bajo para el actuador, esto debido a las características físicas del compresor, lo que generó inactividad e incertidumbre para valores de referencia muy bajos.

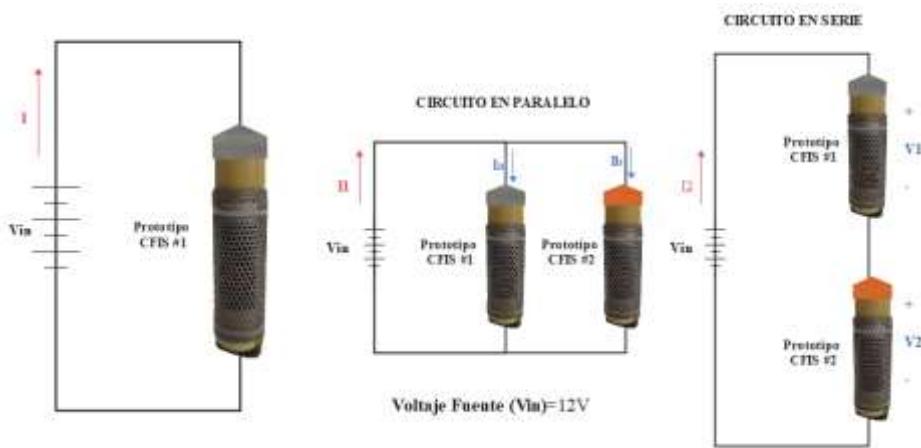
## 5. CASO DE ESTUDIO

Debido a las diversas aplicaciones en donde la tecnología de las CFIS y su sistema de control podría ser de gran ayuda, se ha estudiado en esta sección las medidas de desempeño del reactor con múltiples CFIS y sobre los diferentes acoplos de características y conexiones para la generación de hidrógeno. Además, se realizó un estudio dentro de Simulink sobre como un sistema dinámico con dos celdas responde a la estrategia de control ya planteada anteriormente.

### 5.1 SERIE Y PARALELO DE CFIS.

La metodología propuesta para la simulación de la estrategia de control se planteó con un reactor de 2 CFIS, acopladas en configuración de alimentación de voltaje en serie y paralelo. En la **Figura 69** se muestra el esquema de conexión de las celdas de generación dispuestas en estas dos configuraciones electrónicas.

Figura 69. Conexión en serie y paralelo CFIS



Fuente: Realizada en EDRAW por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Cabe resaltar que inicialmente se hicieron pruebas de funcionamiento de las celdas sin el sistema de control para observar las variables de consumo de energía eléctrica y concentración de hidrógeno con respecto al funcionamiento nominal de una sola CFIS. En la TABLA 8 se muestran los resultados prácticos arrojados por los dispositivos de medición de voltaje y corriente.

TABLA 8. MEDIDAS PRÁCTICAS DE VOLTAJE Y CORRIENTE CFIS

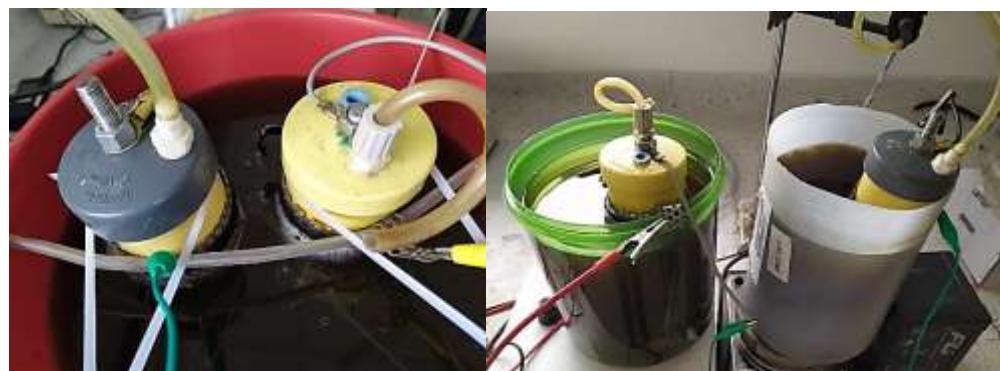
CFIS en serie		CFIS en Paralelo	
Fuente V in	12V	I Fuente	2,4 A
V1	5,54V	I1	1,22A
V2	5,86V	I2	1,26A
I Fuente	0,59A	V1	11,73
I1	0,61A	V2	11,05
I2	0,61A	Fuente V in	12V

Fuente: Carlos Benavides, Cristian Enríquez

## 5.2 REACTOR MÚLTIPLES CFIS

Otro aspecto para aclarar, es que se cambiaron las condiciones electroquímicas de reacción en las cuales el ánodo de las dos CFIS que está en contacto directo con la disolución acuosa de la orina y la urea se disponen en un mismo recipiente y en recipientes separados como se muestra en la **Figura 70**.

**Figura 70.** Disposición de las CFIS en uno y en dos recipientes.



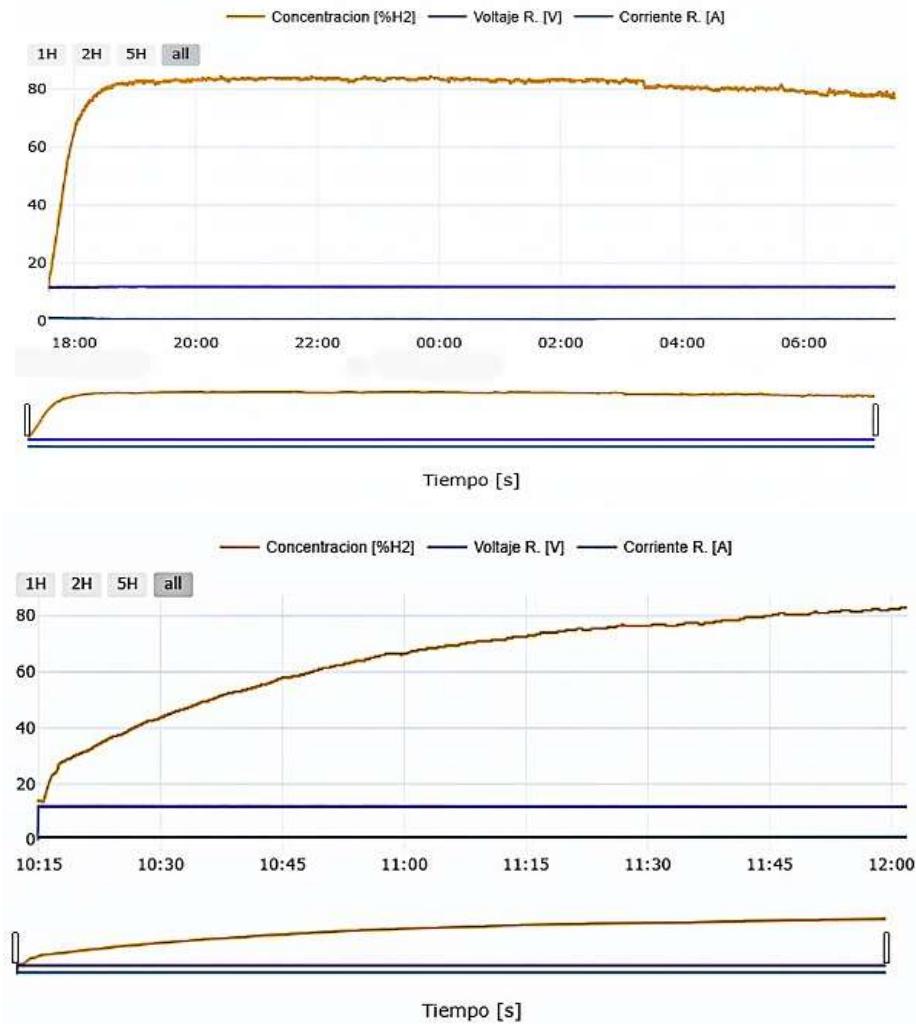
Fuente: Registro Fotográfico, Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Los comportamientos de las celdas en las condiciones mencionadas tienen leves variaciones de corriente debido al intercambio protónico de las sustancias y al flujo de iones en el área superficial de las CFIS, sin embargo, con una variación de consumo de las celdas de 200 mA más en un mismo recipiente, lo más recomendable es tener las celdas en recipientes separados, para obtener una mejor eficiencia energética.

En otro caso de estudio, un reactor con mayor número de celdas debido a que la velocidad de establecimiento en la concentración de hidrógeno aumenta, pues si se compara la generación de una sola CFIS referida en los resultados de la investigación, se tiene un mayor desempeño de concentración de hidrógeno y flujo en menor tiempo entre más se aumente el número de CFIS. No obstante, un aspecto a considerar y redimensionar es el circuito de potencia ya que existiría una mayor demanda energética por parte del reactor.

A continuación, en la **Figura 71** se muestra cómo, en aproximadamente una hora y media de funcionamiento, la curva de generación de hidrógeno se establece más rápido, se observa en la parte derecha como el tiempo de establecimiento es mucho mayor que con dos CFIS que están en la parte izquierda. Se infiere entonces que la cantidad de CFIS es directamente proporcional al tiempo de establecimiento en la concentración de hidrógeno y en la cantidad de flujo del mismo.

**Figura 71.** Establecimiento concentración de hidrógeno



Fuente: Realizada en Plotly Dash por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

Con esto se concluye que a nivel de simulación se puede plantear un modelo del sistema dinámico con una constante de tiempo de establecimiento más rápido, suponiendo así una mayor velocidad de incremento en la concentración y aumento de flujo de hidrógeno como se muestra en la **Figura 71**. En la ecuación (70) se observa la validación del modelo de la planta utilizando el mismo método descrito en la sección 3.2.2.6 con lo que se obtuvo una función de transferencia con una

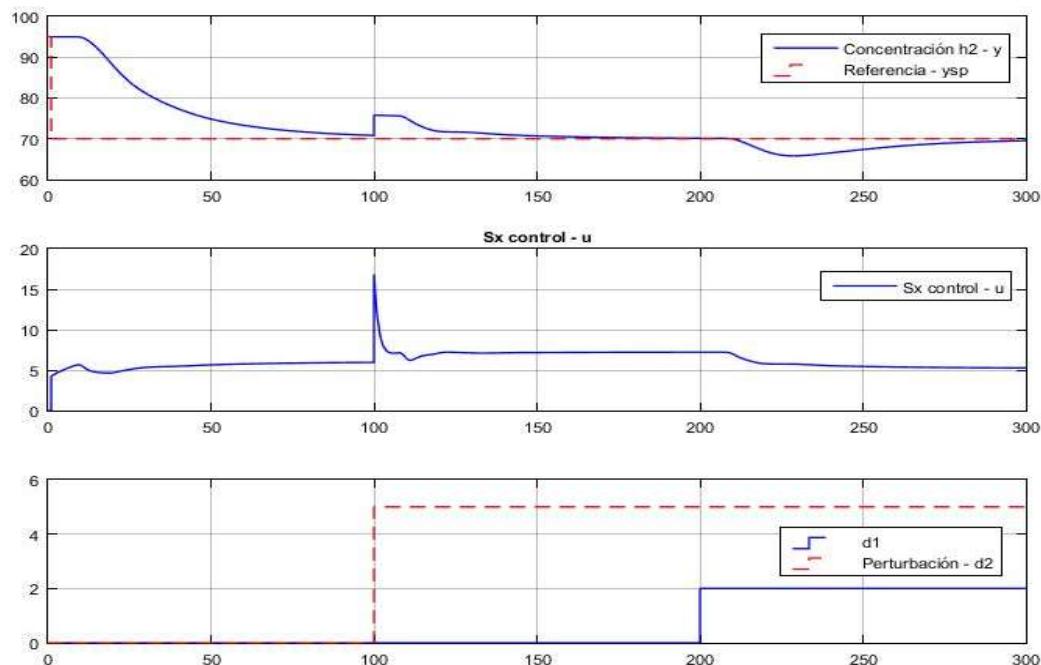
constante de tiempo ( $\tau$ ) de 9.10s, una ganancia ( $K$ ) de -4.15 y un tiempo muerto de misma magnitud.

$$G_p(s) = \frac{-4.15e^{-10.2s}}{(18.73 s + 1)^2} \quad (70)$$

### 5.3 SIMULACIÓN DE CONTROL PARA REACTOR DE MÚLTIPLES CFIS

Para motivo de la simulación, se puede traducir el análisis como un ejemplo mas de desajuste del modelo estimado, ya que, si bien el tiempo de establecimiento de la concentración de hidrogeno y la ganancia de la función de transferencia de las celdas en paralelo son menores en magnitud, estos factores no distan demasiado de la función de transferencia original calculada para una única celda CFIS, lo cual se traduce en una respuesta similar a la estrategia de control, así como se observa en la **Figura 72**:

**Figura 72.** Simulación para control de almacenamiento con dos celdas en paralelo.

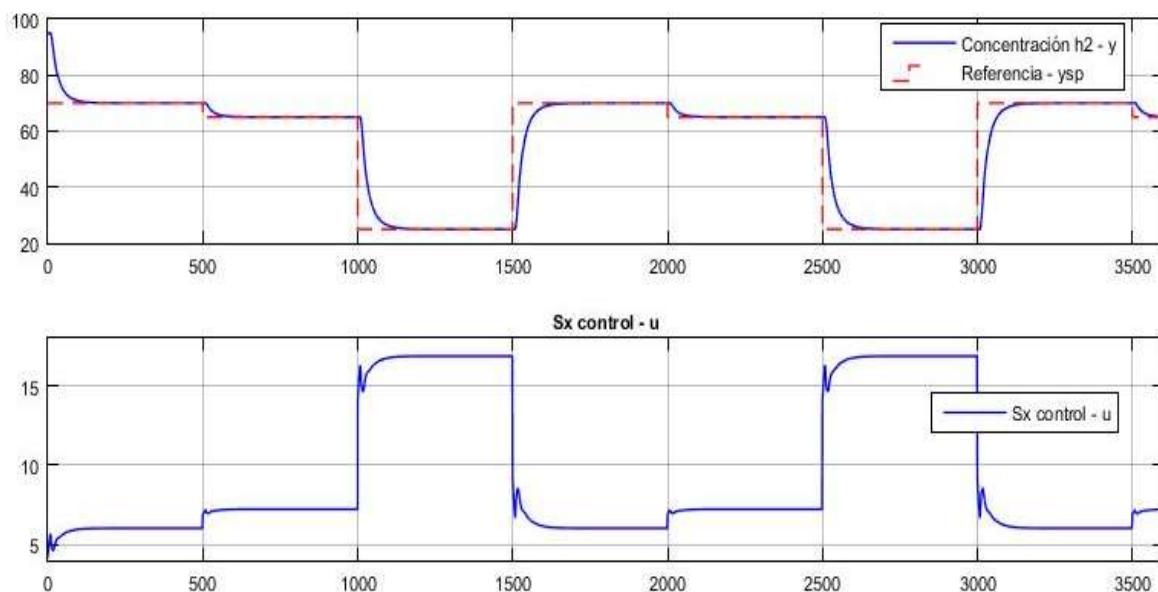


Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

En comparación con el funcionamiento de la celda CFIS individual expuesto en la **Figura 59**, se observó que esta nueva planta estimada en base a las dos celdas responde ligeramente más lento al sistema de control, se habla de un retraso de aproximadamente 20 segundos para el establecimiento de la concentración en la referencia y además se observa un pequeño sobre impulso en la señal de control frente a una perturbación de entrada, que, además de que sigue estando del rango de trabajo de la señal de control  $u(t)$  también evidencia un comportamiento robusto del sistema. Es importante mencionar que estas fluctuaciones pueden ser mitigadas cambiando la función de transferencia del predictor de Smith directamente por la función de la nueva planta.

Finalmente, se hizo un análisis del seguimiento de las celdas para distintas referencias de concentración de hidrógeno, encontrando un comportamiento similar al ya expuesto en la **Figura 68**, el cual fue un resultado físico de la implementación de la estrategia de control y por lo cual no se encuentran diferencias muy marcadas, más que las ya mencionadas como el tiempo de establecimiento prolongado por el desajuste del modelo y sobre impulsos en la señal de control.

**Figura 73.** Celdas en paralelo siguiendo multiples referencias sin perturbación.



Fuente: Realizada en Matlab por Carlos Benavides, Cristian Enriquez

En conclusión, el modelamiento de una planta que maneja múltiples CFIS siempre generara un cambio en la función de transferencia, por lo cual si se utiliza la estrategia de control estimada en la **sección 3** se tendrá ligeras fluctuaciones en la respuesta del sistema, sin embargo esta estrategia sigue siendo robusta y cumpliendo lo necesario de la investigación, por lo tanto, se recomienda en general cambiar la función de transferencia del predictor de Smith por la función de la nueva planta con la que se esté trabajando para obtener una respuesta más precisa y robusta y además tener las consideraciones de un circuito de potencia adecuado para la alimentación del número de celdas que se necesiten para la aplicación de generación de hidrógeno con la que se esté trabajando en cuestión.

## 6. CONCLUSIONES

En este caso específico, las tecnologías de generación de energía autosustentable aportaron en gran magnitud al reconocimiento e identificación de energías no convencionales, en las cuales el diseño y la estrategia de control propuesta comprobaron la complejidad de la electroquímica y la variabilidad que tienen los métodos cuando se aprovecha de la versatilidad de la electrónica para llevar al experimento a una clasificación automatizada y más moderna.

Se realizó una comparación e identificación de los transductores idóneos y hardware para la caracterización y modelamiento de la planta. Los resultados se ajustaron al comportamiento y dieron una mayor matriz de características de conducta del reactor en este caso. Considerando las particularidades electroquímicas propias de las sustancias empleadas, con sus cuidados, manipulación, usos y resultados se facilita el buen desempeño del alcance de los objetivos planteados.

Siempre existirá una incertidumbre en las mediciones y en la implementación de los montajes experimentales, por lo que fue necesario considerar etapas de regulación y filtrado de las señales para tener un buen acoplamiento de componentes y permitir que el sistema y los transductores arrojen medidas estables y de buena confiabilidad.

De acuerdo a los experimentos realizados, la estrategia de control que mejor se comportó y logró un rendimiento por encima de las estrategias convencionales fue el compensador de tiempo muerto (Predictor de Smith) puesto que logró disminuir el tiempo de establecimiento en la referencia y a pesar de que individualmente es susceptible a perturbaciones. Sin embargo, gracias a la etapa de filtrado logró una respuesta de acuerdo con los requerimientos de diseño.

La aplicación web fue desarrollada con muchas herramientas de análisis científico y recursos en línea de acceso gratuito que facilitaron el apropiamiento y la interacción del sistema de control, el montaje y los transductores. Esto significa que se puede manejar remotamente un sistema inteligente desde cualquier parte del mundo con acceso a la web logrando mejorar el flujo de trabajo y producción.

## 7. RECOMENDACIONES

Evaluar la implementación de un sistema de medición de flujo con un rango más sensible para detectar flujos de menor escala; además se debería proteger el sistema de transductores por posibles campos electromagnéticos o perturbaciones que puedan influir y/o distorsionar los valores medidos.

Adquisición de otro sensor de hidrógeno para hacer la comparación de la concentración de hidrógeno en la etapa de generación y almacenamiento, con el fin de evaluar la posibilidad de fugas y optimización de conductos para obtener una mayor fiabilidad y pureza del gas hidrógeno. De igual manera se debe proteger el sensor HPS-100 de posibles caídas y golpes, evitar flujo de líquido hacia el transductor y conservar la disposición vertical para el correcto funcionamiento del dispositivo.

En la elaboración de la CFIS, considerar la selección de buenos materiales de elaboración como también la selección de membranas y la ubicación de las mismas. Generalmente antes de efectuar el montaje se tiene que evaluar fugas dos o tres veces.

Para la inyección de hidrógeno en el tanque se recomienda utilizar un compresor o electro-bomba que maneje un flujo más pequeño, puesto que la sensibilidad de este actuador en concentraciones bajas de hidrógeno sale del rango de trabajo y puede generar problemas de fugas en el reactor CFIS.

### 7.1 TRABAJO FUTURO.

Se podría orientar el estudio de una estrategia de control con una matriz más nutrida de características de voltaje, corriente y flujo en evaluación de la CFIS, batería o panel, además de un sistema optimizado para que se logren discriminar mejor los errores y obtener una mayor eficiencia energética y de concentración de hidrógeno.

Siguiendo la metodología planteada en la fabricación de las CFIS, se puede explorar otras técnicas de elaboración y otros materiales de producción para evaluar los comportamientos de la patente internacional planteada en 7 y poder discutir las generalizaciones del intercambio protónico a través de las membranas, de igual

manera escalar los reactores en tamaño y permitir la evaluación de las señales eléctricas y de demanda energética.

Brindar acceso a la ciudadanía y a otros campos del conocimiento para que conozcan e indaguen acerca de estas tecnologías innovadoras, buscando potenciar el campo investigativo local para tener un mayor aprovechamiento de las materias primas regionales. La tecnología CFIS como un invento innovador se puede convertir en una potencia de energías renovables para solucionar problemas energéticos en territorios de difícil accesibilidad, es por eso que un trabajo futuro sería redimensionar los reactores y buscar implementarlos en estas condiciones.

## BIBLIOGRAFÍA

1. C. Fernández, "Energética del hidrógeno: Contexto, Estado Actual y Perspectivas del futuro", Tesis de Pregrado, Universidad de Sevilla, Sevilla, Andalucía, 2005.
2. A. O. Backus, "Hydrogen Economy". Nova Science Publications, New York: Penguin Group, 2006.
3. C. Casanova, "Diseño de un sistema de monitoreo de gas hidrógeno para el grupo de investigación estudio de agentes contaminantes", Tesis de Pregrado, Universidad de Nariño, Pasto, Nariño, 2016.
4. M. Guervós. (2003, marzo 15). Principales técnicas de almacenamiento de hidrógeno (2nd ed.) [En línea]. Disponible en: <https://docplayer.es/7851273-Principales-tecnicas-de-almacenamiento-de-hidrogeno.html>.
5. V. Molkov, "Fundamentals of hydrogen safety engineering". Bookboon. com, New York: ISBN, 2012, p. 978-87.
6. J.M. Clemente, "Comparación de tecnologías de almacenamiento energético provenientes de energías renovables". Real Academia de Doctores de España. Vol. 16. No. 1. Real Academia de Doctores de España, 2012.
7. J.J. Lozada, "Reactor que produce hidrógeno a partir de la reducción de los iones hidronio presentes en el equilibrio químico del agua y por la oxidación de las moléculas orgánicas presentes en excrementos". Patente de invención Nacional NC2017/0012602, Pasto-Colombia, 2017.
8. C. De la Cruz, "Optimización de las condiciones para la generación de hidrógeno para aplicaciones vehiculares a partir de la electrólisis de la orina humana usando una celda electroquímica de cátodo y ánodo separados", Tesis de Pregrado, Universidad de Nariño, Pasto, Nariño, 2016.
9. V. Subramani, A. Basile and N. Vezeroglu, "Compendium of Hydrogen Energy: Vol 1 Hydrogen Production and Purification". Cambridge: Woohead Publishing, 2015.
10. X. Castells and L. Jurado. "El hidrógeno y las pilas de combustible", Madrid: Ediciones Diaz de Santos, 2012.

11. D. J Durbin y C. M. Jugroot, “Review of hydrogen storage techniques for on board vehicle applications.” *International journal of hydrogen energy*, vol. 38, no. 34, pp. 14595-14617, 2013.
12. T. Hübner, L. Boon-Brett and W. Buttner, “Sensors for Safety and Process Control in Hydrogen Technologies CRC Press”, Taylor&Francis Group, Boca Raton, FL, 2015.
13. SK Pang Electronics Ltd, “PiCan 2.0 User Guide V1.3” 2016. [En línea] Disponible en:  
[http://skpang.co.uk/catalog/images/raspberrypi/pi\\_2/PICAN2UG13.pdf](http://skpang.co.uk/catalog/images/raspberrypi/pi_2/PICAN2UG13.pdf).
14. International Organization for Standardization. «Road vehicles – Controller area network CAN, 2015, [En línea] Disponible en:  
<https://www.iso.org/standard/63648.html>.
15. A. Requena, “Introducción a CAN Bus: Descripción, ejemplos y aplicación en tiempo real, Tesis M.S., Universidad Politécnica de Madrid, España 2017.
16. W. Voss, Controller Area Network Prototyping with Raspberry, Massachusetts: Copperhill Technologies Corporation, 2014.
17. F. A. Moreno, “El Bus I2C”, Tesis de pregrado, Dpto. de Arquitectura de computadores, Universidad de Córdoba, España, 2004.
18. M. Hernández, J. Gonzales, R. Hernández, J. Duran y N. Sánchez, “Raspberry Pi 3 y pcDuino, tutorial de instalación y configuración”, Colombia: ISBN 978-958-8957-74-6, Bogotá, 2018.
19. Sensor de Voltaje “Modulo Sensor de Voltaje FZ0430 0V ~ 25V”, 2020. [En línea] Disponible en: <https://ferretronica.com/products/modulo-sensor-de-voltaje-fz0430-0v-25v>.
20. Sensor de Corriente “Tutorial Sensor de corriente ACS712”, 2016. [En línea] Disponible en:  
[https://naylampmechatronics.com/blog/48\\_tutorial-sensor-de-corriente-acs712.html](https://naylampmechatronics.com/blog/48_tutorial-sensor-de-corriente-acs712.html).
21. Conversor ADS1115 “ADS1115 convertidor analógico digital ADC para Arduino” 2018. [En Línea] Avaiable: <https://programarfácil.com/blog/arduino-blog/ads1115-convertidor-analogico-digital-adc-arduino-esp8266/>.

22. Entrada Analógica De 16 Bits Con Arduino Y Adc ADS1115, noviembre 2016. [En línea] Disponible en: <https://www.luisllamas.es/entrada-analogica-adc-de-16-bits-con-arduino-y-ads1115/>.
23. GPIO, Documentation, Usage, Raspberry, 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.raspberrypi.org/documentation/usage/gpio/>.
24. Pythones.Net, “Python, definición y características”, 2015. [En línea] Disponible en: <https://pythones.net/que-es-python-y-sus-caracteristicas/>.
25. Plotly, “Introducing Dash - Create Reactive Web Apps in pure Python”, 2017. [En línea] Disponible en: <https://medium.com/plotly/introducing-dash-5ecf7191b503>
26. C. Sievert, “Plotly Technologies Inc. Create interactive web graphics via ‘plotly. Js”, Python package version 4, no. 1, 2017.
27. J.M. Leivy, “Attitudes of Fortune 500 Corporate Executives”, *Fortune*, vol. 30, No 2, 1992.
28. Pro Git, “Git en entornos distribuidos – flujos de trabajo”, 2019. [En línea] Disponible en: <https://git-scm.com/book/es/v2>.
29. López-Pellicer, Francisco J., "GitHub como herramienta docente.", *Actas de las XXI Jornadas de la Enseñanza Universitaria de la Informática*, Universitat Oberta La Salle, 2015.
30. Heroku, “Deploy and run apps on today's most innovative Platform as a Service”, 2019. [En línea] Disponible en: <https://www.heroku.com/platform>.
31. Plotly Dash, “Deploying Dash Apps”, 2019. [En línea] Disponible en: <https://dash.plot.ly/deployment>
32. B. Momjian, “PostgreSQL: introduction and concepts”. Vol. 192. New York: Addison-Wesley, 2001.
33. Y. D. González y F. Romero, “Patrón Modelo-Vista-Controlador”. *Revista Telemática*, vol. 47, no. 57, 2012.
34. R. C. Dorf, et al. “Sistemas de control moderno”, Pearson Educación, 2005.
35. J. Joseph, R. Allen y J. Iván, “Retroalimentación y sistemas de control”. Edición: 2<sup>a</sup>ed, 1995.

36. B. C. Kuo, "Sistemas de control automático". Pearson Educación, 1996.
37. V. M Alfaro, "IE-431 Laboratorio de Control Automático", Notas de clase, Escuela de ingeniería Eléctrica, Universidad de Costa Rica,1999.
38. V. M Alfaro, "Identificación de modelos de orden reducido a partir de la curvatura de reacción del proceso", *Revista de Ciencia y Tecnología*, vol. 24, no 2, 2006.
39. PC817, "PC817 Series SHARP", Datasheet, 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/43371/SHARP/PC817.html>.
40. IRFZ44N, "IRFZ44N Phillips Semiconductors, product specification", Datasheet, 2020. [En línea] Disponible en: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/17807/PHILIPS/IRFZ44N.html>
41. V. García, "Electrónica Practica Aplicada, El Transistor MOSFET", noviembre 2012. [En línea] Disponible en: <https://www.diarioelectronicohoy.com/blog/el-transistor-mosfet>
42. A.-K. Murad, Chen, Rong, Turevskiy y Arkadiy. "PID control design made easy". Matlab Digest, 2009
43. J. Martínez, O. Camacho. "Smith Predictor: tuning considerations for performance and robustness enhancements". *Revista Técnica Universidad de Zulia*, vol. 28, no 2,2005.
44. Smith, J.M. Otto, "Feedback control systems",1958.
45. S. A. C. Giraldo, Control realimentado – Predictor de Smith, 2015. [En línea] Disponible en: <https://controlautomaticoeducacion.com/control-realimentado/predictor-de-smith/>
46. M. Virginia, "Automatización y control industrial", Notas de clase en Control automático 1, Universidad Nacional de Quilmes, marzo 2002.
47. A. Ingimundarson, T. Hagglund, "Robust Tuning Procedures of Dead-Time Compensating Controllers", Tesis M.S., Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, NJ, USA, 2001.

48. D. Paor y M. Annraoi. "Controllers of Ziegler-Nichols type for unstable process with time delay". *International Journal of Control*, vol. 49, no 4, p. 1273-1284, 1989.
49. S. Pinzón y W. Pavón, "Diseño de Sistemas de Control Basados en el Análisis del Dominio en Frecuencia". *Revista Técnica" energía"*, vol. 15, no 2, 2019.
- 50., H.-P. Huang, "A Modified Smith Predictor with an Approximate Inverse of Dead Time," *AiChE Journal*, 1990.
51. J. E. Normey-Rico and E. F. Camacho, *Control of dead-time processes*. London: Springer, 2007.
52. S. A. Giraldo, "Estudo de tecnicas de sintonia do preditor de Smith filtrado para sistemas multivariaveis com atraso", Tesis M.S., Florianópolis, 2016.
53. J.G. Ziegler, & N.B. Nichols, "Optimum Settings for Automatic Controllers". *Journal of Dynamic Systems Measurement and Control-transactions of The Asme*, vol. 115, pp. 220-222. June, 1942.
54. M.C. Valdivia, "Sistemas de control continuos y discretos", Editorial Paraninfo, 2012.
55. S. T. Raymond, "Design of Feedback Control System", Prentice – Hall, Oxford, New York, 2002.

## **Anexos**

- |          |   |
|----------|---|
| Anexo A. | Protocolo de comunicación CAN                                 |
| Anexo B. | Código de programación de la interfaz web en Dash             |
| Anexo C. | Plantilla de estilos en cascada CSS                           |
| Anexo D. | Requerimientos de instalación para entorno virtual            |
| Anexo E. | Guía para el despliegue de la aplicación en Heroku            |
| Anexo F. | Código de programación para recopilación de datos en Postgres |
| Anexo G. | Script en Matlab sobre el comportamiento del controlador      |
| Anexo H. | Simulación en Simulink de la planta y Predictor de Smith      |
| Anexo I. | Código de la aplicación de control en Python                  |