

**MODELIZACION, SIMULACION Y CONTROL DE UN REACTOR
TUBULAR DE ALTA PRESION**

HELMER MUÑOZ HERNÁNDEZ

**UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ
2010**

**MODELIZACION, SIMULACION Y CONTROL DE UN REACTOR
TUBULAR DE ALTA PRESION**

HELMER MUÑOZ HERNÁNDEZ

**Proyecto de grado para optar al título de magister en ingeniería de control
industrial**

DIRIGIDO POR

Ing. MSc. Luis Alfonso Muñoz Hernández

**UNIVERSIDAD DE IBAGUÉ
2010**

APROBADO

Presidente del jurado

Jurado

Jurado

Ibagué, Octubre del 2010

DEDICATORIA

A Dios por haberme dado la vida, la fortaleza y la sabiduría para llegar hasta este escalón donde me encuentro, a mis padres, hermanos, esposa e hijos quienes con su amor me han acompañado y ayudado a enfrentar todas las situaciones de la vida, brindándome el apoyo necesario para superarme cada día.

AGRADECIMIENTOS

Mas a Dios gracias, el cual nos lleva siempre en triunfo en Cristo Jesús, y por medio de nosotros manifiesta en todo lugar el olor de su conocimiento.

II Cor: 2-14

Expreso mis especiales agradecimientos a:

Ing. MSc. LUIS ALFONSO MUÑOZ HERNÁNDEZ, Director Automatización Industrial de la Universidad de Ibagué, por la dirección del presente trabajo de grado.

Ing. PHd. ALDEMAR MUÑOZ HERNÁNDEZ, Profesor tiempo completo de la Universidad del Tolima, por su apoyo y aportes a la presente tesis de grado.

Ing. PHd. OSCAR BARRERO MENDOZA, Director del centro de Investigación de la Universidad de Ibagué y docente del curso de Modelización de la Maestría en Ingeniería de Control, por brindarme sus conocimientos en la asignatura.

Psicóloga. ROSA INÈS ÀLVAREZ JARAMILLO, por su apoyo y aportes a la presente tesis de grado.

RESUMEN

El complejo mundo de la polimerización se ha convertido en un tema importante para la investigación, debido principalmente a las grandes inversiones que requiere y la dificultad en la operación de las plantas enormes que existen para producir polímeros.

Muchos artículos se han escrito sobre esto, la mayoría de ellos centrados en el rendimiento del reactor y su estabilidad.

En el presente trabajo se modela, simula y controla un reactor tubular (plug flow reactor) de alta presión, teniendo en cuenta no sólo el rendimiento del reactor por separado, sino también su interacción con el balance de masa, de tal manera que se obtiene un modelo integrado para estudiar varias condiciones de operación y su efecto en salidas como conversión de monómeros, temperatura máxima y el número y el grado de polimerización.

Es importante remarcar el uso de MATLAB / SIMULINK para modelar y simular el proceso completo. El objetivo de este estudio es hacer un modelo adecuado para su control, a fin de tratar, en el futuro, diversas estrategias de control.

La idea es intentar nuevos enfoques de las estrategias de control como modelo neuronal basado en control predictivo que puede parecer prometedor, debido a la complejidad del sistema. Sin embargo, en este trabajo solamente se aborda una estrategia de control multivariable, comparando el control clásico PID con el control multivariable LQR, usando el filtro de Kalman.

El balance de masa involucra 13 CSTRs, pero en la realidad son más de 60. Además, el reactor se simula mediante un conjunto de 10 ecuaciones diferenciales no lineales altamente rígido, pero de hecho, más ecuaciones se pueden añadir al modelo.

De esta manera, este es un buen ejercicio en el sentido de que el modelo integrado (balance de masa del reactor), tiene en cuenta el conjunto completo de variables intervinientes en el proceso.

Palabras claves: polimerización, reactor de flujo en pistón, modelado, simulación, balance de masa, control multivariable.

MODELING, SIMULATION AND CONTROL OF A HIGH PRESSURE TUBULAR REACTOR

SUMMARY

The complex world of polymerization has become an important topic for research due mainly to the great investments it demands and the difficulty in operation of the huge plants that exist to produce polymers. Many papers have been written about this, most of them focusing on the reactor performance and its stability.

In the present work a model and simulation for the high pressure polyethylene tubular reactor has been made, but taking into account not only the performance of the reactor by separate but also its interaction with the whole mass balance, in such a way that an integrated model is obtained to study various operating conditions and their effect on exit monomer conversion, peak temperature and number and weight degree of polymerization. At the end, a multivariable control strategy has been implemented (LQR by using Kalman filter) to be compared with PID control (decoupled dynamic PID).

It is important to remark the use of **MATLAB/SIMULINK** software, to model and simulate the complete process. The aim of this study is to make a suitable model for control purposes, in order to try, in the future, different schemes since the point of view of control.

The idea is to try new approaches of control strategies like neural model based predictive control which may appear to be promising, due to the complexity of the system. The mass balance involves 13 CSTRs, but more of them can be added to the model.

Also, the reactor is simulated using a set of 10 highly nonlinear stiff differential equations, but of course, more equations can be added.

In this way, this is a good exercise in the sense that the integrated model (mass balance-reactor), takes into account the complete set of variables intervening in the process.

Keywords : Polymerization, plug flow reactor, modeling, simulation, mass balance.

TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	14
1. OBJETIVOS	16
1.1 OBJETIVO GENERAL	16
1.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS	16
2. EL MODELO DE BALANCE DE MASA	17
2.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO	17
2.1.1 Parámetros usados en el balance de masa	18
2.2 EL CONJUNTO DE ECUACIONES PARA EL MODELO DE BALANCE DE MASA	20
2.3 MODELO Y SIMULACION DEL BALANCE DE MASA	21
2.4 RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN	22
3. EL MODELO DE REACTOR	26
3.1 REACTOR TUBULAR (Plug Flow Reactor)	26
3.1.1 Parámetros para el modelo de reactor	28
3.2 EL CONJUNTO DE ECUACIONES PARA EL MODELO DE REACTOR NO LINEAL	30
3.3 EL MODELO DE SIMULACION DEL REACTOR	31
3.4 RESULTADOS DE SIMULACION	32
4. EL MODELO INTEGRADO	37
4.1 DESCRIPCIÓN DE INTEGRACIÓN	37
4.2 EL MODELO INTEGRADO	37
4.3 RESULTADOS DE LA SIMULACION	40

4.3.1 Resultados del estado estacionario	40
4.3.2 Efecto de iniciador	47
4.3.3 Efecto del disolvente	54
4.3.4 Efecto del tiempo de muestreo	57
5. ESTRATEGIA DE CONTROL MULTIVARIABLE	60
5.1 ESTRUCTURA DE CONTROL	60
5.2 CONTROLABILIDAD Y OBSERVABILIDAD	63
5.3 ANALISIS DE GANANCIAS RELATIVAS	63
5.4 DISEÑO DE CONTROLADOR PID CON DESACOPLE ESTATICO	63
5.5 DISEÑO DE CONTROLADOR LQR	64
5.6 DISEÑO DEL CONTROLADOR LQR CON FILTRO DE KALMAN	66
5.7 RESULTADOS	68
5.8 TRABAJO FUTURO	69
6. CONCLUSIONES	70
7. BIBLIOGRAFIA	71
APENDICES	72

LISTADO DE FIGURAS

	Pag.
Figura 2.1	Diagrama del proceso 18
Figura 2.2	Distribución de los CSTRs 19
Figura 2.3	Balance de masa de los 13 reactores 22
Figura 2.4	Concentración X7_1 22
Figura 2.5	Concentración X1_1 23
Figura 2.6	Concentración X7_1 con y sin dinámicas de los CSTRs 23 7/8/9
Figura 2.7	Concentración X7_2 con y sin dinámicas de los CSTRs 24 7/8/9
Figura 2.8	Concentración X5_1 con y sin dinámicas de los CSTRs 24 7/8/9
Figura 2.9	Concentración X1_1 con y sin dinámicas de los CSTRs 25 7/8/9
Figura 3.1	Plug Flow Reactor 27
Figura 3.2	Perfil de Temperatura 32
Figura 3.3	Peso promedio de grado de polimerización 33
Figura 3.4	Cantidad promedio grado de polimerización 33
Figura 3.5	Conversión del iniciador 34
Figura 3.6	Conversión de monómero 34
Figura 3.7	Peso promedio de grado de polimerización 35
Figura 3.8	Cantidad promedio grado de polimerización 36
Figura 4.1	Modelo Integrado 38
Figura 4.2	Esquema de integración 39
Figura 4.3	Perfil de temperatura en el estado de equilibrio dentro del reactor 41

Figura 4.4	Perfil de concentración del iniciador en el estado de equilibrio dentro del reactor	41
Figura 4.5		42
Figura 4.6	Concentración de Radical en el estado de equilibrio dentro del reactor	42
Figura 4.7	Perfil de concentración de disolvente en el estado de equilibrio dentro del reactor	43
Figura 4.8	Peso y el grado promedio de polimerización en el estado de equilibrio dentro del reactor	43
Figura 4.9	Pico de temperatura en estado estacionario	44
Figura 4.10	Peso promedio de grado de polimerización en estado estacionario	44
Figura 4.11	Número promedio de grado de polimerización en estado estacionario	45
Figura 4.12	Conversión de monómero en estado estacionario	45
Figura 4.13	Lugar de la temperatura Pico en estado estacionario	46
Figura 4.14	Conversión del iniciador en estado estacionario	46
Figura 4.15	Polidispersidad en estado estacionario	47
Figura 4.16	Concentración X7_2 en estado estacionario	48
Figura 4.17	Concentración X3_1 en estado estacionario	48
Figura 4.18	Paso aplicado al iniciador (Kg /s)	49
Figura 4.19	Perfil de temperatura pico	49
Figura 4.20	Peso promedio de grado de polimerización	50
Figura 4.21	Número promedio de grado de polimerización	50
Figura 4.22	Conversión de monómero	51
Figura 4.23	Localización del pico de temperatura	51
Figura 4.24	Conversión del iniciador	52
Figura 4.25	Polidispersidad	52
Figura 4.26	Concentración X3_1	53
Figura 4.27	Concentración X7_2	53
Figura 4.28	Paso en el solvente (Kg /s)	54
Figura 4.29	Perfil de temperatura	54
Figura 4.30	Peso promedio de grado de polimerización	55

Figura 4.31	Número promedio de grado de polimerización	55
Figura 4.32	Conversión de monómero	56
Figura 4.33	Localización pico de temperatura	56
Figura 4.34	Polidispersidad	57
Figura 4.35	Efecto de diferentes períodos de muestreo en el perfil de temperatura máxima	57
Figura 4.36	Efecto de diferentes períodos de muestreo en el peso promedio del grado de polimerización	58
Figura 4.37	Efecto de diferentes períodos de muestreo en el lugar de temperatura máxima	58
Figura 5.1	Estructura de control para el proceso de polimerización	61
Figura 5.2	Diagrama simulink para el sistema de control con PID desacoplado	64
Figura 5.3	Diagrama simulink para el sistema de control LQR	66
Figura 5.4	Diagrama simulink para el sistema de control con filtro de Kalman	66
Figura 5.5	Respuesta controlada de la temperatura según estrategia de control	68
Figura 5.6	Respuesta controlada del grado de polimerización según estrategia de control	69

LISTADO DE TABLAS

		Pag.
Tabla 2.1	Variables para el Balance de Masa	19
Tabla 3.1	Parámetros para el modelo de reactor	29
Tabla 3.2	Conjunto de constantes cinéticas	30
Tabla 3.3	Parámetros para la simulación del reactor	22
Tabla 3.4	Desempeño del Reactor del modelo de Yoon's y el presente estudio (con disolvente)	35
Tabla 4.1	Resumen de los resultados de la simulación	59
Tabla 5.1	Parámetros para los controladores PID	64

LISTADO DE APENDICES

- APÉNDICE A.** PRINCIPIOS DE LA QUIMICA DE POLIMERIZACIÒN
- APÉNDICE B.** CONJUNTO DE ECUACIONES DIFERENCIALES PARA EL MODELO DEL BALANCE DE MASA
- APÉNDICE C.** REACTOR TUBULAR DE ALTA PRESION
- APÉNDICE D.** EL TRABAJO PREVIO SOBRE EL MODELADO DE LDPE EN REACTORES TUBULARES

- APÉNDICE E.** UN ESTUDIO DE POLIETILENO PARA UN REACTOR TUBULAR DE ALTA PRESIÒN

- APÉNDICE F.** ALGUNOS VÍNCULOS IMPORTANTES ENTRE BALANCE DE MASA Y REACTOR