

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iii
LISTA DE NOMENCLATURAS.....	v
RESUMEN	vii
ABSTRACT	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1.....	2
ANTECEDENTES	2
1.1. Características de un reactor catalítico de lecho fijo	2
1.2. Módulo de reacción de reformado.	3
1.3. Características de un sistema de control	4
1.4. Tipos de sistemas de control.....	4
1.5. Sistemas de control más comunes.....	5
1.6. Características de control en un reactor catalítico de lecho fijo.....	7
1.6.1. Otro tipo de controles y restricciones.....	9
JUSTIFICACIÓN.....	15
OBJETIVO GENERAL.....	15
OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	15
CAPÍTULO 2.....	16
METODOLOGÍA.....	16
2.1 Partes y componentes principales del sistema de control de un reactor de hidrógeno	18
2.1.1 Reactor tubular de lecho fijo de deshidratación	18
2.1.2 Electroválvulas.....	19
2.1.3 Intercambiador de calor	20
2.1.4 Bomba de pistón	21
2.2 Características de los sensores y actuadores a utilizar.	23
2.2.1 Termopar tipo K y MAX6675	23
2.2.2 Sensor de presión	24
2.2.3 Sensor infrarrojo.....	25
2.2.4 Módulo de relés	26
2.3 Microcontrolador Atmega 2560.....	28
2.4 LabVIEW	29

2.5	Comunicación serial Arduino - LabVIEW	31
2.6	Métodos de cálculo de controladores.....	34
2.6.1	Método de cálculo de controladores mediante el lugar geométrico de las raíces	34
2.6.2	Método de Ziegler-Nichols para sintonización de controladores P, PI, PD y PID.....	36
2.7	Función de transferencia y linealización de los componentes.....	40
2.7.1	Modelado para la temperatura en el reactor	41
2.7.2	Modelado de la electroválvula	42
2.8	Esquemas de control	44
2.8.1	Control de temperatura del reactor	44
2.8.2	Control de presión.....	45
CAPÍTULO 3.....		48
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....		48
3.1	Funciones de transferencia	48
3.1.1	Reactor	48
3.1.2	Electroválvula	50
3.2	Control de temperatura del reactor.....	57
3.3	Control por presión del reactor.....	60
3.4	Justificación de las ganancias de control utilizadas	65
3.4.1	Sistema calentamiento del reactor	65
3.4.2	Sistema electroválvula del reactor	68
3.5	Comunicación con Arduino	71
3.6	Interfaz del control del reactor	73
3.7	Diagrama en bloques del control del reactor.....	75
CONCLUSIONES		79
PERSPECTIVAS DE TRABAJO		80
BIBLIOGRAFÍA		81
Anexo 1.....		88
Anexo 2.....		91
Anexo 3.....		93
Anexo 4.....		94
Anexo 5.....		95
Anexo 6.....		103
Anexo 7.....		109

Anexo 8.....	113
Anexo 9.....	119

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1. Tipos de control para diferentes aplicaciones.....	14
Tabla 2-1. Variable de control a 280°C y 58 bar.	17
Tabla 2-2. Parámetro Ziegler-Nichols método de lazo abierto.....	39
Tabla 3-1. Características del sistema de calentamiento del reactor sin control.	66
Tabla 3-2. Características del sistema de calentamiento del reactor con control.	67
Tabla 3-3. Características del sistema electroválvula del reactor sin control.	69
Tabla 3-4. Características del sistema electroválvula del reactor con control.....	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1. Esquema eléctrico de actuador de servomotor marca HOKE [7].	3
Figura 2.1. Diagrama metodológico del proyecto de investigación.	17
Figura 2.2. Ejemplo de configuración del reactor [25].	19
Figura 2.3. Ejemplo de electroválvula Marca Hoke [7].	20
Figura 2.4. Ejemplo de intercambiador de calor [27].	21
Figura 2.5. Muestra una vista frontal de la bomba 307 [28].	22
Figura 2.6. Diagrama simple de termopar tipo k [29].	23
Figura 2.7. Esquema de conexión del MAX6675 con el microcontrolador y termopar tipo K [30].	24
Figura 2.8. Ejemplo de termopar tipo K y MAX6675 [30].	24
Figura 2.9. Ejemplo de los diferentes tipos de transductores [31], [32].	25
Figura 2.10. Ejemplo de sensor IR [30].	26
Figura 2.11. Ejemplo de módulo de 8 relés para Arduino [38].	27
Figura 2.12. Circuito esquemático de un canal del módulo de 8 relés para Arduino [38]. .	27
Figura 2.13. Imagen de circuito esquemático de la placa de desarrollo Arduino Mega 2560 [40] [41].	28
Figura 2.14. Principio de un vi [46].	30
Figura 2.15. Esquema general [44].	30
Figura 2.16. Esquema de programa [44].	31
Figura 2.17. Herramienta NI-Visa en LabVIEW®.	32
Figura 2.18. Interfaz de Proteus®.	33
Figura 2.19. Interfaz de Arduino v1.8.5.	33
Figura 2.20. Diagrama general de control a lazo cerrado.....	34
Figura 2.21. Construcción del lugar de las raíces, plano imaginario vs real.....	36
Figura 2.22. Esquema para saber la respuesta al escalón para la sintonización del sistema.	37
Figura 2.23. Respuesta al escalón de sistema de primer orden con retardo de transporte [53].	38
Figura 2.24. Experimento de calentamiento del reactor.....	41
Figura 2.25. Experimento de presión en la electroválvula.	43

Figura 2.26. Experimento sobre motor-potenciómetro.	44
Figura 2.27. Esquema de control de temperatura en el Reactor.	45
Figura 2.28. Esquema general de control en la Electroválvula.	45
Figura 2.29. Esquema de control PI para el Sistema Electroválvula.	47
Figura 2.30. Esquema de control PI simplificado para el Sistema Electroválvula.	47
Figura 3.1. Datos del experimento de calentamiento del reactor.	48
Figura 3.2. Comprobación de FT en Simulink®.	49
Figura 3.3. Comprobación de la FT del Reactor.	50
Figura 3.4. Datos del experimento de presión sobre la electroválvula.	50
Figura 3.5. Datos de la sección cerrado-abierto del experimento de presión sobre la electroválvula.	51
Figura 3.6. Datos de la sección abierto-cerrado del experimento de presión sobre la electroválvula.	52
Figura 3.7. Comprobación de las ecuaciones de estado de la electroválvula en Simulink.	53
Figura 3.8. Comprobación de las ecuaciones de estado de la electroválvula.	53
Figura 3.9. Datos del experimento sobre el motor-potenciómetro.	54
Figura 3.10. Datos del experimento sobre el motor-potenciómetro movimiento abierto a cerrado.	55
Figura 3.11. Datos del experimento sobre el motor-potenciómetro movimiento cerrado a abierto.	55
Figura 3.12. Comprobación de las FT del sistema motor-potenciómetro.	56
Figura 3.13. Esquema de control PID para la Temperatura en el Reactor.	58
Figura 3.14. Respuesta del sistema a un voltaje de referencia y tiempo de estabilización.	58
Figura 3.15. Respuesta del sistema al impulso.	59
Figura 3.16. Esquema de control PI para el voltaje en el motor de la Electroválvula.	60
Figura 3.17. Respuesta del sistema a un voltaje de referencia y tiempo de estabilización.	61
Figura 3.18. Esquema de control PI para el Sistema Electroválvula.	62
Figura 3.19. Esquema de control PI simplificado para el Sistema Electroválvula.	62
Figura 3.20. Respuesta del sistema a una referencia y tiempo de estabilización.	63
Figura 3.21. Respuesta al impulso del sistema.	64
Figura 3.22. Respuesta al impulso del sistema de calentamiento del reactor sin control.	66
Figura 3.23. Lugar de las raíces del sistema de calentamiento del reactor sin control.	66
Figura 3.24. Lugar de las raíces del sistema de calentamiento del reactor con control.	67
Figura 3.25. Respuesta al impulso del sistema electroválvula del reactor sin control.	68
Figura 3.26. Lugar de las raíces del sistema electroválvula del reactor sin control.	69
Figura 3.27. Lugar de las raíces del sistema electroválvula del reactor con control.	70
Figura 3.28. Diseño de la placa electrónica de comunicación en el Ares de Proteus®.	72
Figura 3.29. Diagrama de flujo del programa de comunicación.	73
Figura 3.30. Interfaz visual para el monitoreo y control.	75
Figura 3.31. Diagrama de flujo del programa del VI.	76
Figura 3.32. Aplicación realizada para la operación del Reactor del “Proyecto LENERSE”.	77

LISTA DE NOMENCLATURAS

A - Ampere

ac - Corriente Alterna

cc - Corriente Continua

CO₂ - Dióxido de carbono

°C - Grados Celsius

DMC - Control Dinámico Multifacético

FT - Función de Transferencia

H₂ - Hidrógeno

IrNi - Iridio con Níquel

J - Función Objetivo

K_d - Ganancia Derivativa

K_i - Ganancia Integral

K_p - Ganancia Proporcional.

La₂O₃ - Trióxido de Lantano

LabVIEW® - Laboratorio de Imágenes

m - metros

mA - miliamperio

MATLAB® - Laboratorio de Matrices

mm - milímetros

ms - milisegundo

MPC - Modelo de Control Predictivo

N_c - Control horizonte

N_p - Horizonte de Predicción

Ω - Ohm

P - Proporcional

PD - Proporcional Derivativo

PI - Proporcional Integrador

PID - Proporcional Integrador Derivativo

PWM - Modulación de Ancho de Pulso

$Q_{cd}(t)$ y $R_{cd}(t)$ - matrices de ponderación

RPM - Revoluciones por Minuto

$u(t)$ - Entrada

V - Volt

VI - Instrumento Virtual

W - Watts

$w(t)$ - Señal de Referencia

$y(t)$ - Salida

RESUMEN

En este trabajo se aborda la realización de un instrumento virtual para el control de un reactor de lecho fijo, con el objetivo de producir hidrógeno a partir de glicerol acuoso y construir un equipo propio del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY).

Se realizaron pruebas a los distintos componentes de los sistemas de control de las variables de proceso para el cálculo de las ecuaciones que describen la dinámica del sistema. Se diseñó el software y hardware de comunicación entre los sensores, actuadores e instrumento virtual. Finalmente, en lenguaje gráfico (G) mediante el software LabVIEW® se realizó la interfaz visual y la lógica del instrumento, tanto para el equipo como para el control de cada uno de los componentes.

Se implementaron sistemas clásicos de control como el PI (Proporcional Integral) y PID (Proporcional Integral Derivativo). El desempeño del equipo y el análisis ante posibles perturbaciones se realizaron por medio de simulaciones con el software MATLAB® y pruebas al hardware de comunicación y censado en conexión con el instrumento, elaborando un manual de operaciones e instalación.

De acuerdo a los comportamientos obtenidos en las pruebas realizadas y con la escasa información obtenida en la literatura, se estimaron y simularon los modelos con un 91.4% de precisión, siendo esto de suma importancia para conocer y calcular las ganancias de los sistemas de control que se implementaron a los diferentes dispositivos.

La propuesta de instrumento virtual junto con el software y hardware de comunicación que se utilizó en este trabajo, estuvieron dentro de los parámetros necesarios del proyecto con tiempos de estabilización de alrededor de los 35 segundos para el proceso de presión y de 230 segundos para alcanzar la temperatura deseada.

Se realizó la comparación de los controles obtenidos mediante simulaciones, la placa de comunicación, la interfaz gráfica y el algoritmo del instrumento virtual con lo reportado en la literatura para cada aspecto, siendo los valores obtenidos similares en algunos casos y dentro de rango en otros.

ABSTRACT

This work deals with the realization of a virtual instrument for the control of a fixed-bed reactor, produc hydrogen from aqueous glycerol and building a team from the Yucatan Scientific Research Center (CICY).

Tests were carried out on the different components of the control systems of the process variables to calculate the equations describing the system's dynamics, the software, and hardware for communication between the sensors, actuators and virtual instrument were finally designed in the graphic language (G), using LabVIEW® software, the visual interface and logic of the device were created, both for the equipment and for the control of each of the components.

Classic control systems such as PI (Proportional Integral) and PID (Proportional Integral Derivative) were implemented. The performance of the equipment and the analysis of possible disturbances were carried out by means of simulations with MATLAB® software and tests of the communication hardware and census in connection with the instrument, preparing operations and installation manual.

According to the behaviors obtained in the tests carried out and with the scarce information obtained in the literature, the models were estimated and simulated with 91.4% precisión. This is of utmost importance to know and calculate the gains of the control systems that they were implemented, to different devices.

The virtual instrument proposal, together with the communication software and hardware used in this work, were within the necessary parameters of the project with stabilization times of around 35 seconds for the pressure process and 230 seconds to reach the desired temperature.

The controls obtained through simulations, the communication board, the graphic interface and the algorithm of the virtual instrument were compared with that reported in the literature for each aspect, the values obtained being simulated in some cases and within range in others.