



Title: “Detección de fallas en un sistema de tres tanques interactivos”

Author: Víctor Manuel, LADRON DE GUEVARA-RODRÍGUEZ, Luis Alejandro, RAMÍREZ-CABRERA, Manuel Alejandro, ZUÑIGA-CASTILLO, Gerardo, ROMERO-GALVÁN

Editorial label ECORFAN: 607-8534
BCIERMMI Control Number: 2018-03
BCIERMMI Classification (2018): 251018-0301

Pages: 23
Mail: laramirez@docentes.uat.edu.mx
RNA: 03-2010-032610115700-14

ECORFAN-México, S.C.
244 – 2 Itzopan Street
La Florida, Ecatepec Municipality
Mexico State, 55120 Zipcode
Phone: +52 | 55 6159 2296
Skype: ecorfan-mexico.s.c.
E-mail: contacto@ecorfan.org
Facebook: ECORFAN-México S. C.
Twitter: @EcorfanC

www.ecorfan.org

Holdings

| | | |
|---------|-------------|---------------------|
| Mexico | Colombia | Guatemala |
| Bolivia | Cameroon | Democratic Republic |
| Spain | El Salvador | of Congo |
| Ecuador | Taiwan | Nicaragua |
| Peru | Paraguay | |



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT

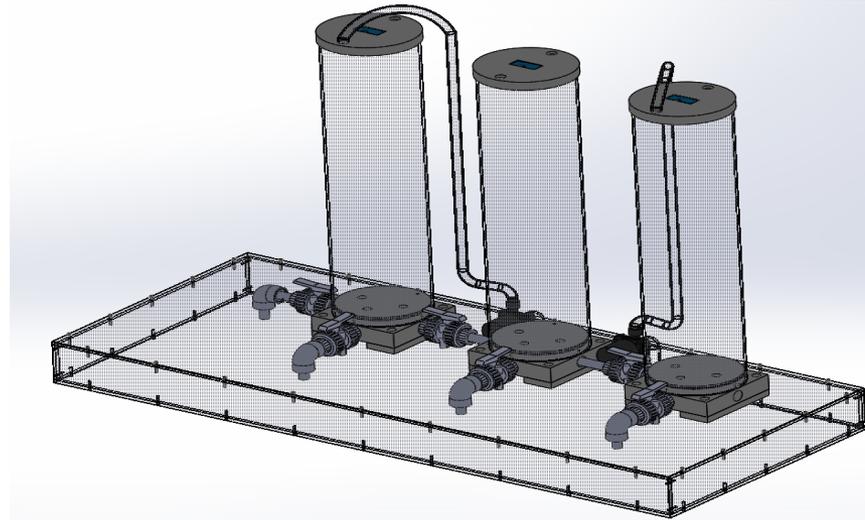


Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



ÍNDICE.

- 🔧 Introducción.
- 🔧 Plataforma experimental.
- 🔧 Detección de fallas
 - 🔧 Modelo matemático de la plataforma.
 - 🔧 Construcciones de los residuos basado en observadores.
- 🔧 Construcción de la plataforma experimental.
 - 🔧 Sensores y actuadores.
 - 🔧 Parte Computacional.
 - 🔧 Simulación y pruebas físicas.
- 🔧 Resultados.
- 🔧 Conclusiones.



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



INTRODUCCIÓN.

QUE ES UNA FALLA?

Una **falla** (fault) consiste en una desviación de una propiedad característica de un sistema con respecto a las condiciones usuales y estándar de operaciones (Verde,2013).



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



INTRODUCCIÓN.

- ✦ En este proyecto se propone el diseño e implementación de una estación de nivel de tres tanques formando un sistema interactivo para la simulación y detección de fallas.
- ✦ Para probar este modulo se desarrollo un algoritmo basado en observadores que facilitan el diseño de los generadores de residuos, el cual fue simulado para el sistema de tres tanques contemplando la presencia de fallas en sensores y actuadores.
- ✦ Finalmente, con el propósito de corroborar los resultados obtenidos en simulaciones, se presentan los resultados obtenidos en pruebas experimentales para realizar la comparación de las dos y dar veracidad de su funcionamiento.



**Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática**



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

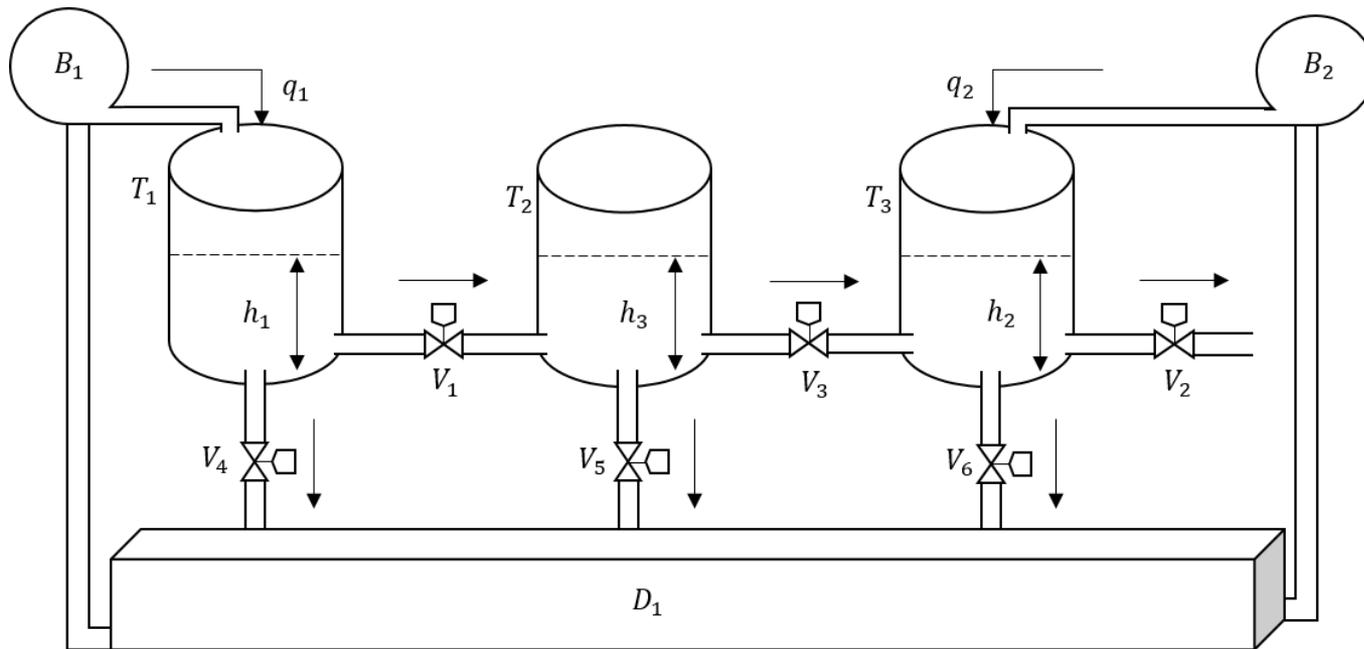
UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



PLATAFORMA EXPERIMENTAL



La plataforma experimental consiste en un sistema MIMO (Multiple Input Multiple Output) no lineal.



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



MODELO MATEMÁTICO

Partiendo del modelo matemático del sistema de tres tanques representado por las siguientes ecuaciones diferenciales (Ding, 2008)

Después de la linealización en los puntos de operación $h_1 = 45 \text{ cm}$, $h_2 = 15 \text{ cm}$ y $h_3 = 30 \text{ cm}$, tenemos un modelo lineal (nominal).

$$\dot{x} = Ax + Bu$$

$$y = Cx$$

Donde

$$x = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [h_1 \ h_2 \ h_3]^T$$

$$u = [q_1 \ q_2]^T$$

$$A = \begin{bmatrix} -0.02 & 0 & 0.02 \\ 0 & -0.0458 & 0.0196 \\ 0.02 & 0.0196 & -0.0396 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.006 & 0 \\ 0 & 0.006 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

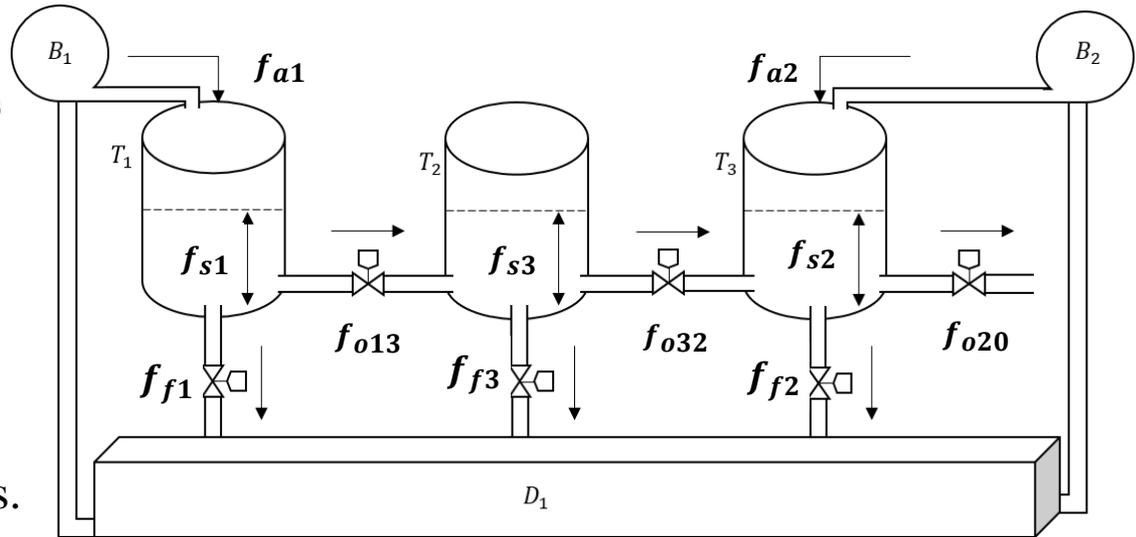
UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



MODELADO DE FALLAS



Considerando las siguientes fallas.

Fugas en los tanques f_{f1} , f_{f2} , f_{f3} , pueden ser modelados como adiciones a la salida de los tanques

Obstrucción entre el flujo de los tanques (T_1 , T_2 y T_3) son representadas por f_{o13} , f_{o20} , f_{o32}

Fallas en actuadores son las fallas presentes en las bombas, representadas por f_{a1} y f_{a2} .

Fallas en sensores, pueden ser representadas como adiciones a los tres sensores, denotados por f_{s1} , f_{s2} , f_{s3}



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



Las cuales son modeladas como fallas aditivas al sistema. El modelo con fallas se expresa como:

$$\dot{x} = Ax + Bu + E_f f$$

$$y = Cx + F_f f_s$$

Donde

$$E_f = \begin{bmatrix} -2.27 & 0 & 0 & -0.3 & 0 & 0 & 0.006 & 0 \\ 0 & -1.3 & 0 & 0 & 0.39 & 0.29 & 0 & 0.006 \\ 0 & 0 & 1.84 & 0.3 & 0 & -0.29 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad F_f = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$f = [f_{f1} \quad f_{f2} \quad f_{f3} \quad f_{o13} \quad f_{o20} \quad f_{o32} \quad f_{A1} \quad f_{A2}]^T$$

$$f_s = [f_{s1} \quad f_{s2} \quad f_{s3}]^T$$

Donde E_f representa la matriz de dinámica de fallas y el vector f y f_s las fallas



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



CONSTRUCCIÓN DE RESIDUOS BASADOS EN OBSERVADORES

La constricción de los residuos se basa en el desacoplo del sistema nominal en subsistemas sensibles a n fallas. Posterior a esto, se diseñó un observador para cada subsistema, de tal manera que el observador utilice las salidas y entradas correspondientes a la falla que se desea aislar.

Subsistema 1

$$\dot{h}_1 = A_1 h_1 + B_1 u_1 + G_1 y_3 + E_{1f} f$$

$$y_1 = C h_1 + F_{f1} f_s$$

Donde

$$A_1 = [0.02] \quad B_1 = [0.006]$$

$$G_1 = [0.02]$$

$$E_{1f} = [-2.27 \ 0 \ 0 \ -0.3 \ 0 \ 0 \ 0.006 \ 0]$$

$$C = [1] \quad F_{f1} = [1 \ 0 \ 0]$$



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



Subsistema 5

Los subsistemas 2 y 3, fueron desacoplados utilizando el mismo procedimiento. Los subsistemas 4, 5 y 6 son combinaciones de los subsistemas 1, 2 y 3, que representan los tres estados del sistema. Por ejemplo, el subsistema 5 es una combinación de los subsistemas 1 y 3, una relación de ambos.

$$\dot{h}_{1,3} = A_5 h_{1,3} + B_5 u_1 + G_5 y_2 + E_{5f} f$$

$$y_5 = C h_{1,3} + F_{f5} f_s$$

Donde

$$A_5 = \begin{bmatrix} -0.02 & 0.02 \\ 0.02 & -0.0396 \end{bmatrix} \quad B_5 = \begin{bmatrix} 0.006 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$G_5 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.0196 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad h_{1,3} = \begin{bmatrix} h_1 \\ h_3 \end{bmatrix}$$

$$F_{f1} = [1 \ 0 \ 0]$$

$$E_{5f} = \begin{bmatrix} -2.27 & 0 & 0 & -0.3 & 0 & 0 & 0.006 & 0 \\ 0 & 0 & 1.84 & 0.3 & 0 & -0.29 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



OBSERVADOR

son algoritmos que reconstruyen de forma económica las variables de estado no disponibles de un sistema, a partir de su modelo y el conocimiento del vector de entradas $u(t)$ y del vector de salidas $y(t)$

$$\text{Observador 1} \quad \begin{aligned} \dot{\hat{h}}_1 &= A_1 \hat{h}_1 + B_1 u_1 + G_1 y_3 + L_1 (y_1 - C_1 \hat{h}_1) \\ \hat{y}_1 &= C_1 \hat{h}_1 \end{aligned}$$

RESIDUOS

Los residuos, son el resultado de la diferencia de los estados del sistema donde ocurren las fallas y los estados estimados a partir de un banco de observadores. La activación de cada uno de los residuos construidos dependerá de la ocurrencia de las fallas, cada residuo es sensible a ciertas fallas debido al desacoplo.

$$r_1 = y_1 - C_1 \hat{h}_1$$



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



RESIDUOS

A continuación se presenta la tabla de firmas de los residuos, la cual presenta la sensibilidad de cada residuo a cada falla específica.

| residuos fallas | r_1 | r_2 | r_3 | r_5 | r_6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{f1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{f2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{f3} | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o13} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o20} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{o32} | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{A1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{A2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{s1} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{s2} | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| f_{s3} | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |





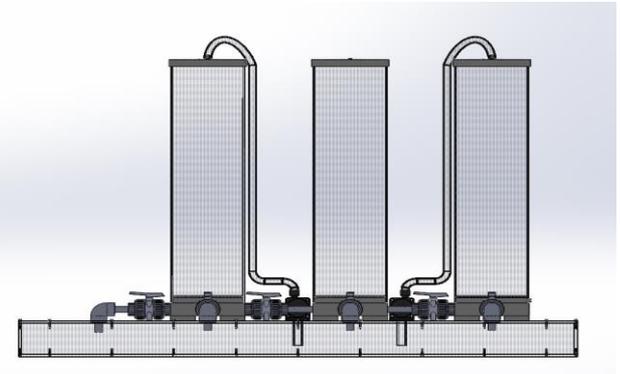
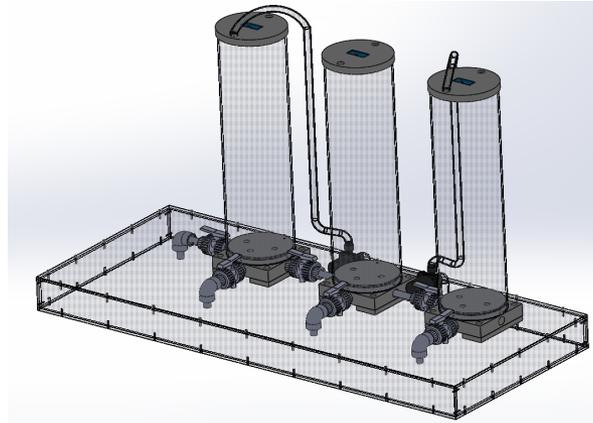
UAT



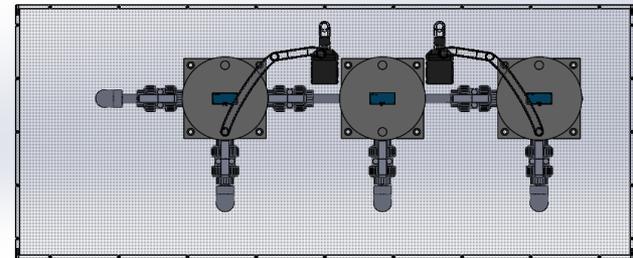
Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



DISEÑO DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL



La plataforma experimental fue diseñada en solidworks y fabricada en un taller de maquinados para pasar posteriormente a su armado



**Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática**



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

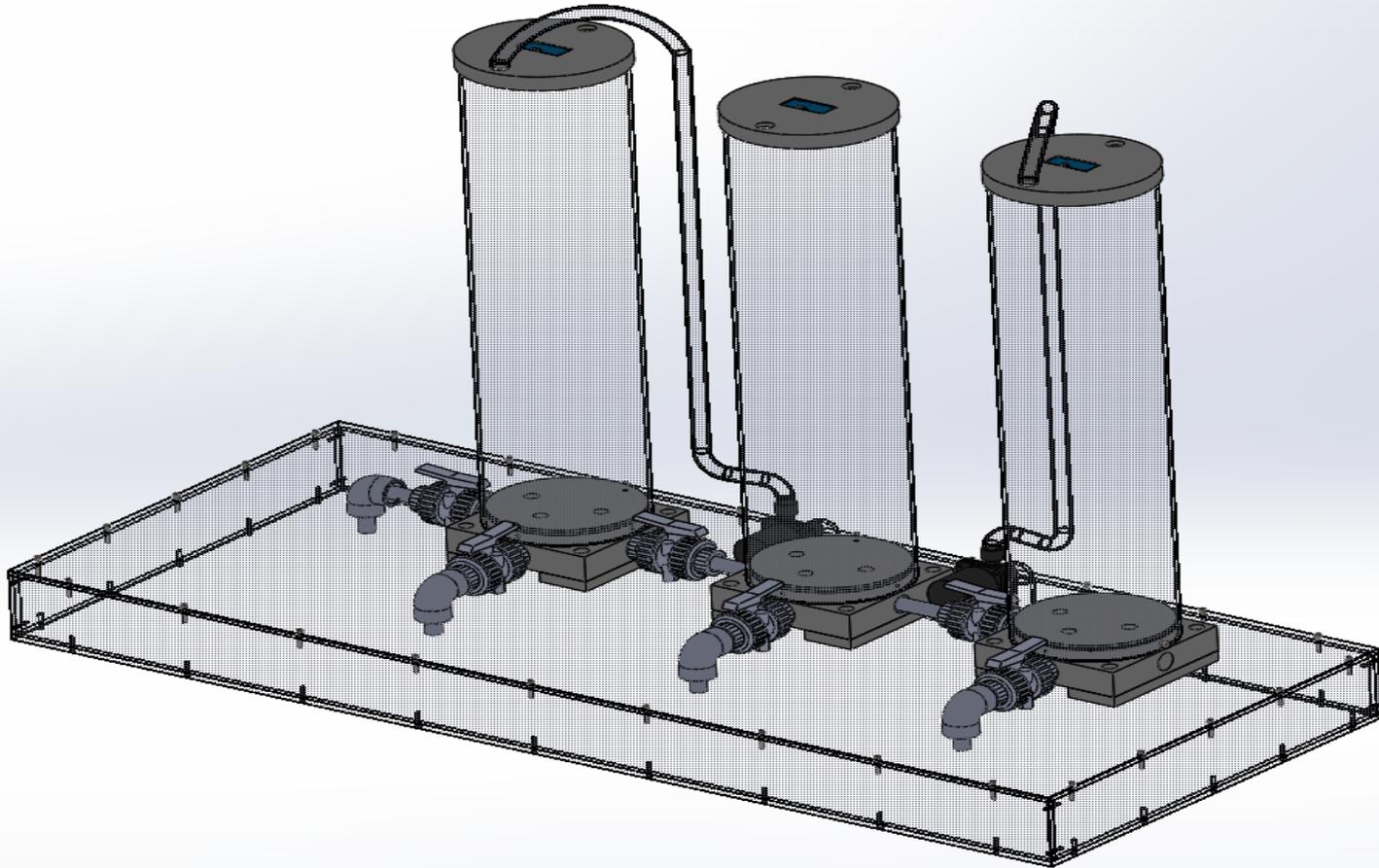
UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



DISEÑO DE LA PLATAFORMA EXPERIMENTAL



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



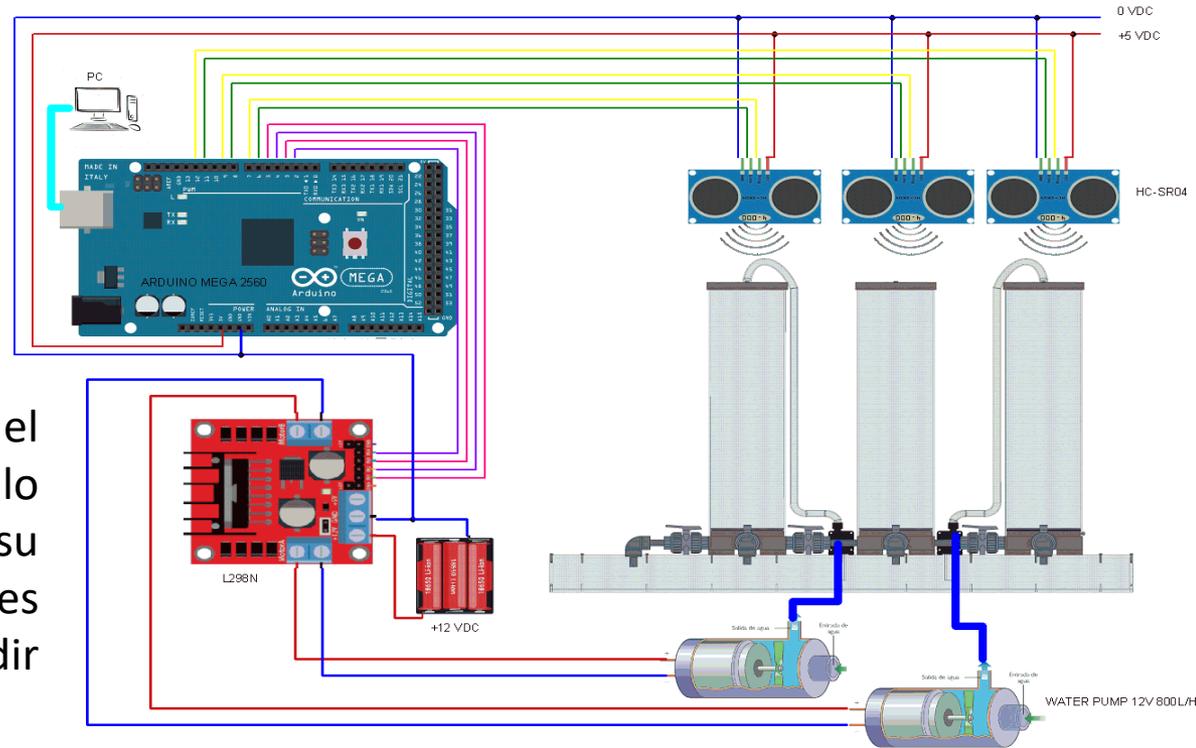
Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



Diseño de plataforma experimental.

Hardware:

- Sensores: Ultrasonico HC-SR04.
- Actuadores: Bomba.
- Interface: Placa Arduino MEGA



Para fines prácticos, se utilizo el modulo Arduino entre el modulo físico y la programación por su simplicidad y utilizando sensores ultrasónicos HC-SR04 para medir el nivel de agua.



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



UAT



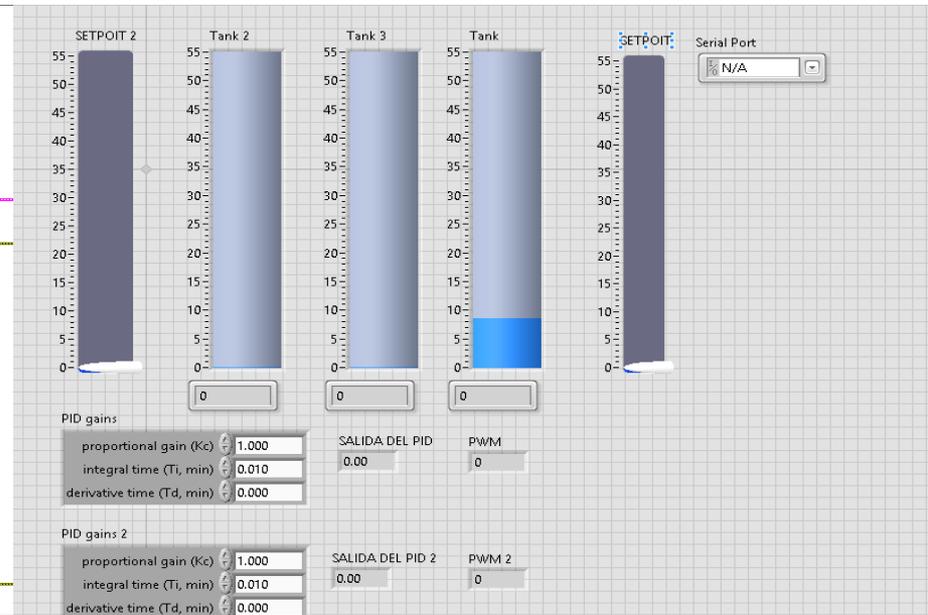
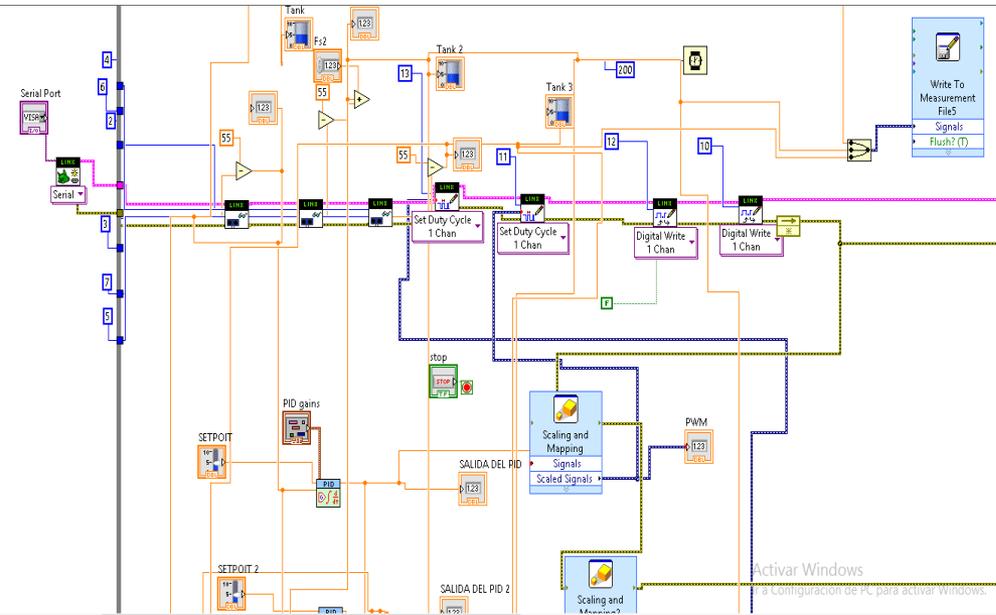
Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa-RODHE



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

PARTE COMPUTACIONAL

Se utilizó LabVIEW en el desarrollo del algoritmo para la detección de fallas en el sistema físico, el cual ofrece un enfoque de programación grafica que ayuda a la visualización del panel de control principal.



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables, Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



UAT

VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD



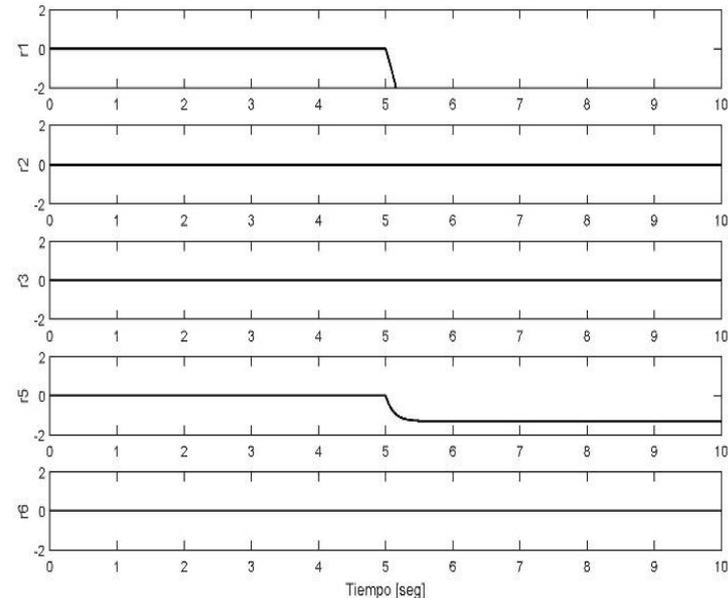
Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



SIMULACIÓN

Obtenido el modelo matemático en espacio de estados, se realizó la simulación del algoritmo en la plataforma MATLAB. Partiendo de que el sistema se encuentra en lazo cerrado y que solo una falla se puede presentar a la vez

| residuos fallas | r_1 | r_2 | r_3 | r_5 | r_6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{f1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{f2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{f3} | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o13} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o20} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{o32} | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{A1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{A2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{s1} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{s2} | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| f_{s3} | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |



Residuos en presencia de la falla Ff_1 .



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

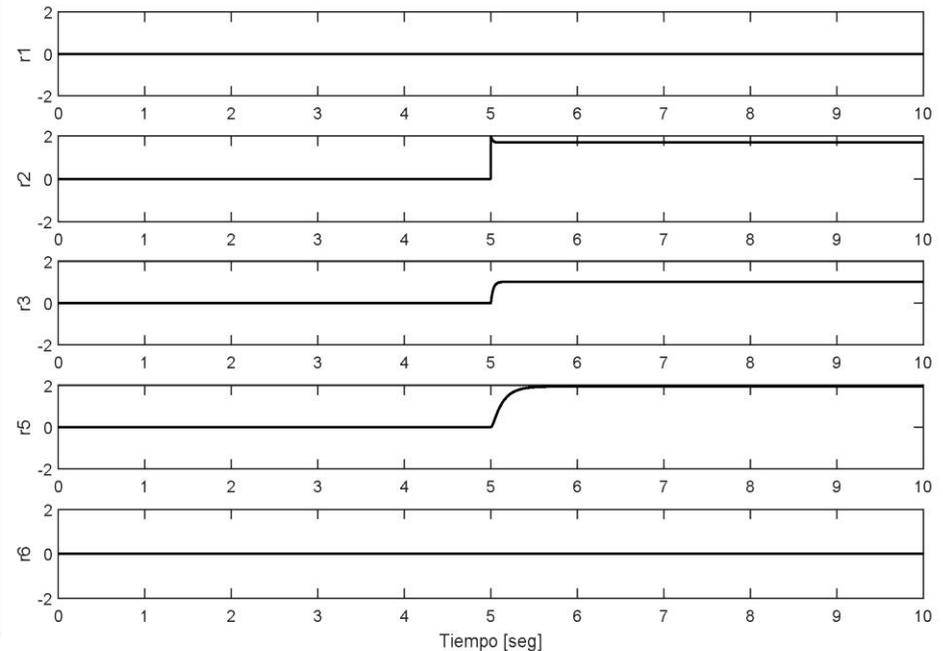
UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



| residuos fallas | r_1 | r_2 | r_3 | r_5 | r_6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{f1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{f2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{f3} | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o13} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o20} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{o32} | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{A1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{A2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{s1} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{s2} | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| f_{s3} | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |



Residuos en presencia de la falla f_{s2}



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

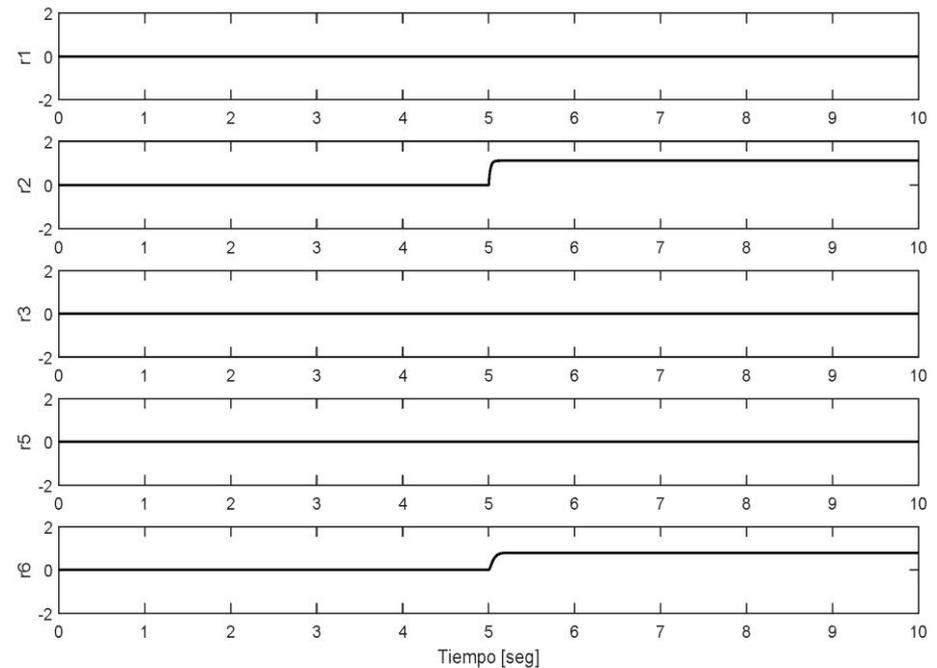
UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



| residuos fallas | r_1 | r_2 | r_3 | r_5 | r_6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{f1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{f2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{f3} | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o13} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o20} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{o32} | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{A1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{A2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{s1} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{s2} | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| f_{s3} | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |



Residuos en presencia de la falla Fa_2 .



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



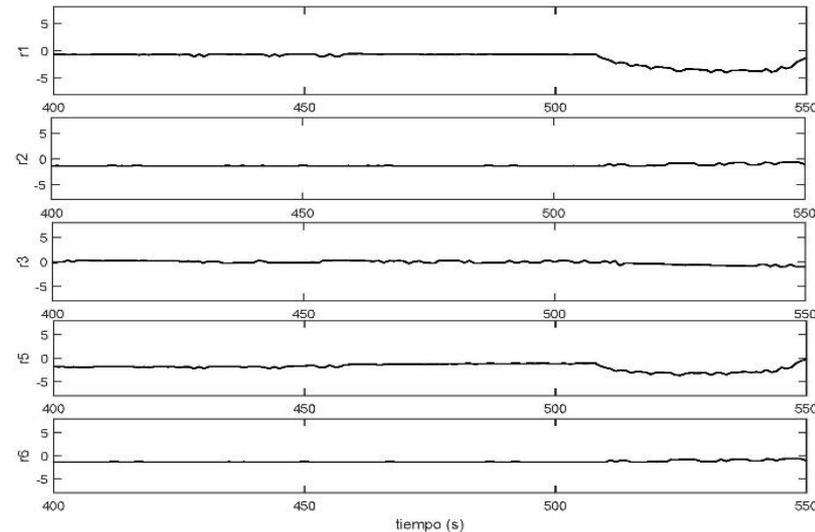
Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



RESULTADO DE PRUEBAS FÍSICAS

Para validar los resultados obtenidos en la simulación, se realizaron diferentes pruebas físicas en la plataforma experimental. A continuación se pondrá las mismas fallas que en la simulación.

| residuos fallas | r_1 | r_2 | r_3 | r_5 | r_6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{f1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{f2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{f3} | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o13} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o20} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{o32} | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{A1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{A2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{s1} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{s2} | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| f_{s3} | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |



Residuos en presencia de la falla Ff_1 .



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

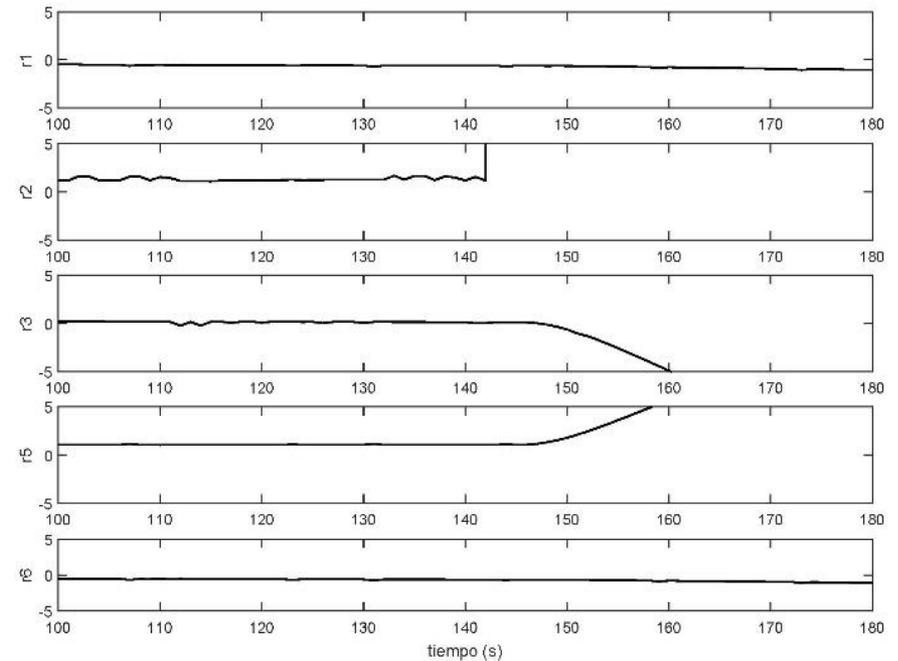
UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



| residuos fallas | r_1 | r_2 | r_3 | r_5 | r_6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{f1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{f2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{f3} | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o13} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o20} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{o32} | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{A1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{A2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{s1} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{s2} | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| f_{s3} | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |



Residuos en presencia de la falla F_{S_2}



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

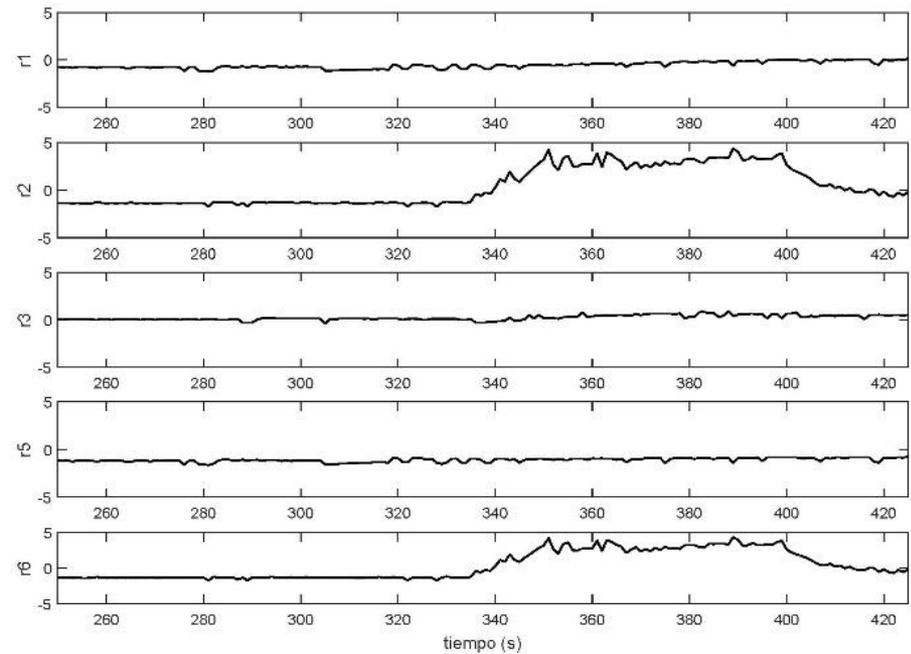
UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



| residuos fallas | r_1 | r_2 | r_3 | r_5 | r_6 |
|--------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| f_{f1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{f2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{f3} | | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o13} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{o20} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{o32} | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{A1} | ✓ | | | ✓ | |
| f_{A2} | | ✓ | | | ✓ |
| f_{s1} | ✓ | | ✓ | ✓ | ✓ |
| f_{s2} | | ✓ | ✓ | ✓ | |
| f_{s3} | ✓ | ✓ | ✓ | | ✓ |



Residuos en presencia de la falla Fa_2 .



Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos tanto en la simulación como en la experimentación, se pudo comprobar la efectividad para la detección de fallas en base a observadores.

La plataforma experimental realizada, ayudo a la comprobación de los resultados obtenidos en la simulación, y abre las posibilidades no solo de simular, si no también, de probar algoritmos nuevos de forma física.



**Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática**



VERDAD, BELLEZA, PROBIIDAD

UAT



Unidad Académica
Multidisciplinaria
Reynosa-RODHE



AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad Autónoma de Tamaulipas – Unidad Académica Multidisciplinaria Reynosa Rodhe, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

REFERENCIAS

Garcia, E. A., & Frank, P. M. (1997). *Deterministic nonlinear observer-based approaches to fault diagnosis: a survey*. Control Engineering Practice, 5(5), 663-670.

Frank, P. M., & Ding, X. (1997). *Survey of robust residual generation and evaluation methods in observer-based fault detection systems*. Journal of process control, 7(6), 403-424.

Rodriguez, L. and Alcorta-García, E. (2015). *De la representación de sistemas Euler-Lagrange a la hamiltoniana generalizada*, Nova Scientia. vol. 7, no. 14, pp. 1–23.

Massoumnia, M. A. (1986). *A geometric approach to the synthesis of failure detection filters*. IEEE Transactions on automatic control, 31(9), 839-846.



**Congreso Interdisciplinario de Energías Renovables,
Mantenimiento Industrial, Mecatrónica e Informática**



ECORFAN®

© ECORFAN-Mexico, S.C.

No part of this document covered by the Federal Copyright Law may be reproduced, transmitted or used in any form or medium, whether graphic, electronic or mechanical, including but not limited to the following: Citations in articles and comments Bibliographical, compilation of radio or electronic journalistic data. For the effects of articles 13, 162,163 fraction I, 164 fraction I, 168, 169,209 fraction III and other relative of the Federal Law of Copyright. Violations: Be forced to prosecute under Mexican copyright law. The use of general descriptive names, registered names, trademarks, in this publication do not imply, uniformly in the absence of a specific statement, that such names are exempt from the relevant protector in laws and regulations of Mexico and therefore free for General use of the international scientific community. BCIERMMI is part of the media of ECORFAN-Mexico, S.C., E: 94-443.F: 008- (www.ecorfan.org/ booklets)