

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA LA
ENSEÑANZA DE INGENIERÍA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS A NIVEL DE
PREGRADO**

“Enfoque en las herramientas de simulación computacional”

NELSON FELIPE RINCÓN SOTO

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C. 2016**

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE MATERIAL DIDÁCTICO PARA LA
ENSEÑANZA DE INGENIERÍA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS A NIVEL DE
PREGRADO**

“Enfoque en las herramientas de simulación computacional”

NELSON FELIPE RINCÓN SOTO

**Trabajo de grado para optar por el título de
Ingeniero Químico**

**Director
HERMES AUGUSTO RANGEL JARA
Ingeniero Químico M. Sc.**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
BOGOTÁ, D.C. 2016**

RESUMEN

El presente proyecto tiene por objeto presentar el diseño y la implementación de un material didáctico para la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas a nivel de pregrado con un enfoque hacia las herramientas de simulación computacional con las que se cuentan actualmente. Se desarrollan 4 módulos temáticos acordes con los tópicos manejados a nivel nacional de las asignaturas relativas al diseño de reactores químicos. Cada módulo cuenta con un texto soporte, presentaciones en PowerPoint® y ejercicios desarrollados en las siguientes herramientas de simulación: Microsoft Excel®, Comsol Multiphysics® (Herramienta en la cual se hace mucho énfasis por el desconocimiento general que se tiene hacia ésta), Aspen Hysys® y Table Curve 2D® con sus correspondientes videos tutoriales (Grabados en Camtasia Studio®). El producto final corresponde a un archivo programado en lenguaje de ayuda HTML de Microsoft Help Workshop® en donde se compila todo el material (Llamado Reactools). El material se encuentra disponible en el enlace: www.nfrincons.wix.com/reactools.

El primer módulo comprende la presentación de los modelos ideales de reactores; el segundo módulo presenta una introducción a la cinética química; el tercero trata el diseño isotérmico de reactores ideales y el cuarto abarca el diseño de reactores ideales no isotérmicos.

La implementación de Reactools se lleva a cabo a través del curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”, curso virtual en donde se cuenta con la participación de más de 90 estudiantes de pregrado y posgrado de universidades a lo largo de todo el territorio nacional.



ABSTRACT

The objective of this project is to present the design and implementation of a didactic material for teaching chemical reactions engineering in an undergraduate degree, focused in the computational simulation tools that are actually been used for reactor design. Four thematic modules were developed taking into account the Nationwide managed topics of the reactor's design courses. Each module has a support PDF[®] text, PowerPoint[®] presentations and exercises developed in the following computational tools: Microsoft Excel[®], Comsol Multiphysics[®] (Emphasis is placed on this tool, because students don't use it frequently), Aspen Hysys[®] and Table Curve 2D[®] with its corresponding tutorial videos (Recorded in Camtasia Studio[®]). The final product will be a compiled file programmed in HTML language from Microsoft Help Workshop[®] where all the material is synthesized. The material is called Reactools. All the material is available in the link: www.nfrincons.wix.com/reactools.

The first module presents the ideal models of reactors and their corresponding molar balances; the second one shows an overview of chemical kinetics; the third one is about isothermal reactor design and the fourth one deals with non-isothermal reactor design.

Implementation of Reactools was developed through the course "Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos", virtual course in which participated more than 90 students (Under-degree and post-degree students) from universities along the country.



AGRADECIMIENTOS

En primera instancia, agradezco a la Universidad Nacional de Colombia por darme todo el conocimiento y las herramientas necesarias para desarrollar esta idea. A mi director de Tesis Hermes Augusto Rangel por siempre creer en el proyecto y toda la paciencia y dedicación que tuvo durante el proceso. Un agradecimiento muy especial a Comsol Multiphysics Colombia® por permitirme el uso de las licencias de estudiantes para la fase de implementación del proyecto, así como a todos los asistentes y monitores del curso Comsol for Dummies.

Los agradecimientos se extienden a tres eventos donde fue posible hacer la presentación del proyecto y la divulgación de la fase de implementación: III Jornada Técnica de Ingeniería Química y Biológica, Universidad Nacional de Colombia sede Medellín; XV Encuentro Nacional de Estudiantes de Ingeniería Química, Universidad del Atlántico y XXI Congreso Latinoamericano de estudiantes de ingeniería química, Universidad San Carlos de Guatemala. No me queda más que agradecerles la oportunidad de dar a conocer el proyecto y todo el reconocimiento que le dieron.

Gracias a mi familia que siempre estuvo presente en los momentos críticos del proyecto. Finalmente, a una persona que siempre le dio luces al proceso, mi amiga y colega Diana Rincón Valbuena. Te quiero gordis.



CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	16
2. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO	19
2.1. Descripción del problema	19
2.2. Justificación del proyecto	21
2.3. Objetivos	23
2.3.1. Objetivo General	23
2.3.2. Objetivos específicos	23
3. MARCO TEÓRICO	24
3.1. Metodologías de aprendizaje en ingeniería	24
3.1.1. Metodología para la comprensión de conceptos	24
3.1.2. Metodologías para el desarrollo de habilidades en el pensamiento crítico	25
3.1.3. Metodologías para el desarrollo de destrezas en pensamiento creativo	25
3.2. Panorama de la enseñanza de las reacciones químicas	26
3.2.1. Evolución de la enseñanza de las reacciones químicas en los últimos 60 años	26
3.2.2. Enseñanza actual de Ingeniería de las reacciones químicas a nivel global	29
3.2.3. Enseñanza actual de Ingeniería de las reacciones químicas a nivel local	33
3.3. Herramientas computacionales para el modelamiento de Reactores Químicos	39
3.3.1. Importancia de las herramientas computacionales para el modelamiento de reactores químicos	39
3.3.2. Modelamiento y simulación de reactores químicos a través de Aspen HYSYS®	41
3.3.3. Modelamiento y simulación de reactores químicos a través de Microsoft Excel®	42
3.3.4. Modelamiento y simulación de reactores químicos a través de Matlab®	43
3.3.5. Simulación con Tablecurve 2D®	44
3.3.6. Modelamiento y simulación de reactores químicos a través de Comsol Multiphysics®	44



4. METODOLOGÍA DE TRABAJO	46
<hr/>	
4.1. Descripción de la metodología para el diseño y construcción del material didáctico	46
4.1.1. Metodología para la selección de los ejes temáticos del material didáctico	46
4.1.2. Metodología para la selección de los ejercicios ilustrativos del material didáctico	48
4.1.3. Metodología para la selección de las herramientas computacionales de modelamiento de reactores químicos	50
4.1.4. Metodología para el ensamble del material didáctico en programación HTML vía Wix®	52
4.2. Metodología para la implementación del material didáctico	54
4.2.1. Descripción de la metodología de la convocatoria realizada	54
4.2.2. Descripción de la metodología herramienta Anymeeting®	54
4.2.3. Descripción de la metodología de las sesiones prácticas	55
4.3. Metodología para la evaluación del material didáctico	56
4.3.1. Diseño de la evaluación Apreciativa	56
4.3.2. Diseño de la evaluación Conceptual	56
5. DESARROLLO DE LOS MÓDULOS DEL MATERIAL	58
<hr/>	
5.1. MÓDULO 1: Introducción a la ingeniería de las reacciones químicas	58
<hr/>	
5.1.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo	58
5.1.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales	63
5.1.2.1. Nociones del volumen de los reactores químicos: Comparación del volumen de un CSTR y un PFR para la isomerización de 2-buteno (P1-6, H. Scott Fogler)	63
5.1.2.2. Dimensionamiento de reactores a partir de la conversión: Contraste entre modelos CSTR y PFR (P2-2, H. Scott Fogler)	64
5.1.2.3. Nociones básicas del diseño de reactores por lotes: Determinación del volumen de un reactor por lotes para descomposición del éter dimetílico (Adaptación P3.63, Lanny D. Schmidt)	66
5.1.2.4. Análisis de configuración de sistemas de CSTR's en serie: Serie de dos reactores (Adaptación ejemplo 3-8, Lanny D. Schmidt)	67
5.1.2.5. Análisis de configuración de sistemas de CSTR's en serie: Serie de n reactores (P2-9, H. Scott Fogler)	69



5.1.2.6. Proceso de reducción de NO _x en Comsol Multiphysics®: Análisis paramétrico básico sobre sistemas reactivos (P 3-65, G. Schaub, D. Unruh,)	70
5.2. MÓDULO 2: Conceptos básicos de cinética química	72
5.2.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo	72
5.2.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales	77
5.2.2.1. Implementación de los métodos Diferencial e Integral de análisis de datos experimentales: Descomposición fotoquímica del bromo acuoso (P5-9B, H. Scott Fogler)	77
5.2.2.2. Estimación de los parámetros cinéticos con optimización en Comsol Multiphysics®: Producción de cloruro de benceno. (E 3-1, H. Scott Fogler)	78
5.3. MÓDULO 3: Diseño de reactores ideales isotérmicos	80
5.3.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo	80
5.3.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales	86
5.3.2.1. Diseño de un reactor semicontinuo: Producción de acetato de butilo (P 4-26, H. Scott Fogler)	86
5.3.2.2. Modelamiento general en Aspen HYSYS®: Producción de benceno en todos los modelos de reactores.	87
5.3.2.3. Sistemas con separación acoplada: Destilación reactiva de etanol (P 4-26, H. Scott Fogler)	88
5.3.2.4. Sistemas de múltiples reacciones en reactores de flujo: Hidrodealquilación sobre catalizador Handry Detol (P 6-16, H. Scott Fogler)	90
5.3.2.5. Sistemas de múltiples reacciones en reactores intermitentes: Vía catalítica en la producción de ibuprofeno (P 6-26, H. Scott Fogler)	91
5.3.2.6. Sistemas de múltiples reacciones en Comsol Multiphysics®: Producción de Ibuprofeno (R.V. Chaudhari, Catalysis Today)	92
5.3.2.7. Sistemas de Gasificación en reactores empacados: Introducción al modelamiento de reactores en Matlab®.	92
5.4. MÓDULO 4: Diseño de reactores ideales no isotérmicos	94
5.4.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo	94
5.4.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales	99
5.4.2.1. Acoplamiento de sistemas de intercambio de calor: PFR con intercambiador de calor (P 8-10, H. Scott Fogler)	99
5.4.2.2. Diseño con reacciones de equilibrio: PFR con reacción de equilibrio (P 8-15, H. Scott Fogler)	100
5.4.2.3. Diseño de reactores no isotérmicos: Reactor no isotérmico para la producción de estireno en Aspen Hysys® y Aspen Plus® (P 8-26, H. Scott Fogler)	101



5.4.2.4. Diseño de reactores no isotérmicos: Reactor no isotérmico para la producción de Formaldehído en Aspen Hysys® y Aspen Plus®	102
5.4.2.5. Diseño de reactores tubulares con variaciones radiales: Variaciones radiales en reactores tubulares a través de Comsol Multiphysics®	104
5.4.2.6. Diseño de un reactor en estado no estacionario: Reactor dinámico para la producción de Hexametiltriamina en Simulink®	105
5.4.2.7. Arranque seguro de un reactor no isotérmico: Producción de propilenglicol en Comsol Multiphysics® (E 9-4, H. Scott Fogler)	107
5.4.2.8. Diseño de reactores en tres dimensiones: Reactor para la reducción de NO _x en Comsol Multiphysics® (P 3-65, G. Schaub, D. Unruh,)	108
5.5. Compilación de los módulos	110
5.5.1. Descripción del compilado como página web a través de Wix®	110
5.5.2. Gestor de descargas (4Shared®) para acceder a los ejercicios	114
6. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MATERIAL DIDÁCTICO	116
<hr/>	
6.1. Resultados de la convocatoria curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”	116
6.1.1. Presentación durante la tercera Jornada Técnica Procesa 2015 en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín	118
6.1.2. Presentación durante el XXV Encuentro Nacional de Estudiantes de ingeniería química	119
6.1.3. Presentación durante el XXI Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química	121
6.1.4. Resultados de la inscripción al curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”	121
6.2. Descripción detallada del curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”	122
6.3. Resultados evaluación del material didáctico	124
6.3.1. Resultados Encuesta de percepción de los asistentes	124
6.3.2. Concurso de simulación para evaluación conceptual	135
6.3.2.1. Convocatoria para el “Concurso de simulación en Comsol Multiphysics®”	135
6.3.2.2. Resultados del “Concurso de simulación en Comsol Multiphysics®”	136



7. CONCLUSIONES	140
8. BIBLIOGRAFÍA	141
9. ANEXOS	147
A. Lista de inscritos al curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos	147
B. Información general participantes del curso “Comsol for Dummies”	150
C. Instrucciones de Instalación Comsol Multiphysics V4.4.	157



LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Esquematzación de la metodologíá tradicional de enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas	19
Figura 2.	Esquematzación de la metodologíá Reactools de enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas	21
Figura 3.	Esquematzación del proceso de aprendizaje en ingeniería	24
Figura 4.	Logo de la Universidad de Michigan	30
Figura 5.	Definición final de los ejes temáticos de Reactools	38
Figura 6.	Representación de las tres etapas principales del Proyecto Reactools	46
Figura 7.	Selección, síntesis y adaptación de los ejes temáticos de Reactools	47
Figura 8.	Algoritmo para la selección y adaptación de los ejercicios de Reactools	49
Figura 9.	Algoritmo para la selección de las herramientas computacionales de Reactools	51
Figura 10.	Logo del Proyecto Reactools	53
Figura 11.	Captura de pantalla de aplicativo Anymeeting®	55
Figura 12.	Metodologíá de las sesiones a través de Anymeeting®	55
Figura 13.	Esquematzación del caso de diseño, problema 1-1 Reactools (Captura de pantalla)	63
Figura 14.	Resultados problema 1-1 Reactools (Captura de pantalla)	64
Figura 15.	Esquematzación reactores del problema 1-2 Reactools (Captura de pantalla)	65
Figura 16.	Resultados del problema 1-2 Reactools (Captura de pantalla)	65
Figura 17.	Esquematzación reactores del problema 1-3 Reactools (Captura de pantalla)	66
Figura 18.	Resultados regresión del problema 1-3 Reactools (Captura de pantalla)	67
Figura 19.	Esquematzación reactores del problema 1-4 Reactools (Captura de pantalla)	68
Figura 20.	Resultados regresión del problema 1-4 Reactools (Captura de pantalla)	68
Figura 21.	Esquematzación reactores del problema 1-5 Reactools (Captura de pantalla)	69
Figura 22.	Resultados regresión del problema 1-5 Reactools (Captura de pantalla)	70
Figura 23.	Resultados regresión del problema 1-6 Reactools (Captura de pantalla)	71
Figura 24.	Resultados regresión del problema 2-1 Reactools (Captura de pantalla)	77
Figura 25.	Resultados del problema 2-1 Reactools, método diferencial (Captura de pantalla)	78



Figura 26.	Resultados del problema 2-2 Reactools, optimizador de Comsol Multiphysics® (Captura de pantalla)	79
Figura 27.	Esquematación del reactor del problema 3-1 (Captura de pantalla)	86
Figura 28.	Esquematación de los resultados del problema 3-1 de Reactools (Captura de pantalla)	87
Figura 29.	Esquema de los reactores simulados en Aspen HYSYS® del problema 3-2 de Reactools (Captura de pantalla)	88
Figura 30.	Esquema del equipo de destilación reactiva del problema 3-3 de Reactools (Captura de pantalla)	89
Figura 31.	Esquema de los resultados del problema 3-3 de Reactools (Captura de pantalla)	89
Figura 32.	Esquema de los resultados del problema 3-4 de Reactools (Captura de pantalla)	90
Figura 33.	Esquema de los resultados del problema 3-5 de Reactools (Captura de pantalla)	91
Figura 34.	Esquema de los resultados del problema 3-6 de Reactools (Captura de pantalla)	92
Figura 35.	Esquema de los resultados del problema 3-7 de Reactools (Captura de pantalla)	93
Figura 36.	Esquema del problema 4-1 de Reactools (Captura de pantalla)	99
Figura 37.	Esquema de los resultados del problema 4-1 de Reactools (Captura de pantalla)	100
Figura 38.	Esquema del problema 4-2 de Reactools (Captura de pantalla)	100
Figura 39.	Esquema de los resultados del problema 4-2 de Reactools (Captura de pantalla)	101
Figura 40.	Esquema del problema 4-3 de Reactools (Captura de pantalla)	102
Figura 41.	Esquema de los resultados del problema 4-3 de Reactools (Captura de pantalla)	102
Figura 42.	Esquema del problema 4-4 de Reactools (Captura de pantalla)	103
Figura 43.	Esquema de los resultados del problema 4-4 de Reactools (Captura de pantalla)	104
Figura 44.	Esquema de los resultados del problema 4-5 de Reactools (Captura de pantalla)	105
Figura 45.	Esquema del problema 4-6 de Reactools (Captura de pantalla)	106
Figura 46.	Esquema de los resultados del problema 4-6 de Reactools (Captura de pantalla)	107
Figura 47.	Esquema de los resultados del problema 4-7 de Reactools (Captura de pantalla)	108
Figura 48.	Esquema de los resultados del problema 4-7 de Reactools (Captura de pantalla)	109
Figura 49.	Página principal página web Reactools	110



Continuación II Lista de Figuras

Figura 50.	Página principal página web Reactools, visualización de módulos	111
Figura 51.	Sección de noticias página web Reactools	111
Figura 52.	Material didáctico de los módulos en página web de Reactools	112
Figura 53.	Acceso a los ejercicios de cada módulo en página web de Reactools	113
Figura 54.	Sección del curso “Comsol for Dummies” desde la página web de Reactools	113
Figura 55.	Sección contacto de la página web de Reactools	114
Figura 56.	Gestor de descargas 4shared para el acceso a los ejercicios de Reactools	115
Figura 57.	Publicidad diseñada para la convocatoria del curso “Comsol for Dummies”	117
Figura 58.	Reconocimiento al Proyecto Reactools durante la III Jornada Técnica de Ingeniería Química e Ingeniería Biológica	118
Figura 59.	Apreciaciones del proyecto Reactools según los jurados del XXV ENEIQ	120
Figura 60.	Premio al proyecto Reactools durante el XXI Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química	121
Figura 61.	Resultados de la primera pregunta de la encuesta de percepción	125
Figura 62.	Resultados de la segunda pregunta de la encuesta de percepción	126
Figura 63.	Resultados de la tercera pregunta de la encuesta de percepción	126
Figura 64.	Resultados de la cuarta pregunta de la encuesta de percepción	127
Figura 65.	Resultados de la quinta pregunta de la encuesta de percepción	128
Figura 66.	Resultados de la sexta pregunta de la encuesta de percepción	128
Figura 67.	Resultados de la primera pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos	129
Figura 68.	Resultados de la segunda pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos	130
Figura 69.	Resultados de la tercera pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos	130
Figura 70.	Resultados de la cuarta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos	131
Figura 71.	Resultados de la quinta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos	132
Figura 72.	Resultados de la sexta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos	133
Figura 73.	Resultados de la séptima pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos	133



Continuación III Lista de Figuras

Figura 74.	Resumen de resultados de la implementación del proyecto Reactools	134
Figura 75.	Resultados del proyecto ganador del Tercer Puesto durante el concurso de simulación	137
Figura 76.	Resultados del proyecto ganador del Segundo Puesto durante el concurso de simulación	138
Figura 77.	Resultados del proyecto ganador durante el concurso de simulación	139



LISTA DE RECUADROS

Recuadro 1.	Preguntas frecuentes para fomentar el pensamiento crítico	25
Recuadro 2.	Actividades para el desarrollo del pensamiento creativo	26
Recuadro 3.	Síntesis crítica del proceso de evolución de la enseñanza de Ingeniería de las reacciones químicas	27
Recuadro 4.	Ejes temáticos para un curso de Diseño de reactores según el standard internacional propuesto por la Universidad de Michigan	30
Recuadro 5.	Recursos de aprendizaje implementados a nivel internacional	32
Recuadro 6.	Ejes temáticos manejados a nivel Nacional discriminados por Universidad	34
Recuadro 7.	Herramientas de simulación computacional implementadas en Reactools	40
Recuadro 8.	Funcionalidades y limitaciones de la suite Aspen HYSYS® V7.3. para el diseño de reactores químicos	41
Recuadro 9.	Funcionalidades y limitaciones de la Microsoft Office Excel 2013® para el diseño de reactores químicos	42
Recuadro 10.	Funcionalidades y limitaciones de la Matlab® para el diseño de reactores químicos	43
Recuadro 11.	Funcionalidades y limitaciones de la TableCurve 2D® para el diseño de reactores químicos	44
Recuadro 12.	Funcionalidades y limitaciones de la Comsol Multiphysics® para el diseño de reactores químicos	45
Recuadro 13.	Síntesis de los temas tratados en el módulo 1 de Reactools	60
Recuadro 14.	Síntesis de los temas tratados en el módulo 2 de Reactools	73
Recuadro 15.	Síntesis de los temas tratados en el módulo 3 de Reactools	81
Recuadro 16.	Síntesis de los temas tratados en el módulo 4 de Reactools	95
Recuadro 17.	Resultados generales convocatoria curso “Comsol for Dummies”	122
Recuadro 18.	Temas generales tratados en cada sesión del curso “Comsol for Dummies”	123
Recuadro 19.	Participantes del Concurso para la evaluación de “Comsol for Dummies”	135



1. INTRODUCCIÓN

“El diseño de reactores químicos diferencia a los ingenieros químicos de otros ingenieros”, esta es la típica frase de una primera clase de ingeniería de las reacciones químicas, que únicamente entendí e interioricé luego de realizar proyectos en conjunto con otras disciplinas de la ingeniería. Todo el equipo de ingenieros guardaban silencio mientras les explicaba el fenómeno de reacción y el dimensionamiento de este equipo; luego yo guardaba silencio el resto de la reunión mientras explicaban las partes mecánicas de los equipos de la planta, la instalación el eléctrica, el montaje del sistema de control y la obra civil entre otros. Me di cuenta que en esencia podía aportarle el diseño conceptual del reactor al proyecto de ingeniería.

El diseño de un reactor químico, implica un conocimiento profundo de la transformación química, su ley de velocidad, del fenómeno de transporte, del fenómeno de flujo, del fenómeno de transferencia de calor y de las propiedades físicas de las especies reaccionantes. Un ingeniero químico posee el entendimiento de estos fenómenos en conjunto. La agrupación de estos fenómenos se realiza mediante la asignatura de “Diseño de reactores químicos” o “Ingeniería de las reacciones químicas” que se incluye en el todos los planes de estudio de las universidades que otorgan el título de “Ingeniero químico”.

En el momento de aprender, el entendimiento pasa por tres etapas: una comprensión del concepto (En donde se entiende el tema, comprendiendo la integración entre el modelo y el fenómeno físico), una desarrollo del pensamiento crítico (En donde se adquiere la capacidad de decidir qué está correcto y qué no, y más importante porqué es correcto y por qué no) y un desarrollo del pensamiento creativo (En donde se adquiere la capacidad de aplicar y adaptar el concepto aprendido en algún problema de la vida real). Actualmente, se implementan metodologías tradicionales para la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas, que se enfocan en la deducción detallada de cada modelo de reactor partiendo de las expresiones generales de balance molar y de energía. Se piensa que el estudiante puede desarrollar su pensamiento crítico y creativo a partir de la deducción planteada en clase.

Siempre he pensado que el éxito del diseño de un reactor químico es una función de la combinación del conocimiento de diseño de reactores químicos con destrezas en herramientas de simulación computacional, únicamente al simular el modelo de un reactor de forma adecuada, se logra desarrollar el pensamiento crítico, y únicamente cuando se puede alterar esta simulación y adaptarla a un problema de ingeniería química, se desarrolla el pensamiento creativo y se logran los objetivos de aprendizaje de ingeniería de reacciones químicas. Esta es la hipótesis central de la cual se parte para el desarrollo del proyecto.



Como tal el proyecto, consiste en el diseño e implementación de un material didáctico para la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas a nivel pregrado con un énfasis en las herramientas de simulación computacional con las que se cuentan actualmente para la simulación de reactores químicos. La primera parte del proyecto es el diseño del material, para esto, resulta de vital importancia comprender cuáles son las necesidades de aprendizaje de la ingeniería de las reacciones químicas a nivel nacional e internacional para orientar el material y que sea de utilidad en el contexto donde será aplicado.

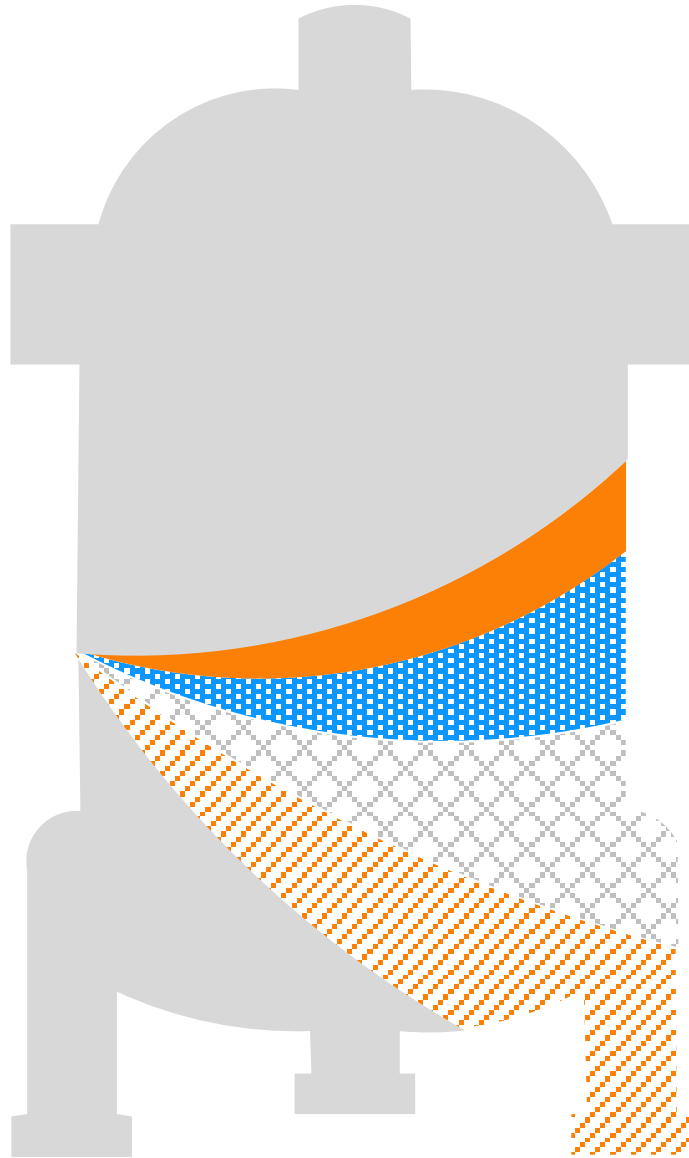
La generación del panorama de la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas permitió dividir el material didáctico (Llamado Reactools) en 4 módulos didácticos: El primero como una introducción a la ingeniería de las reacciones químicas, en donde se presentan las ecuaciones de diseño en función de la conversión y los flujos molares para los principales modelos ideales de reactores, el segundo en donde se presentan los conceptos fundamentales de cinética química y estequiometría básicos para el modelamiento de reactores, un tercer módulo en donde se exploran los modelos de reactores isotérmicos, abarcando sistemas dinámicos multirreactivos. Un cuarto módulo en donde se presenta el diseño de reactores no isotérmicos, haciendo la deducción del balance de energía para sistemas reactivos y el modelamiento del cambio de temperatura a lo largo de la reacción.

Reactools consta de varios componentes en cada uno de sus módulos: Textos guía en formato .pdf, Presentaciones ilustrativas en formato .ppt, Ejercicios desarrollados en las herramientas de simulación computacional (archivos .mph, .txt, .xlsm, .hsc, .apw, .mdl), videos tutoriales en formato mp4 y todo compilado en programación HTML en la página web nfrincons.wix.com/reactools.com. Las herramientas de simulación manejadas principalmente fueron 5: Microsoft Excel[®] (Más que todo como herramienta pedagógica o “visor”), Tablecurve 2D[®] (Para las regresiones de funciones a datos experimentales), Matlab[®] (Para el análisis dinámico de reactores principalmente), Aspen Tech[®] (Para la integración de los modelos de reactores con bases de datos de propiedades físicas de sustancias químicas) y Comsol Multiphysics[®] (Para el modelamiento de reactores reales involucrando fenómenos de mezcla y transporte en superficies tridimensionales).

La fase de implementación del material didáctico se realizó a través del curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos con Comsol Multiphysics[®]”, consistió en un curso dado a través de webinaros en la plataforma Anymeeting[®] que contó con la participación de 92 inscritos de universidades a lo largo del territorio nacional y en Estados Unidos, tanto de estudiantes de pregrado como estudiantes de posgrado. Entre las universidades participantes de curso, se destacan la Universidad del Atlántico, la Universidad de Cartagena, la Universidad Nacional de Colombia y la Universidad de Purdue. Constó de seis sesiones prácticas en donde se abarcaron los ejes temáticos de Reactools con un enfoque netamente en el funcionamiento de la herramienta Comsol



Multiphysics®. La fase de implementación se evaluó en dos partes: La evaluación de percepción de los estudiantes, realizada a través de una encuesta enfocada en 3 aspectos del curso, y la realización de un concurso de simulación en Comsol Multiphysics® para la evaluación conceptual de la fase de implementación.



2. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO

2.1. Descripción del Problema

Es natural que todos los proyectos busquen darle una solución a un problema que se evidencie en la vida cotidiana. Reactools fue pensado y diseñado específicamente para abordar un problema presentado en el proceso de aprendizaje actual de la asignatura del programa de ingeniería química “Diseño de reactores”, ahora bien ¿Cuál es ese problema?

Siempre he pensado que la mejor manera de identificar un problema es cuando tenemos que lidiar con ellos en el transcurso de nuestra vida. Yo estudié ingeniería química en la Universidad Nacional de Colombia y debo empezar mi tesis con una anécdota personal que describe la problemática a la que Reactools da solución:

Mi asignatura favorita durante toda mi carrera fue “Ingeniería de las reacciones químicas”, desde el momento en que durante la segunda clase el profesor nos dice “El diseño de reactores es lo que nos diferencia de cualquier otra ingeniería”. Esta es una de esas frasecitas que te marca y nunca se olvidan. Desde la segunda clase, me di cuenta que dedicaría más tiempo del que le dedico normalmente a una asignatura para aprender el diseño de reactores químicos. Sin embargo, a medida que el curso avanzaba, todas las temáticas se presentaban de la misma manera. A este fenómeno lo denominé “La forma tradicional de enseñar diseño de reactores químicos”, a grandes rasgos se ilustra en la figura a continuación:

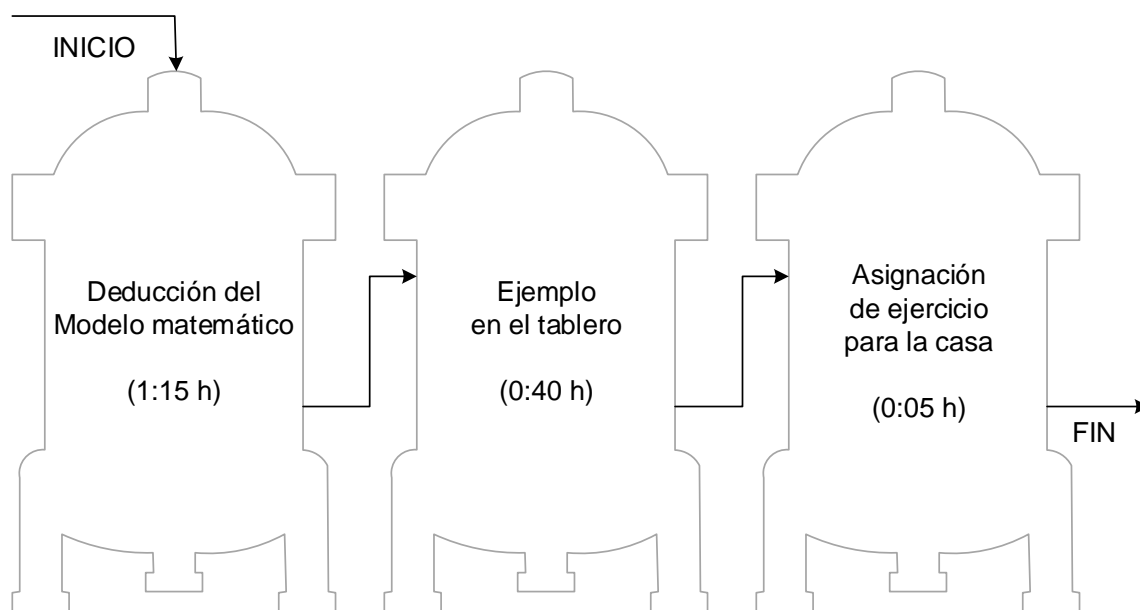


Figura 1: Esquematización de la metodología tradicional de enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas



En general, lo que propone la figura 1 es un proceso llamado “Clase de diseño de reactores tradicional”, que abarca tres etapas: la primera demora 1 hora y 15 minutos en la deducción del modelo matemático, donde se hace énfasis en el paso a paso muy detallado de los cambios y simplificaciones que se realizan sobre las ecuaciones de diseño para llegar a las ecuaciones finales a resolver. La segunda etapa abarca un ejercicio de ejemplo en donde se aplica exactamente lo que dice el modelo matemática deducido en el tablero, usando el tablero como medio de enseñanza y las calculadoras que traen los estudiantes como herramienta de cálculo. Un tercer paso, corresponde a la asignación de un ejercicio complejo para la casa en el cual hay que hacer uso de herramientas de simulación para poder llegar al resultado. En ningún momento voy a decir que esta metodología de enseñanza no sea la correcta, sin embargo, cuestiono elementos de cada uno de sus etapas:

Etapa 1: Luego de entender el fenómeno físico o el caso de diseño, el resto del tiempo invertido en esta etapa (Que es muy elevado), se torna en aritmética y reacomodación de ecuaciones diferenciales. Temas que a las alturas de la carrera el estudiante ya maneja, por lo que el tiempo puede estar desaprovechándose. Además, ¿Dónde está el contexto industrial de cada caso de diseño de reactores?, ¿Cómo se podría adaptar el caso de diseño a un reactor de la vida real o a una situación que efectivamente se presente en la industria?

Etapa 2: Si se sigue un ejercicio sencillo que puede resolverse en el tablero, se contribuye al proceso de afianzar el concepto. Sin embargo, a la hora de enfrentar problemas de diseño reales, es necesario hacer uso de las herramientas de simulación computacional, y en ningún momento de la clase se está permitiendo un espacio para la enseñanza de estas herramientas. En lugar de usar las calculadoras para resolver ecuaciones algebraicas en clase, pueden usarse herramientas de simulación para llegar a la solución y dedicarle tiempo a lo importante: El análisis de resultados.

Etapa 3: La asignación de un ejercicio siempre es conveniente, sin embargo, se limita a que el estudiante llegue a un resultado numérico final y no desarrolle su capacidad de análisis. Esto es natural en el sistema de enseñanza tradicional, ya que durante la clase no se dedica tiempo a fomentar el análisis de los reactores, sino a hacer cálculos para llegar a valores numéricos.

Aclaro en este punto que las tres observaciones que hice sobre la metodología tradicional de enseñanza de reactores son netamente subjetivas, propias opiniones al respecto. Toda solución, viene de una perspectiva subjetiva del problema. En este punto, me queda decirle al lector que puse todo de mí para darle solución a estas falencias en los procesos de aprendizaje y no quedarme en la crítica.



2.2. Justificación del Proyecto

Siempre he sido un fanático de la escritura subjetiva durante los ítems preliminares de un trabajo de grado, por lo que la justificación de Reactools se remonta a una segunda anécdota personal:

Una vez descrita la problemática desde una perspectiva propia, decido identificar si existen personas que comparten mi misma opinión. Entonces recuerdo por un momento el profesor con que cursé la asignatura de Transferencia de calor, quien siempre trataba de involucrar lo más posible las herramientas que facilitan el cálculo de los equipos de transferencia de calor, por lo que quedaba el tiempo suficiente de analizar la operación de los equipos y darle un contexto industrial a las temáticas de clase. Inmediatamente, contacto al profesor para comentarle el problema que tengo identificado con la metodología de enseñanza del curso de diseño de reactores químicos, sin preámbulo le planteo la solución de la siguiente manera:

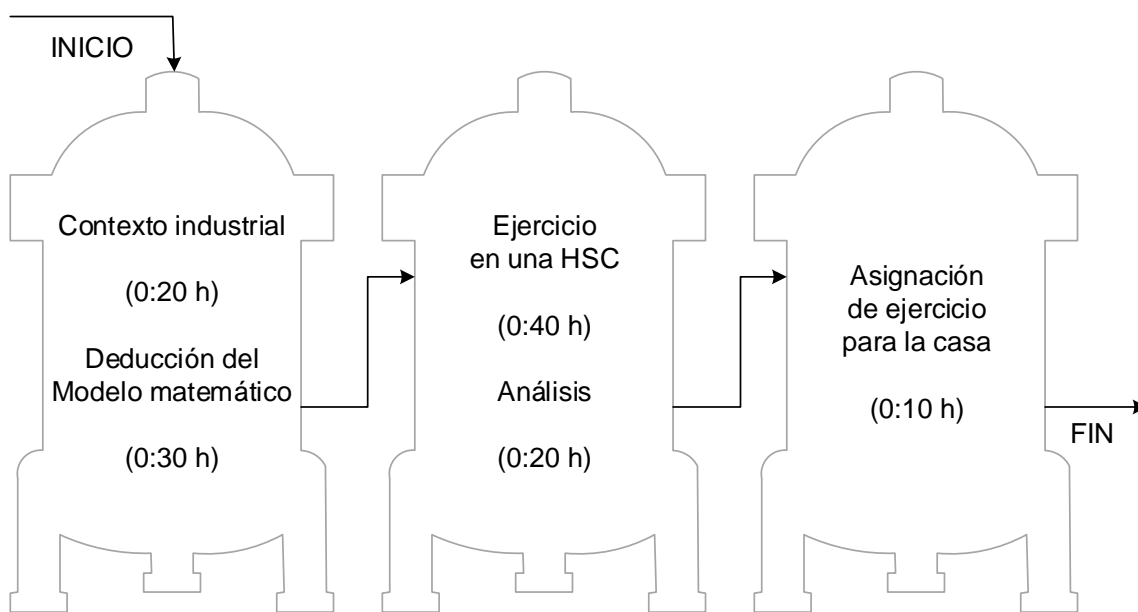


Figura 2: Esquematización de la metodología Reactools de enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas

Le expliqué al profesor la importancia de fomentar el análisis y la creatividad así como fortalecer el contexto industrial de los estudiantes, y ambos decidimos que esto podía lograrse si y solo si se involucraban las recientes herramientas para la resolución de modelos matemáticos y simulación. En general, la figura 2 propone las mismas tres etapas que la metodología tradicional, pero con una distribución de tiempo distinta y con la implementación de las herramientas de simulación computacional (HSC) en la etapa 2. En detalle se plantea que:



Etapa 1: Comprende 50 minutos en donde se hace la deducción del modelo sin entrar en el detalle aritmético y usando dispositivos que faciliten la visualización de los modelos, brindando un tiempo suficiente para contextualizar a nivel industrial el caso de diseño de reactores que se esté trabajando.

Etapa 2: Comprende 1 hora en donde a través de las herramientas de simulación computacional se abarca un caso de diseño y se potencia hasta el punto de no generar un único resultado, sino múltiples. Al tener múltiples resultados de un determinado caso de diseño resulta posible introducir el análisis de la influencia de variables en el diseño de reactores, por lo que se fomenta el pensamiento analítico de los estudiantes.

Etapa 3: La asignación del caso de estudio, debe tomar el tiempo para explicarlo adecuadamente, no para que los estudiantes copien los parámetros del sistema, por este motivo es necesario tomar un tiempo de al menos 10 minutos para la asignación del trabajo.

Cabe resaltar que estas tres etapas de lo que podría llamarse una “Clase Reactools”, pueden variar de acuerdo al tema tratado, pero a grandes rasgos este es el modelo de clase al cual Reactools pretende llegar a través de todo el material desarrollado. En ese orden de ideas, el proyecto Reactools encuentra su justificación en la necesidad del cambio de metodología de enseñanza de diseño de reactores, ante la necesidad de implementar las nuevas herramientas de simulación que faciliten el cálculo para dedicar más tiempo de aprendizaje en el contexto industrial y análisis técnico de los casos de reactores.



2.3. Objetivos

2.3.1. Objetivo General

Diseñar e implementar un material didáctico para la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas a nivel de pregrado, involucrando las herramientas de simulación computacional más frecuentadas en el diseño de reactores químicos

2.3.2. Objetivos Específicos

- U Identificar los principales ejes temáticos que se manejan en los cursos de diseño de reactores químicos a nivel nacional e internacional.
- U Identificar e implementar herramientas de simulación computacional para la resolución de casos de diseño de reactores químicos.
- U Recopilar, organizar y adaptar la información presente en la literatura sobre los ejes temáticos manejados en cursos de diseño de reactores.
- U Compilar el material didáctico de tal manera que sea de fácil acceso para los estudiantes.
- U Implementar el material didáctico en un grupo de estudiantes de ingeniería química.



3. MARCO TEÓRICO

3.1. Metodologías de Aprendizaje en Ingeniería

Todo proyecto pedagógico debe empezar por entender cómo son los procesos de aprendizaje en su correspondiente área del conocimiento con el fin de enfocar el material didáctico a cubrir las necesidades de cada uno de estos procesos. Esta sección del marco teórico presenta una adaptación resumida de los subprocesos de aprendizaje en Ingeniería.

El aprendizaje en temas concernientes a ingeniería se divide en tres procesos fundamentales: Comprensión del concepto, desarrollo del pensamiento crítico y desarrollo del pensamiento creativo^[1]. Este proceso de aprendizaje se ilustra en el diagrama de flujo presentado en la figura 3:

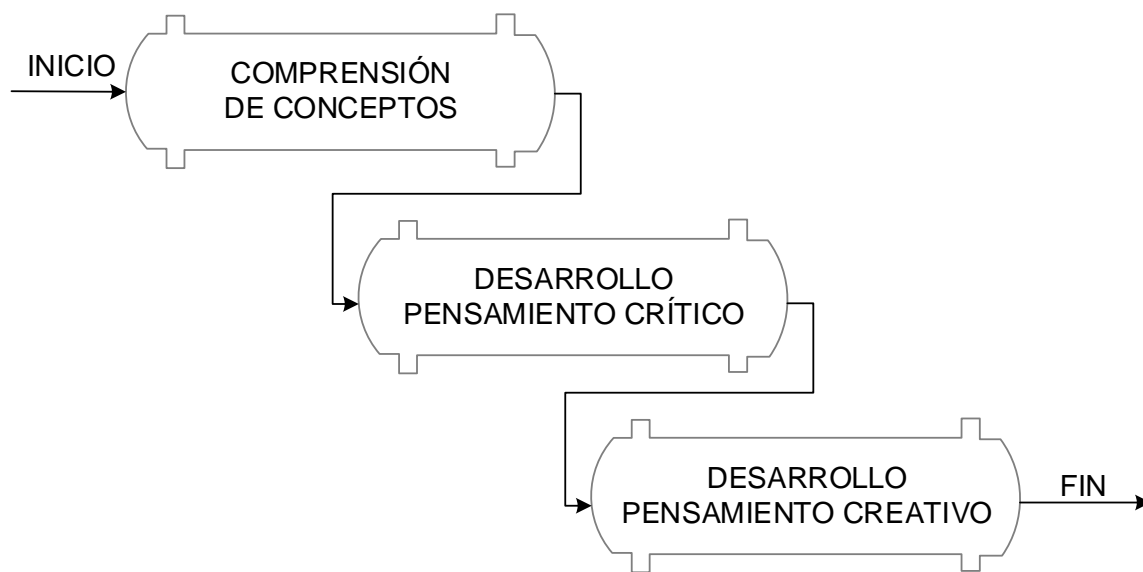


Figura 3: Esquematización del proceso de aprendizaje en ingeniería

3.1.1. Metodología para la comprensión de conceptos

El primer subproceso corresponde a la comprensión de conceptos, en donde el estudiante utiliza el razonamiento (Más que la memoria) para entender inicialmente el modelo que se le esté presentando. Para lograr una efectiva comprensión del concepto, el estudiante debe contar con las herramientas necesarias tanto para el autoaprendizaje como para la resolución de todas las dudas que pueda tener durante el proceso. Las herramientas van desde recursos virtuales, textos, presentaciones de clase, videos tutoriales, ejemplos guiados y espacio para la resolución de dudas grupales e individuales^[1]. A este conjunto de herramientas se les denomina *Recursos de Aprendizaje*.



3.1.2. Metodologías para el desarrollo de habilidades en el pensamiento crítico

El segundo subproceso es el correspondiente al desarrollo del pensamiento crítico, en donde una vez el estudiante comprende el concepto, está en la capacidad de adquirir un criterio sobre este y decidir analíticamente en qué situaciones puede aplicar el conocimiento adquirido, así como qué información es coherente y cual requiere de revisión. En general, el desarrollo en el pensamiento crítico busca promover la capacidad de análisis del estudiante, permitiéndoles cuestionarse sobre el porqué del fenómeno y a su vez darle las herramientas para que resuelva estas inquietudes. Preguntas frecuentes que se realizan para fomentar este pensamiento se presentan en el recuadro 1^[2]:

-
- 1) **Preguntas para aclaración:**
¿Por qué dice usted eso? ¿Cómo se relaciona con la discusión?
 - 2) **Preguntas que sondan suposiciones:**
¿Qué se podría asumir en lugar de eso? ¿Cómo se podría verificar la suposición o comprobar si es errónea?
 - 3) **Preguntas que sondan motivos y evidencia:**
¿Cuál sería un ejemplo de esto?
 - 4) **Preguntas acerca de puntos de vista con perspectiva:**
¿Cuál sería otra alternativa?
 - 5) **Preguntas que sondan implicaciones y consecuencias:**
¿Qué generalizaciones podría hacer al respecto? ¿Cuáles son las consecuencias de esta suposición?
 - 6) **Preguntas acerca de la pregunta:**
¿Cuál es el objeto de esta pregunta?

Recuadro 1: Preguntas frecuentes para fomentar el pensamiento crítico

3.1.3. Metodologías para el desarrollo de destrezas en el pensamiento creativo

El tercer subproceso presente es el desarrollo del pensamiento creativo, donde se busca que con base en los conceptos comprendidos y el criterio adquirido, el estudiante esté en la capacidad de proponer nuevas situaciones o soluciones a problemas, aplicando el conocimiento aprendido. Esta etapa del proceso de aprendizaje es la más descuidada en la mayoría de los casos, para propiciar el desarrollo de este pensamiento se propone una serie de actividades presentadas en el recuadro 2^[3]:



-
- 1) Lluvia de ideas para formular preguntas o sugerir cálculos que puedan realizarse para un problema dado
 - 2) Lluvia de ideas sobre la manera en la que podría resolverse el problema de manera incorrecta
 - 3) Lluvia de ideas de las maneras de facilitar o complicar el problema aún más
 - 4) Lluvia de ideas sobre lo que se aprendió al resolver el problema y sobre el objetivo de lo aprendido
 - 5) Lluvia de ideas sobre los motivos por los cuales en algún punto los cálculos no son coherentes con el fenómeno físico
 - 6) Realizar preguntas tipo “¿Qué ocurriría si...?”

Recuadro 2: Actividades para el desarrollo del pensamiento creativo

Reactools busca consolidar un material didáctico que abarque los tres subprocesos de aprendizaje en ingeniería, no limitado a la comprensión de conceptos, sino fácilmente extensible al desarrollo de la capacidad analítica y creativa del estudiante.

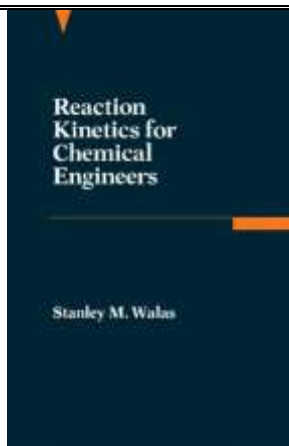
3.2. Panorama de la Enseñanza de las reacciones químicas

Uno de los puntos más importantes en la definición de las herramientas de aprendizaje con las que contará Reactools es entender cómo ha evolucionado la enseñanza de la Ingeniería de las Reacciones Químicas y a su vez qué ejes temáticos se han manejado a nivel nacional e internacional. Esta sección del marco teórico busca en primera instancia presentar una evolución histórica de la enseñanza del diseño de reactores, seguido de un Panorama Nacional e Internacional actual (2015) de las metodologías y ejes temáticos implementados.

3.2.1. Evolución de la enseñanza de las reacciones químicas en los últimos 60 años

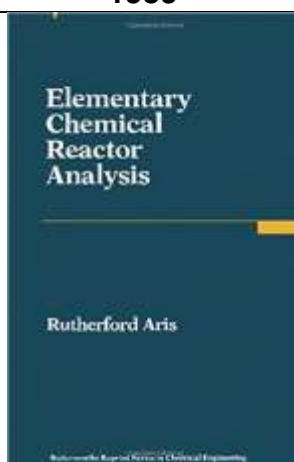
En términos generales, la enseñanza de la ingeniería de las reacciones químicas se resume en teorías plasmadas en textos guía que se siguen de manera rigurosa a lo largo del curso. El recuadro 3 presenta una síntesis subjetiva de los textos más utilizados en orden cronológico, su respectivo aporte a las teorías de diseño de reactores químicos y su contribución a las metodologías de aprendizaje de esta asignatura.





1959^[4]

En 1959, Stanley M. Walas publica su libro “Reaction kinetics for Chemical Engineers”. Este libro corresponde a un primer intento de vincular la teoría sobre cinética química al diseño de los reactores. Esta vinculación la realiza a través de la inserción de los modelos cinéticos en el término de generación en el balance molar de los equipos. Este libro se limita al desarrollo de los modelos de reactores isotérmicos en términos de la conversión y flujos molares. En términos de metodología, presenta la deducción detallada de los modelos matemáticos sin entrar en el detalle del fenómeno físico y sin presentar ejemplos cotidianos en la industria en donde sean aplicados los conceptos presentados.^[5]



1969^[6]

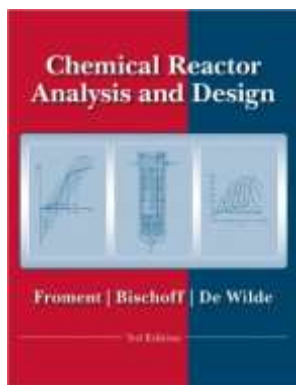
En 1969, Rutherford Aris publica su libro “Elementary Reactor Analysis”. Este libro reúne la teoría de diseño de reactores planteadas por Walas y las complementa con la inclusión de modelos de reactores no isotérmicos y ecuaciones de Arrhenius para enlazar la cinética de la reacción al modelo termodinámico del proceso. A nivel metodológico, presenta técnicas básicas para solución de ecuaciones diferenciales con métodos numéricos. Los ejemplos planeados son pertinentes con los modelos desarrollados y enmarcan una situación de la industria a pesar que no se usen datos de la vida real.^[7]



1980^[8]

En 1980, Smith publica su libro “Chemical Engineering Kinetics”. Este libro tiene un énfasis algo distinto al de Aris y al de Walas, pues tiene como principal objetivo presentar los métodos numéricos para la construcción de modelos cinéticos, potenciando el intento de Walas de vincular el fenómeno de cinética química con el balance molar en los reactores. Los métodos descritos en este libro, permiten calcular los parámetros de las leyes de velocidades a partir de datos experimentales de laboratorio, estableciendo un vínculo entre el diseño de reactores y datos de la vida real. A nivel metodológico, se implementan estrategias de cálculo que no requieren de herramientas de simulación computacional ni manejo de lenguajes de programación para la resolución de los ejemplos y ejercicios. Smith implementa datos de la vida real en sus ejemplos, pero así mismo, los ejemplos no ilustran todos los conceptos presentados en el libro.^[9]





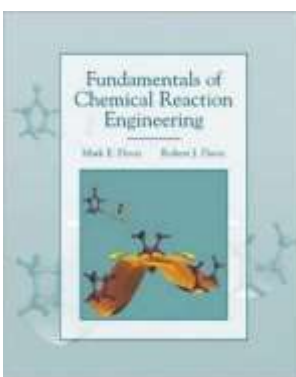
1990^[10]

En 1990, Froment y asociados publican su libro “Chemical Reactor Analysis and Design”. Este libro tiene un enfoque completamente hacia el desarrollo de los modelos más complejos de reactores: Reactores reales en varias dimensiones con inclusión de fenómenos de transporte en sus modelos. Froment implementa programación avanzada en Fortran® para llegar a las soluciones de los ejercicios que plantea durante su libro. A nivel metodológico, la descripción del desarrollo de los modelos físicos y químicos no es tan rigurosa como lo es la descripción de la resolución matemática mediante programación. Los ejemplos que presenta, permiten visualizar los resultados pero existe en la mayoría un vacío entre el modelo y los resultados, pues no documenta el paso a paso de cada ejercicio.^[11]



1999^[12]

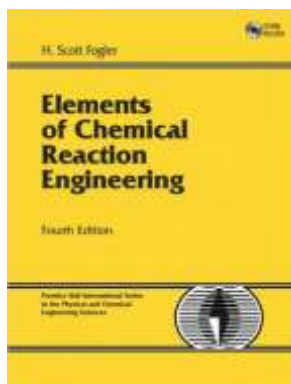
En 1999, Octave Levenspiel publica su libro “Chemical Reaction Engineering”, como un primer intento por sintetizar el trabajo de Walas, Smith y Rutherford. Contiene diseño de reactores isotérmicos, no isotérmicos y actualiza los métodos de optimización de parámetros cinéticos de acuerdo a las herramientas de simulación disponibles a la fecha. Incluye un módulo corto sobre diseño de reactores reales, tratando de retomar una parte de lo planteado por Froment. A nivel metodológico, este libro se destaca por la implementación de algoritmos que facilitan que el estudiante siga el paso a paso de los ejemplos presentados y tenga la estructura mental para aplicarlos en otras situaciones de diseño. Implementa también datos de la industria cotidiana para el desarrollo de los ejercicios.^[13]



2003^[14]

En el 2003, Davis publica su libro “Fundamentals of Chemical Reaction Engineering”. Este libro lo podría desde mi perspectiva catalogar como el primero que se preocupa por el estudiante. Presenta los mismos ejes temáticos que el libro de Levenspiel, incluyendo un módulo de reactores biológicos y una explicación más detallada de la influencia de los fenómenos de transporte en el diseño de reactores químicos. A nivel metodológico, se preocupa por usar situaciones cotidianas en la explicación de los conceptos e implementa simulaciones en Excel® para lograr solucionar los problemas diferenciales de diseño. Recopila ejercicios de anteriores autores y los adapta a las herramientas de simulación computacional del momento.^[15]





2006^[16]

En el 2006, Scott Fogler publica su libro “Elements of Chemical Reaction Engineering”. Este libro se establece como el libro guía universal para la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas. Incluye 14 capítulos en donde se abarca el diseño de reactores isotérmicos y no isotérmicos tanto es estado estacionario como en dinámico, cubre los módulos de biorreactores y catálisis, incluyendo optimización de parámetros cinéticos y las teorías de reactores reales de Froment.

A nivel metodológico, este libro es innovador. Incluye tanto ejercicios de la industria como aplicaciones en campos de la ciencia y la vida cotidiana para la ilustración de los conceptos presentados, incluye material virtual online, implementa herramientas de simulación como Polymath[®] y Comsol[®] y da una amplia gama de referencias para posterior investigación por parte del estudiante.^[17]

Recuadro 3: Síntesis crítica del proceso de evolución de la enseñanza de Ingeniería de las reacciones químicas

Lo importante del recuadro 3 es evidenciar el patrón que se viene experimentando en cuanto a enseñanza de Ingeniería de las Reacciones químicas: Una tendencia hacia abordar los ejercicios rápidamente a través de herramientas de simulación computacional para poder invertir más tiempo en el desarrollo de la capacidad de análisis.

3.2.2. Enseñanza actual de Ingeniería de las reacciones químicas a nivel global

A pesar de que cada programa curricular en donde se incluye la asignatura de diseño de reactores químicos es libre de proponer los ejes temáticos cubiertos, la tendencia a nivel global para un curso a nivel de pregrado se basa en el standard propuesto por la Universidad de Michigan ^[18], donde se tratan los ejes temáticos propuestos por Scott Fogler en la cuarta edición de su libro. Un resumen crítico estos se presenta en el recuadro 4:





Figura 4: Logo de la Universidad de Michigan^[19]

1. Balances molares

Presentación de los modelos de reactores manejados en el diseño, junto a sus correspondientes balances molares en términos de los flujos molares y la conversión.

2. Leyes de Velocidad

Inclusión de las leyes cinéticas en las ecuaciones de diseño para cada modelo de reactor, clasificando expresiones cinéticas según su naturaleza

3. Estequiometria

Implementación de las relaciones estequiométricas y ecuaciones de estado para expresar los términos de las leyes de velocidad como concentraciones o en función de la conversión.

4. Diseño de reactores:

Intermitentes, PFR, CSTR, PBR, semicontinuo, de membrana

Detalle de las ecuaciones de diseño de los modelos más comunes de reactores, incluyendo la operación isotérmica en estado dinámico para reactores intermitentes y semicontinuos y los modelos de caída de presión en reactores empacados. Integración de la estequiometría, las leyes de velocidad y los balances molares correspondientes.

5. Análisis de datos: Regresiones

Determinación de los parámetros de las leyes de velocidad a través del análisis de datos recolectados en ensayos experimentales. Inclusión de modelos de regresión y optimización a través de herramientas de simulación computacional



6. Reacciones múltiples

Inclusión del balance molar para múltiples reacciones en todos los modelos de reactores. Definición de la velocidad neta de reacción para cada especie y explicación de su correspondiente sentido físico.

7. Ingeniería de biorreactores

Presentación de los modelos cinéticos más comunes en las reacciones catalizadas con microorganismos. Inclusión de estos en las ecuaciones de diseño de los modelos presentados de reactores.

8. Diseño de reactores no isotérmicos

PFR y CSTR con intercambiador de calor, múltiples estados estacionarios

Inclusión del balance de energía en las ecuaciones de diseño de los modelos de reactores estudiados, definiendo estrategias para el cálculo del calor reacción, la operación adiabática de reactores y la operación con equipos de intercambio de calor.

9. Reactores no isotérmicos dinámicos

Seguridad en operación de reactores

Aplicación del balance de energía para sistemas en donde el cambio en el tiempo es significativo. Análisis del arranque de reactores para determinar la seguridad en la operación.

10. Catálisis

Presentación de las generalidades de las cinéticas con parámetros para describir fenómenos catalíticos. Énfasis en la inclusión de estas ecuaciones en las expresiones de diseño para los modelos de reactores catalíticos.

Recuadro 4: Ejes temáticos para un curso de Diseño de reactores según el standard internacional propuesto por la Universidad de Michigan

Según el recuadro 4, a nivel internacional se está enseñando todo lo concerniente al diseño de reactores isotérmicos y no isotérmicos tanto en estado estacionario como dinámico, incluyendo teoría para hacer la regresión de leyes de velocidad y el módulo aplicado a biorreactores e introducción a la catálisis. A nivel de material didáctico o recursos de aprendizaje, el recuadro 5 presenta una adaptación de los que se usan más frecuentemente a nivel internacional^[20]:



Recursos de aprendizaje

Actualmente, se manejan 4 recursos básicos de aprendizaje que se incluyen en los programas de cursos de diseño de reactores:

- Notas resumidas: Incluyen generalidades sobre el material de cada tema tratado, ejemplos adicionales y comentarios, así como pruebas de autoevaluación.
- Módulos Web: Páginas web dedicadas a aplicar los conceptos a problemas específicos de ingeniería, incluyendo animaciones para ejemplificar mejor cada situación
- Módulos Interactivos de computación: Aplicativos con ejercicios para repasar los conceptos aprendidos a través del texto y las clases
- Problemas resueltos: Banco virtual de problemas resueltos aplicando los conceptos trabajados. Los problemas cuentan con un enfoque hacia problemas de la vida real.

Problemas de ejemplo vivo

Adicionalmente, actualmente se busca integrar los problemas de diseño de reactores a las herramientas computacionales disponibles.

Los problemas de ejemplo vivo corresponden a ejercicios desarrollados directamente en herramientas de simulación computacional como Matlab[®], Polymath[®] o Comsol[®], en donde el estudiante puede hacer variaciones paramétricas y apreciar los resultados de las simulaciones para lograr analizar los resultados según el cambio generado.

Banco de referencia profesional

Actualmente se manejan bancos de referencia profesional en donde es posible encontrar situaciones de diseño de reactores presentadas comúnmente en la industria, así como los correspondientes procesos de diseño. La importancia de la consolidación de estos bancos está en el hecho de digitalizar la información de procesos químicos desarrollada en los últimos siglos.

Recursos Adicionales

Secciones de preguntas frecuentes, enciclopedias virtuales con imágenes de reactores, inclusión de prácticas de laboratorio y lectura de artículos de revistas de diseño de equipos, corresponden a los recursos adicionales que se están implementando a nivel internacional para la enseñanza de diseño de reactores químicos.

Recuadro 5: Recursos de aprendizaje implementados a nivel internacional



3.2.3. Enseñanza actual de Ingeniería de las reacciones químicas a nivel local

A nivel nacional (Colombia) existen en el año 2015, 17 Universidades en donde se encuentra el programa de Ingeniería Química. Todas estas cuentan con una asignatura relativa al diseño de reactores químicos. En esta sección, se presentará un recuadro sintetizando los ejes temáticos tratados en 13 de estas universidades, con el objetivo de identificar los pilares en torno a los cuales se diseñará Reactools.

En el recuadro 6, se aprecia en la primera columna el nombre de la universidad junto con el nombre de la asignatura referente al diseño de reactores químicos, en las columnas posteriores se presentan los temas tratados. Si el recuadro se encuentra coloreado en tono gris, significa que la universidad abarca el correspondiente tema, de lo contrario, no lo abarca. Las referencias bibliográficas para la construcción de esta tabla van desde la número [21] hasta la número [46].




Según el recuadro 6, existe un núcleo común temático presente en el 100% de las universidades: Balances molares, leyes de velocidad, relaciones estequiométricas, diseño de reactores isotérmicos, diseño de reactores no isotérmicos y análisis para múltiples reacciones. Por esta razón, las temáticas mencionadas inmediatamente conformarán parte de los módulos temáticos de Reactools, además de estar incluidas en el estándar internacional (Recuadro 4).

Existen también temas que la mayoría de universidades incluyen en su plan de estudios, como es el caso de los modelos para regresión y optimización de parámetros cinéticos (Que está incluido en el 54% de las universidades estudiadas); El diseño de reactores no isotérmicos en estado dinámico (incluido en el 62% de los programas analizados). Con respecto a estos temas de inclusión intermedia, se consideran pertinentes y relevantes según el estudio de la situación nacional y se incluyen dentro de los módulos de Reactools, recalando que también forman parte del estándar internacional.

Por otra parte, hay dos ejes temáticos que no se incluirán en Reactools debido a su corta implementación a nivel local en los cursos de diseño de reactores: Diseño de Biorreactores (Con una inclusión no superior al 15%), modelos de reactores reales (También incluidos en un 32% de las universidades analizadas), y el ámbito de catálisis detallado (Con una inclusión del 23%). De esta manera, el recuadro 7 muestra cómo se consolida Reactools en 5 ejes temáticos de acuerdo a las necesidades locales de educación y a los estándares internacionales de un curso de diseño de reactores.







Recuadro 6, Primera Parte

Universidad/ Asignatura	1. Balances molares	2. Leyes de velocidad	3. Relaciones Estequiométricas	4. Análisis de datos: regresiones	5. Diseño de reactores isotérmicos	6. Diseño de reactores no isotérmicos	7. Reactores no isotérmicos dinámicos	8. Diseño de Biorreactores	9. Múltiples reacciones	10. Reactores catalíticos	11. Modelos de reactores Reales
 <p>Universidad de los Andes^[21] Ingeniería de Reacciones^[22]</p>											
 <p>Universidad de Pamplona^[23] Cinética Química^[24]</p>											
 <p>UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA Universidad de San Buenaventura^[25] Cinética química^[26]</p>											






Recuadro 6, Continuación I

 <p>Universidad del Atlántico ^[27] Diseño de Reactores ^[28]</p>												
 <p>Universidad de La Sabana ^[29] Ingeniería de las reacciones químicas ^[30]</p>												
 <p>Universidad de América ^[31] Bogotá - Colombia Cinética Química ^[32]</p>												
 <p>Universidad Jorge Tadeo Lozano ^[33] Ingeniería de Reacciones ^[34]</p>												






Recuadro 6, Continuación II

 <p>Universidad de Antioquia^[35] Ingeniería de las reacciones químicas^[36]</p>												
 <p>Universidad de Cartagena^[37] Ingeniería de las reacciones químicas^[38]</p>												
 <p>Universidad del Valle^[39] Ingeniería de Reacciones^[40]</p>												



Recuadro 6, Continuación III

 <p>UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA</p> <p>Universidad Nacional de Colombia ^[41] Ingeniería de las Reacciones Químicas ^[42]</p>											
 <p>Universidad Pontificia Bolivariana</p> <p>Universidad Pontificia Bolivariana ^[43] Diseño de Reactores ^[44]</p>											
 <p>Universidad Tecnológica de Bolívar</p> <p>Universidad Tecnológica de Bolívar ^[45] Ingeniería de Reacciones ^[46]</p>											

Recuadro 6: Ejes temáticos manejados a nivel Nacional discriminados por Universidad



Como se mencionaba, la figura 5 permite visualizar los ejes temáticos de Reactools seleccionados de acuerdo a las necesidades locales y estándares internacionales de un curso de Diseño de Reactores, con una breve descripción al respecto:

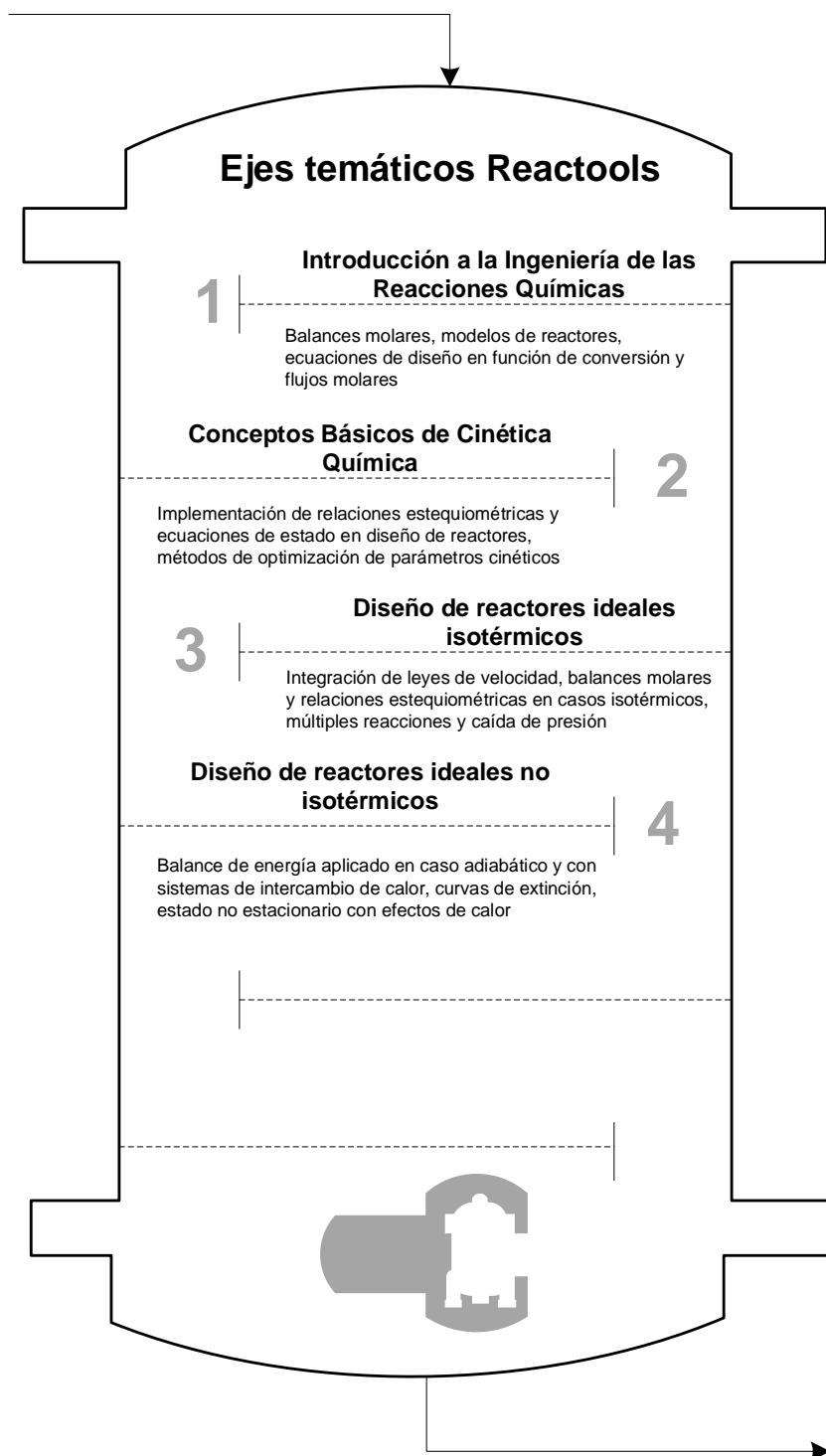


Figura 5: Definición final de los ejes temáticos de Reactools



3.3. Herramientas computacionales para el modelamiento de Reactores Químicos

La innovación de Reactools se encuentra principalmente en la inclusión de herramientas de simulación computacional en los procesos de aprendizaje de Diseño de Reactores. La siguiente sección presentará un recorrido por la aplicación de estas herramientas en casos puntuales de Diseño de Reactores.

3.3.1. Importancia de las herramientas computacionales para el modelamiento de reactores químicos

La importancia de las herramientas de simulación (HSC) en el diseño de reactores químicos se remonta a una palabra: **Inmediatez**. En un escenario en donde no se manejen HSC en el diseño de reactores, el tiempo invertido en llegar a una solución será enorme y no permitirá explorar más soluciones del sistema al modificar determinados parámetros de entrada. Al tener pocas soluciones que analizar, el criterio para determinar la influencia de las variables en el resultado del proceso se torna cuestionable.

Las herramientas de simulación al manejarse de la manera correcta permiten llegar a resultados de casos de diseño de reactores de forma casi inmediata, abriendo la posibilidad de hacer análisis paramétricos, análisis de sensibilidad, comprensión amplia de la influencia de las variables en el proceso y llegar a conclusiones más coherentes con el fenómeno físico. Las HSC permiten además, cuestionar ciertas heurísticas creadas a partir de la experiencia industrial en el diseño de reactores. Permiten también generar nuevos criterios para decisiones finales en el diseño final de reactores (No solo eficiencia de reactores, ni maximización de selectividad o conversión, sino también la seguridad como un criterio de diseño).

En Reactools se trabajan cinco herramientas de simulación acopladas a los procesos de aprendizaje, estas se ilustran en la Recuadro 7. Cada una tiene facilidades particulares para el diseño de reactores, las principales también se muestran en el recuadro y se amplían en secciones posteriores





Usado para simular reactores isotérmicos, no isotérmicos, integrando intercambiadores de calor, funciones de optimización, modelos de caída de presión y permitiendo acoplar el reactor a procesos completos. Se destaca su base de datos con propiedades de sustancias químicas.

Aspen HYSYS by Aspentech^[47]



Usado en la regresión de funciones ya que ofrece una amplia variedad de ecuaciones que se ajustan a datos experimentales. Aplicado en la regresión de parámetros cinéticos de leyes de velocidad tanto homogéneas como heterogéneas y biocatalizadas.

TableCurve 2D^[48]



Visor universal. Permite el modelamiento y simulación de cualquier tipo de reactor (Incluidos modelos de reactores reales en varias dimensiones) si se inicia desde 0 con el modelo. La herramienta más útil para el entendimiento del modelo.

Microsoft Excel^[49]



Resolvedor de sistemas de ecuaciones algebraicas y diferenciales. Útil para el modelamiento en estado dinámico de reactores. Puede simularse cualquier tipo de reactor si se tiene conocimiento de su codificación.

Matlab & Simulink^[50]



Útil en el desarrollo de modelos de reactores reales con efectos de dispersión, fenómenos de transferencia de masa y cambios radiales de las variables. Integrable con bases de datos de sustancias químicas y facilita la importación de geometrías tridimensionales de reactores.

Comsol Multiphysics^[51]

Recuadro 7: Herramientas de simulación computacional implementadas en Reactools



3.3.2. Modelamiento y simulación de rectores químicos a través de Aspen HYSYS®

Aspen Plus® hace parte de la suite de AspenTech®, también conocida como Aspen Technology Inc. Es una compañía de software estadounidense que provee servicios para las industrias que manejan procesos. Fue fundada en 1981 a través del proyecto de investigación entre el Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT) y el departamento estadounidense de Energía: “An Advanced System for Process Engineering (ASPEN) Project”. Actualmente, el Software de AspenTech® cuenta con 7 módulos para Ingeniería Química [52]. Puntualmente, Reactools implementa la suite de Aspen HYSYS® V7.3 para el modelamiento, simulación y optimización de reactores químicos. Algunas de las funcionalidades destacadas y limitaciones de la suite se presentan en el recuadro 8. Los ejercicios desarrollados en Aspen HYSYS® se encuentran principalmente en el módulo 3 y módulo 4 de Reactools.

Funcionalidades destacadas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> ⊞ Amplia base de datos con propiedades físicas y termodinámicas de sustancias químicas. ⊞ Implementación de modelos de reactores PBR, PFR, CSTR, de conversión y modelo de Gibbs. ⊞ Posibilidad de realizar el análisis dinámico de sistemas reactivos. ⊞ Capacidad computacional suficiente para abordar problemas de optimización con varias variables. ⊞ Archivos exportables para análisis de integración de corrientes energéticas y análisis económicos. ⊞ Fácil integración del reactor con corrientes de procesos completos. ⊞ Facilidad para la realización de análisis de sensibilidad sobre variables ⊞ Interfaz amigable. 	<ul style="list-style-type: none"> ⊞ Limitados modelos para cinéticas heterogéneas o biocatalizadas ⊞ Imposibilidad de detallar el paso a paso en el cálculo de un modelo de reactor ⊞ Imposibilidad de incluir modelos de reactores reales y sus correspondientes fenómenos de mezclado y transporte ⊞ Dificultad a la hora de simular reactores STR en función del tiempo ⊞ Dificultad a la hora de trabajar con determinados tipos de sustancias químicas (Que se encuentren en paquetes termodinámicos diferentes, por ejemplo)

Recuadro 8: Funcionalidades y limitaciones de la suite Aspen HYSYS® V7.3. para el diseño de reactores químicos



3.3.3. Modelamiento y simulación de reactores químicos a través de Microsoft Excel®

Microsoft Excel® es una aplicación distribuida por Microsoft Office para hojas de cálculo utilizado en tareas financieras y contables.

Microsoft comercializó originalmente un programa para hojas de cálculo llamado Multiplan en 1982, que fue muy popular en los sistemas CP/M. Microsoft publicó la primera versión de Excel para Mac en 1985, y la primera versión de Windows (numeradas 2-05 en línea con el Mac y con un paquete de tiempo de ejecución de entorno de Windows) en noviembre de 1987. Microsoft impulsó su ventaja competitiva lanzando al mercado nuevas versiones de Excel, por lo general cada dos años. La versión actual para la plataforma Windows es Excel 15, también denominada Microsoft Office Excel 2013^[54].

Reactools implementa Microsoft Office Excel 2013® a lo largo de todos sus módulos, normalmente empleando las propiedades de las sustancias químicas de la literatura. Es ampliamente usado en Reactools porque permite visualizar muy fácilmente los modelos y el paso a paso del cálculo. Algunas de las funcionalidades destacadas y limitaciones de la suite se presentan en el recuadro 9.

Funcionalidades destacadas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">⊞ Posibilidad de programar cualquier caso de diseño de reactores debido a la versatilidad de las hojas de cálculo.⊞ Facilidad en la visualización y entendimiento del paso a paso de la resolución de un caso de diseño de reactores.⊞ Integrable con otras herramientas de simulación computacional⊞ Posibilidad de crear aplicaciones de cada caso de simulación	<ul style="list-style-type: none">⊞ Carencia de base de datos de propiedades de sustancias químicas.⊞ Cada caso de simulación debe empezarse desde 0 porque no hay plantillas establecidas (A menos que se creen)⊞ Interfaz entendible para el desarrollador y no para el usuario⊞ Dificultad a la hora de integrar el reactor a un proceso completo⊞ Capacidad limitada para problemas de optimización de varias variables⊞ Lenta resolución numérica de casos en donde se resuelvan sistemas de ecuaciones diferenciales.

Recuadro 9: Funcionalidades y limitaciones de la Microsoft Office Excel 2013® para el diseño de reactores químicos



3.3.4. Modelamiento y simulación de reactores químicos a través de Matlab®

Matlab® (abreviatura de *MATrix LABoratory*, "laboratorio de matrices") es una herramienta de software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows, Mac OS X y GNU/Linux .

Entre sus prestaciones básicas se hallan: la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, la implementación de algoritmos, la creación de interfaces de usuario (GUI) y la comunicación con programas en otros lenguajes y con otros dispositivos hardware. El paquete MATLAB dispone de dos herramientas adicionales que expanden sus prestaciones, a saber, Simulink (plataforma de simulación multidominio) y GUIDE (editor de interfaces de usuario - GUI). Además, se pueden ampliar las capacidades de MATLAB con las *cajas de herramientas (toolboxes)*; y las de Simulink® con los *paquetes de bloques (blocksets)*.^[55]

En Reactools se implementa Matlab® en el momento de resolver sistemas de ecuaciones aritméticas y diferenciales. Se usa Simulink® en el momento de resolver sistemas operando en estado dinámico. Algunas de las funcionalidades destacadas y limitaciones de la suite se presentan en el recuadro 10. Matlab® se implementa en el módulo 3 y 4 de Reactools:

Funcionalidades destacadas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">⊞ Posibilidad de programar cualquier caso de diseño de reactores debido a la versatilidad de los códigos manejados.⊞ Amplia capacidad para resolver problemas de optimización multivariable en diseño de reactores.⊞ Entorno didáctico para la simulación de modelos dinámicos de reactores (Simulink®).	<ul style="list-style-type: none">⊞ Carencia de base de datos de propiedades de sustancias químicas.⊞ Cada caso de simulación debe empezarse desde 0 porque no hay plantillas establecidas (A menos que se creen)⊞ Interfaz compleja para quienes no estén familiarizados con el código.⊞ Dificultad a la hora de integrar el reactor a un proceso completo.

Recuadro 10: Funcionalidades y limitaciones de la Matlab® para el diseño de reactores químicos



3.3.5. Simulación con Tablecurve 2D®

TableCurve 2D® incorpora miles de ecuaciones para permitir a científicos e ingenieros hallar el modelo ideal para sus datos, incluso para los conjuntos de datos más complejos, en cualquier aplicación. El programa ajusta los datos automáticamente y a gran velocidad

Tras completar el ajuste, TableCurve 2D® muestra una lista de las mejores ecuaciones de ajuste y la información necesaria para seleccionar la que mejor cumple los requerimientos de modelo ideal, permitiendo su edición así como la generación de informes, gráficos y transferencia de datos a las aplicaciones en Windows (incluyendo Excel).^[53]

En Reactools se implementa esta herramienta en uno de los pasos precios más importantes en el diseño de reactores químicos: La optimización de parámetros cinéticos en sus correspondientes leyes de velocidad. Algunas de las funcionalidades destacadas y limitaciones de la suite se presentan en el recuadro 11:

Funcionalidades destacadas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none">⊞ Posibilidad de hacer regresiones complejas de datos experimentales y ajustarlos a más de 1000 posibles curvas para la regresión de parámetros cinéticos en cualquier tipo de ley de velocidad.⊞ Portabilidad a distintas herramientas de simulación computacional	<ul style="list-style-type: none">⊞ Como tal no es una herramienta para la simulación de reactores, pero es esencial en el paso previo al diseño: La determinación de los parámetros de la cinética.

Recuadro 11: Funcionalidades y limitaciones de la TableCurve 2D® para el diseño de reactores químicos

3.3.6. Modelamiento y simulación de reactores químicos a través de Comsol Multiphysics®

Comsol Multiphysics® (antes conocido como FEMLAB) es un paquete de software de análisis y resolución por elementos finitos para varias aplicaciones físicas y de ingeniería, especialmente fenómenos acoplados, o multifísicos. Comsol Multiphysics® también ofrece una amplia y bien gestionada interfaz, sus toolboxes que proporcionan una amplia variedad de posibilidades de programación, preprocesado y postprocesado. Los paquetes son multiplataforma (Windows, Mac, Linux, Unix.) Además de las interfaces de usuario convencionales basadas en físicas, Comsol Multiphysics® también permite entrar sistemas acoplados de ecuaciones en derivadas parciales (EDP).



Comsol Multiphysics® fue iniciado con base en los códigos desarrollados por varios estudiantes licenciados del Germund Dahlquist para un curso de la licenciatura en el Universidad Tecnológica Real (KTH) en Estocolmo, Suecia.

En Reactools se implementa el módulo de “Ingeniería de reacciones químicas”, acoplado con el módulo de fluidos, fenómenos de transporte, modelos de mezclado, optimización y transferencia de calor. Comsol es implementado a lo largo de los 5 módulos de Reactools. Algunas de las funcionalidades destacadas y limitaciones de la suite se presentan en el recuadro 12:

Funcionalidades destacadas	Limitaciones
<ul style="list-style-type: none"> ⊞ Posibilidad de modelar, simular y optimizar todo tipo de reactor químico, incluyendo reactores reales. ⊞ Optimizador integrado de parámetros cinéticos ⊞ Posibilidad de integrar modelos tridimensionales, contemplando dispersiones axiales de las variables. ⊞ Integración de fenómenos físicos adicionales al modelamiento del reactor (Como transferencia de masa, transporte de fluidos, fenómenos de calor y de mezclado) 	<ul style="list-style-type: none"> ⊞ Imposibilidad de acoplar los modelos de reactores con procesos completos. ⊞ La base de datos tiene un número limitado de sustancias químicas y sus propiedades termodinámicas

Recuadro 12: Funcionalidades y limitaciones de la Comsol Multiphysics® para el diseño de reactores químicos

La fase de implementación de Reactools se realiza a través de un curso virtual de Comsol Multiphysics®, por lo que es la herramienta más usada durante todo el material.



4. METODOLOGÍA DE TRABAJO

A nivel general, la metodología implementada para todo el desarrollo del proyecto se divide en tres grandes etapas: Construcción del material didáctico, implementación de éste y evaluación del mismo. En esta sección se describe la metodología implementada en cada una de estas etapas. La figura 6 representa los procesos principales de la metodología del proyecto:

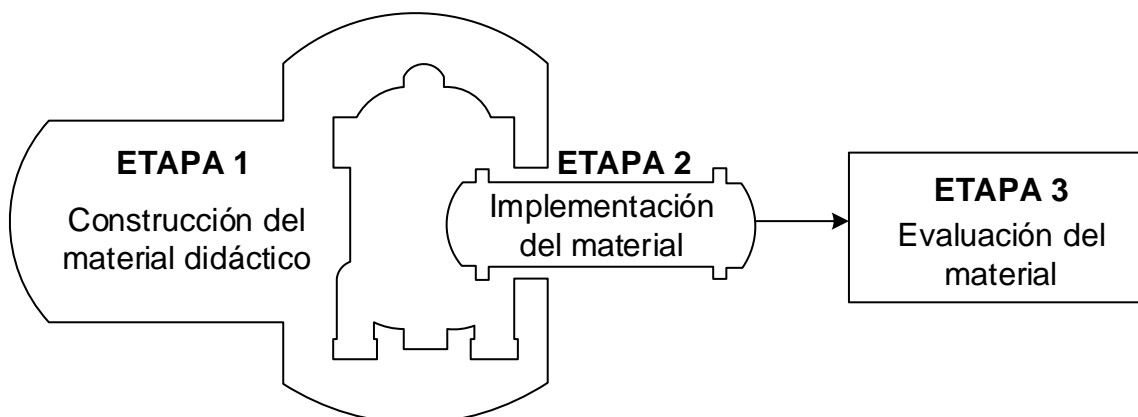


Figura 6: Representación de las tres etapas principales del Proyecto Reactools

4.1. Descripción de la metodología para el diseño y construcción del material didáctico

La primera etapa del proyecto es como tal la construcción del material didáctico, en donde resulta de vital importancia aclarar la metodología implementada para la selección de los ejercicios, ejes temáticos, herramientas de simulación y compilación del material didáctico. Cada uno de estos procesos se realiza a través de algoritmos de decisión que se presentan en las correspondientes secciones.

4.1.1. Metodología para la selección de los ejes temáticos del material didáctico

Los ejes temáticos de Reactools se basan en las necesidades locales de aprendizaje y en estándares internacionales concernientes al de Diseño de Reactores. Previamente, se mostraron a grandes rasgos cuáles son éstos ejes temáticos. La metodología de selección, síntesis y adaptación de los ejes temáticos se presenta de manera resumida en la figura 7.



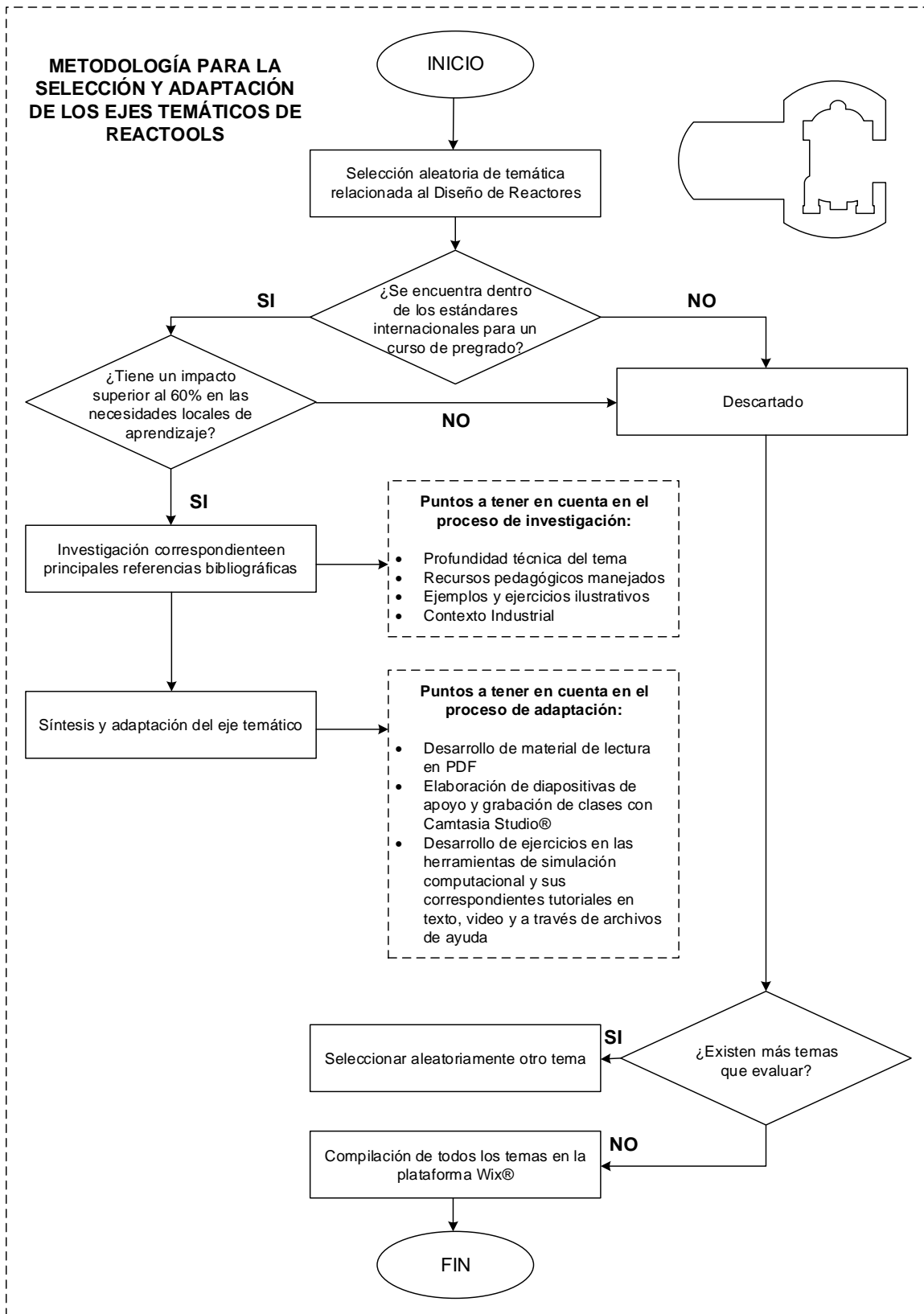


Figura 7: Selección, síntesis y adaptación de los ejes temáticos de Reactools



La selección comienza con un proceso aleatorio en donde se escoge una temática relativa al Diseño de Reactores, posteriormente se evalúa si hace parte de los estándares internacionales que se manejan para un curso de pregrado de ingeniería química. En caso de no estarlo, se descarta la temática y se selecciona otra aleatoriamente para iniciar de nuevo el proceso. En caso de que cumpla con los estándares internacionales, se procede a evaluar si tiene un impacto en más del 60% de las universidades que tienen el programa de ingeniería química y en la asignatura referente al diseño de reactores. En caso de no tener el impacto suficiente (Tema explicado en la sección 3.2.3), se descarta la temática y se procede a seleccionar otra y empezar desde el inicio. En caso de tener un impacto suficiente, se procede a la etapa de investigación a fondo de esta temática.

La etapa de investigación a fondo en primera instancia comprende una revisión en las fuentes de literatura presentadas en la sección 3.2.1. Durante esta revisión se analiza la profundidad técnica con la que cada fuente abarca el tema, así como los recursos pedagógicos que cada autor implemente, el contexto industrial que presenta y los ejemplos tanto como ejercicios ilustrativos que usan para explicar la temática. Una etapa posterior comprende como tal la síntesis y adaptación de los ejes temáticos.

Esta etapa de adaptación comprende varios procesos: En primera instancia se elaboran textos en PDF de los ejes temáticos distribuidos en 4 módulos (que se presentan en la figura 5). Posteriormente, se adaptan los textos a diapositivas y se graban las clases teóricas de cada uno de los temas a través de la herramienta Camtasia Studio®. Finalmente, cuando ya se encuentren terminados los textos, las presentaciones y los videos (Junto con los ejercicios, cuya metodología de selección y adaptación se detalla en la sección posterior) se compilan a través de programación HTML en la plataforma Wix® bajo el dominio:

www.nfrincons.wix.com/reactools

4.1.2. Metodología para la selección de los ejercicios ilustrativos del material didáctico

La selección y adaptación de los ejercicios desarrollados en las herramientas de simulación computacional es de vital importancia dentro de Reactools ya que como tal la innovación del material se encuentra en la implementación de las herramientas de simulación computacional. La figura 8 presenta el algoritmo para la selección y adaptación de los ejercicios manejados en cada módulo de Reactools.



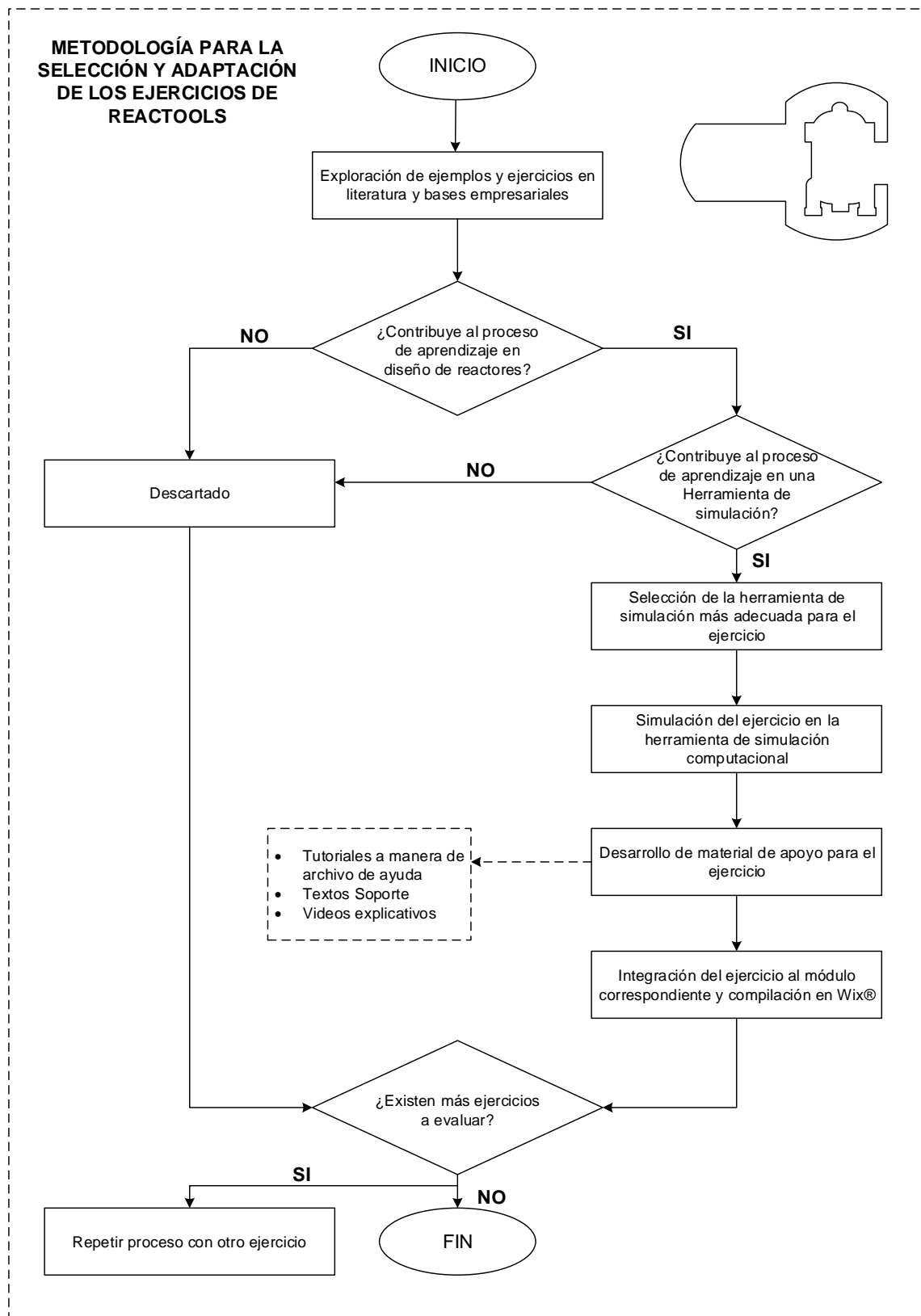


Figura 8: Algoritmo para la selección y adaptación de los ejercicios de Reactools



Inicialmente, se escoge un ejercicio ya sea de una referencia bibliográfica o de algún banco profesional de ejercicios, posteriormente se evalúa si el ejercicio aporta al proceso de aprendizaje de algún eje temático en particular. En caso de que el aporte al proceso no sea significativo, se descarta el ejercicio y se inicia el proceso de selección nuevamente.

En caso de que el ejercicio propuesto tenga un aporte significativo al eje temático en particular, se evalúa si brinda la oportunidad de explorar funcionalidades de alguna de las herramientas de simulación computacional; en caso de no hacerlo, se descarta el ejercicio.

Si el ejercicio cumple con los dos requisitos establecidos se procede a seleccionar la herramienta de simulación apta para el caso, seguido de la simulación correspondiente del ejercicio y del desarrollo del material complementario al ejercicio (Archivos de ayuda programados directamente en las herramientas de simulación computacional, textos de apoyo y videos explicativos a través de Camtasia Studio®). Este procedimiento se repite hasta tener la suficiente cantidad de ejercicios por módulo de tal manera que se expliquen los conceptos más relevantes y se introduzcan todas las funcionalidades de las herramientas de simulación computacional.

4.1.3. Metodología para la selección de las herramientas computacionales de modelamiento de reactores químicos

Reactools se enfoca en 5 herramientas de simulación computacional, el proceso de selección de estas herramientas de simulación es un paso clave dentro de la metodología del proyecto. La figura 9 presenta el algoritmo aplicado para la selección de dichas herramientas de simulación computacional.



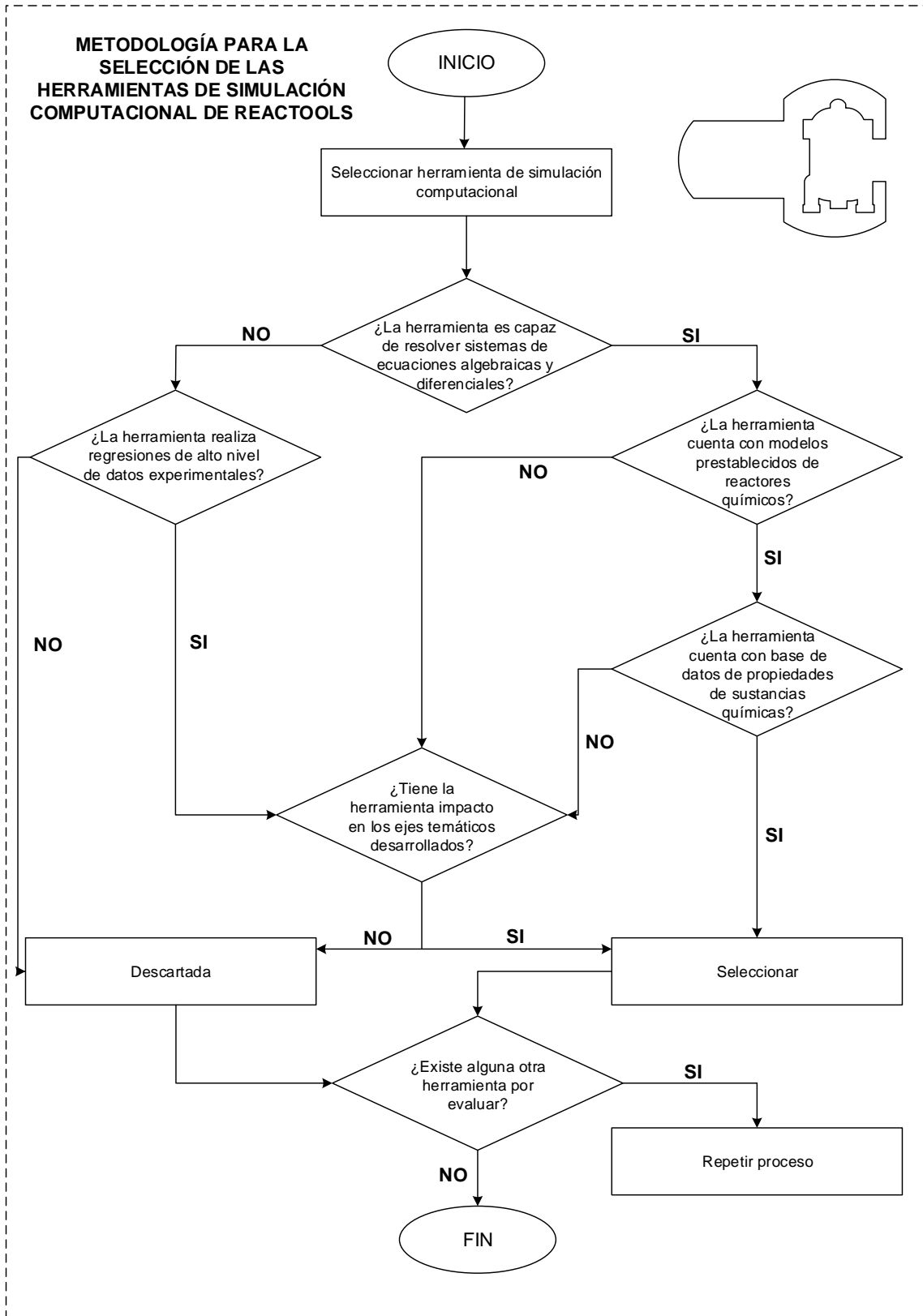


Figura 9: Algoritmo para la selección de las herramientas computacionales de Reactools



El algoritmo para la selección de las herramientas computacionales manejadas en Reactools evalúa 5 criterios antes de seleccionar o descartar un software: Aplicabilidad del software a las temáticas de diseño de reactores, presencia de base de datos de propiedades de sustancias químicas, presencia de modelos prestablecidos de reactores químicos, capacidad de solución de ecuaciones algebraicas y diferenciales y capacidad de análisis de datos experimentales. Una vez los programas se evalúan mediante el algoritmo, se procede a su selección y los resultados se presentaron en la sección 3.3.1.

4.1.4 Metodología para el ensamble del material didáctico en programación HTML vía Wix®

Wix® es una herramienta para la compilación de páginas web a través de programación simplificada en HTML. Una vez completados los ejercicios y los ejes temáticos con sus correspondiente material de apoyo, se cargan en la web organizados por ejes temáticos en la herramienta Wix®. El material que es posible encontrar en el dominio web corresponde a:

- ⌚ Descripción de cada módulo en interfaz amigable.
- ⌚ Archivos en PDF con el texto explicativo completo de cada uno de los módulos.
- ⌚ Carpetas comprimidas con los ejercicios de simulación, incluyendo plantillas de las simulaciones, videos tutoriales, archivos de texto soporte, archivos de ayuda programados directamente en las herramientas de simulación.
- ⌚ Videos cargados directamente en la Web con las clases de cada uno de los módulos.
- ⌚ Material especial del curso de implementación de Reactools “Comsol for Dummies”.

En la página también se encuentra información adicional del proyecto y las presentaciones nacionales e internacionales que ha tenido el proyecto, adicional al material didáctico. En este punto, se presenta en la figura 10 abiertamente el logo del proyecto Reactools.



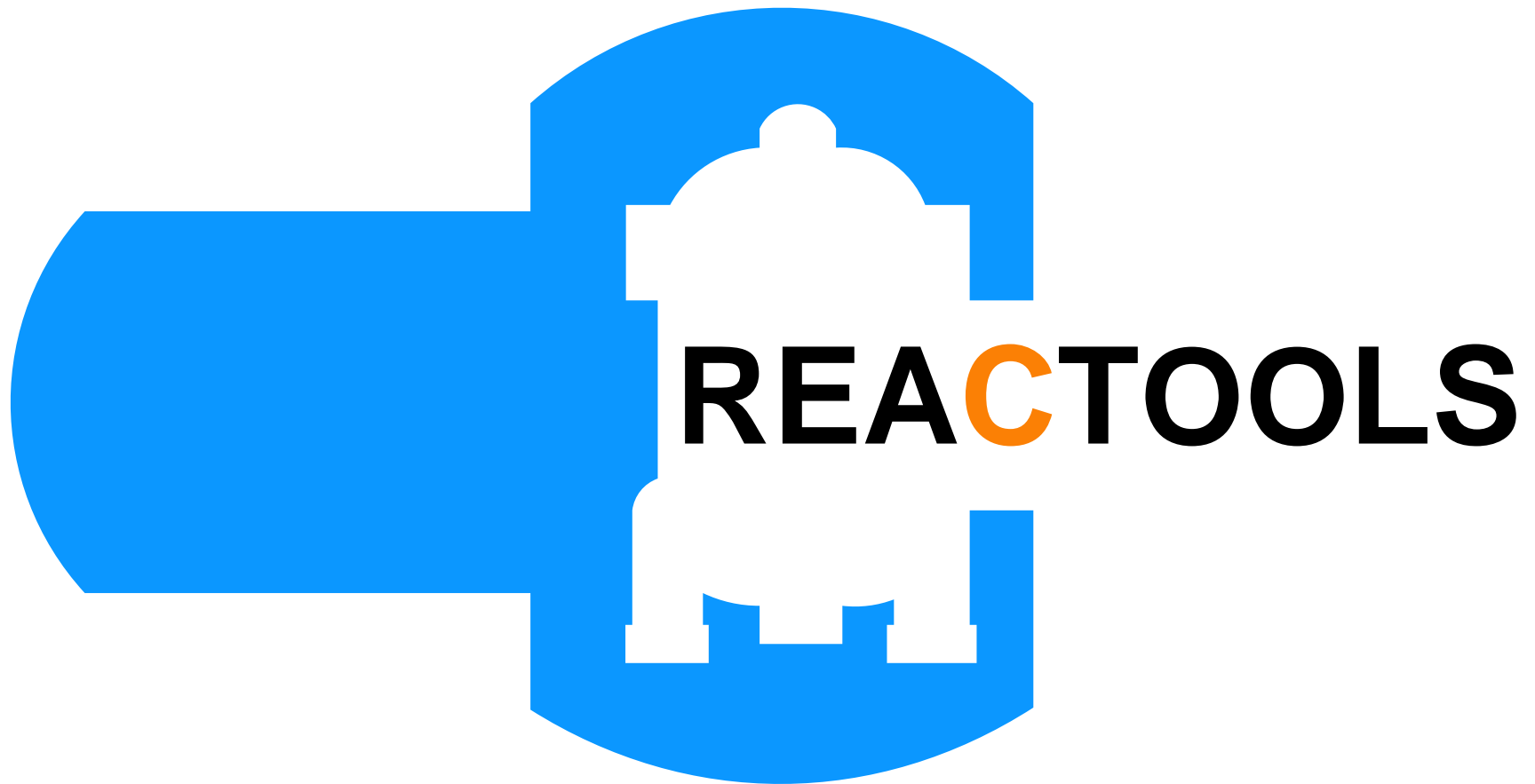


Figura 10: Logo del Proyecto Reactools



4.2. Metodología para la implementación del material didáctico

Una vez finalizado el material didáctico, se hace la implementación de Reactools a través del curso “Herramientas para la simulación y el modelamiento de reactores químicos en Comsol Multiphysics”, también conocido como “Comsol for Dummies”. El curso constó de 6 sesiones virtuales con más de 90 asistentes a lo largo de todo el territorio nacional.

La metodología para la fase de implementación se divide en dos procesos principales: Una convocatoria llevada a cabo durante la III Jornada Técnica de Ingeniería Química y Biológica, y el curso como tal realizado a través de la plataforma Anymeeting®. Las secciones posteriores describen la metodología desarrollada en cada una de las etapas.

4.2.1. Descripción de la metodología de la convocatoria realizada

El proyecto Reactools fue presentado para participar en la III Jornada Técnica de Ingeniería Química y Biológica “Procesa 2015”, con el objetivo principal de dar a conocer el proyecto y promocionar mediante una convocatoria el curso “Herramientas para la simulación y el modelamiento de reactores químicos en Comsol Multiphysics”, también conocido como “Comsol for Dummies”. Se realiza una pancarta (Que se visualiza en la sección de resultados) y se abren las inscripciones a través de un formulario virtual.

Una vez inscritas las personas, se les comparten los archivos de instalación de la versión 4.4. de Comsol Multiphysics® junto con la licencia de estudiante por 3 semanas de todos los módulos del simulador.

4.2.2. Descripción de la metodología de la herramienta Anymeeting®

Una vez inscritas las personas, se programan 6 sesiones a través de la herramienta Anymeeting®, en la sección de resultados se detalla el contenido de cada una de las sesiones. La herramienta permite realizar webinarios de hasta 200 asistentes, entre sus funcionalidades destacadas se encuentran:

- ⊞ Compartir en vivo diapositivas
- ⊞ Compartir en vivo la pantalla del escritorio del host
- ⊞ Realizar encuestas previas a entrar a la sesión virtual
- ⊞ Realizar quices durante las sesiones
- ⊞ Realizar formularios al final de las sesiones
- ⊞ Videoconferencias
- ⊞ Chat en vivo grupal y especializado
- ⊞ Grabación de las sesiones realizadas

Todas estas funcionalidades fueron implementadas durante el curso. La figura 11 muestra una captura de la interfaz básica del programa.





Figura 11: Captura de pantalla de aplicativo Anymeeting®

4.2.3. Descripción de la metodología de las sesiones prácticas

Las sesiones prácticas se diseñaron para realizarse en 1 h y 40 minutos cada una. Inician con la apertura de la sesión, en donde se espera a que los asistentes entren a la plataforma, seguido de 5 minutos para la contextualización o retoma de la sesión pasada, 50 minutos para la presentación teórica de los temas de la sesión a través de slides interactivas con la información de los módulos de Reactools, seguido de 10 minutos para la explicación y contextualización industrial del ejercicio a desarrollar durante la sesión, para continuar con 30 minutos de implementación del caso en Comsol Multiphysics®. El último paso corresponde a 5 minutos para asignación de un caso de simulación y dar cierre a la sesión.

Cabe aclarar que durante toda la sesión está abierto el chat interactivo en donde los asistentes pueden realizar sus preguntas del tema y se responden al instante, compartiéndolas con el resto de los asistentes. También, durante las sesiones se realizan seguimientos de atención o “Qüices” a través de las herramientas de Anymeeting®. Finalmente, si la sesión lo requiere se conduce a los asistentes a una encuesta final en donde evalúan si la sesión contribuyó a su desarrollo profesional o a sus conocimientos técnicos en el diseño de reactores.

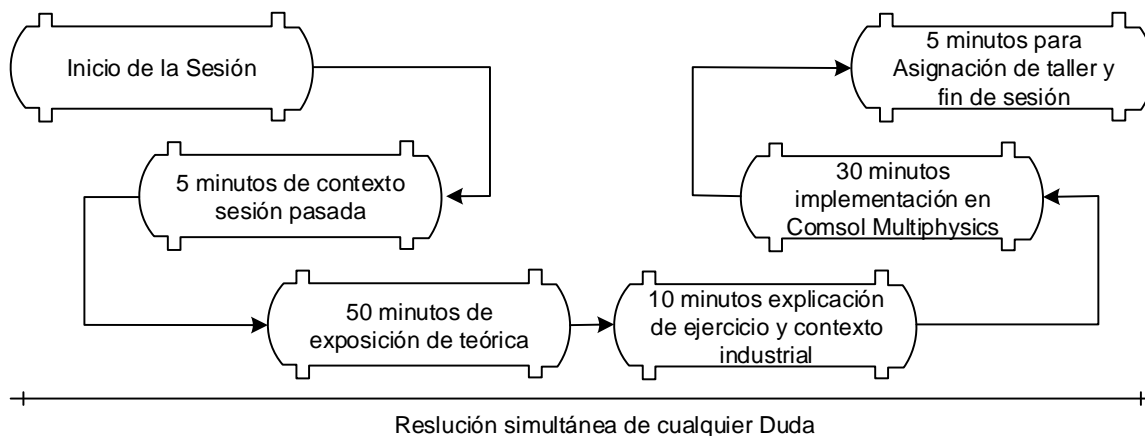


Figura 12: Metodología de las sesiones a través de Anymeeting®



4.3. Metodología para la evaluación del material didáctico

La evaluación de la fase de implementación del material didáctico la realizan directamente los participantes de las sesiones a través de una encuesta dividida en dos aspectos: apreciativo, en donde los participantes desde su perspectiva evalúan la manera en la que están diseñadas las sesiones; y conceptual, en donde los participantes evalúan el grado de aprendizaje tanto en Comsol Multiphysics® como en los temas de diseño de reactores. En sí, es una sola encuesta que los participantes llenan al cierre de la sesión número 6. Para la evaluación conceptual, se plantea adicionalmente realizar un “Concurso de simulación en Comsol Multiphysics®”, el cual permitirá visualizar si los estudiantes comprenden, analizan y aplican los conceptos aprendidos durante la fase de implementación de Reactools.

4.3.1. Diseño de la evaluación Apreciativa

La evaluación apreciativa como se mencionaba anteriormente, busca evaluar la manera en la que los participantes perciben la metodología de las sesiones prácticas, cuenta con 6 preguntas que se muestran a continuación. Se maneja una escala de 0 a 5, donde 0 significa que es un resultado deficiente y 5 un resultado excelente.

1. ¿Alguna vez había tomado un curso a través de Webinars?
2. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” tuvo una organización temática acertada?
3. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” tuvo una organización logística acertada?
4. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” es aplicable en su ejercicio profesional?
5. ¿Fue de su agrado la metodología manejada durante las sesiones?
6. Califique globalmente al curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”

En la sección de resultados se presenta el detalle de las respuestas para cada una de estas cuestiones.

4.3.2. Diseño de la evaluación Conceptual

La evaluación conceptual pretende evaluar los conceptos aprendidos por los participantes así como la aplicabilidad de estos en un entorno profesional. Se compone de 7 preguntas que se enlistan a continuación:

1. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” le aportó para su desarrollo profesional?
2. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” contribuyó al desarrollo de su pensamiento creativo en diseño de reactores?



3. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” contribuyó al desarrollo de su pensamiento crítico en diseño de reactores?
4. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” afianzó la comprensión de conceptos de diseño de reactores?
5. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” le motivó a usar la herramienta Comsol Multiphysics®?
6. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” cambió su perspectiva de las herramientas de simulación computacional?
7. ¿Considera que el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” brindó las herramientas necesarias para desarrollar simulaciones de reactores químicos a través de Comsol Multiphysics®?

En la sección de resultados se presenta el detalle de las respuestas para cada una de estas cuestiones. Como se mencionaba anteriormente, la evaluación conceptual viene acompañada del concurso de simulación, cuyos resultados se presentan en la sección 6.3. de este documento.



5. DESARROLLO DE LOS MÓDULOS DEL MATERIAL

A continuación se presentan los resultados de la fase de diseño y elaboración del material didáctico. Como se mencionaba anteriormente, Reactools está dividido en 4 Módulos temáticos, cada uno con distintos recursos de aprendizaje y manejo de diferentes herramientas de simulación computacional.

En este texto se presentan únicamente las generalidades de cada módulo en cuanto a los objetivos de aprendizaje de cada tema tratado y de cada ejercicio desarrollado en las herramientas de simulación computacional así como de todo el material de apoyo que se construye para cada uno. En caso de requerir información más detallada del material (Y verlo como tal), la recomendación es entrar al dominio web del proyecto y abrir los módulos interactivos que contienen todo el material desarrollado para cada módulo.

5.1. MÓDULO 1: Introducción a la ingeniería de las reacciones químicas

5.1.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo

El texto completo del módulo 1 puede visualizarse en la página de Reactools a través del siguiente enlace:

<http://nfrincons.wix.com/reactools#!modulo-1/c1rer>

Que mejor introducción al segundo módulo Reactools que la que se encuentra escrita en el texto guía del módulo:

“La base de todos los procesos químicos a nivel industrial corresponde al diseño de los dispositivos en donde ocurren las transformaciones químicas, que son comúnmente llamados reactores químicos. El estudio de la Ingeniería de las reacciones químicas combina conocimiento de la cinética química (Estudio de las velocidades de las reacciones químicas y los mecanismos de reacción) con el de los reactores químicos.

En el primer módulo, se introducirán los modelos clásicos de reactores químicos con su correspondiente balance molar, además de los conceptos básicos de cinética y variables comúnmente implementadas para el dimensionamiento de reactores. El objetivo principal de este módulo es que el estudiante adquiera la capacidad de realizar un dimensionamiento básico de un arreglo de reactores dadas los requerimientos de un proceso, ya sea con las ecuaciones de diseño en función de los flujos molares de las especies reaccionantes o de la conversión. Este material se enfoca en el manejo de las herramientas de simulación para desarrollar los modelos de reactores, por lo que el énfasis es consecuente con lo que es posible realizar en las herramientas computacionales. “

Texto introductorio, primer módulo de Reactools



Puntualmente, el recuadro 13 resume los ejes temáticos del primer módulo de Reactools y los correspondientes recursos pedagógicos con los que cuenta cada uno. Cabe resaltar que la herramienta de simulación computacional predominante en el módulo 1 es Microsoft Excel®, aunque se implementa TableCurve 2D® para una regresión de datos experimentales en el caso de diseño de un reactor intermitente y hay un ejercicio básico de diseño de PBR's a través de Comsol Multiphysics®.



Recuadro 13, Primera parte

Temática	Descripción	Herramientas de aprendizaje
<p>1. Balances Molares</p>	<p>El módulo 1 se divide en dos secciones, en la primera sección se realiza la deducción de los balances molares para cada uno de los modelos de reactor. A su vez, esta sección se divide en cuatro temáticas relevantes. En primera instancia se explican conceptos básicos de cinética química, seguido de la ecuación general del balance molar y finaliza con la aplicación de ésta a los 4 modelos de reactor empleados en Reactools.</p>	<p>Las herramientas de aprendizaje que se implementan a lo largo de este módulo corresponden a:</p> <p>Texto de apoyo de 33 páginas en PDF.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Algoritmos paso a paso para los casos de diseño de reactores ✓ Imágenes originales adaptadas ✓ Modelo de ecuaciones secuencial y explicación de cada modificación en expresiones ✓ Ejemplos de la industria para cada concepto que lo requiera <p>Presentación del módulo en PowerPoint®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Inclusión de imágenes originales adaptadas de cada modelo de reactor ✓ Diapositivas animadas para ilustrar el paso a paso en deducción de modelos <p>Grabación con Camtasia Studio®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 110 minutos de explicación detallada de los conceptos del módulo
<p>1.1. Velocidad de reacción</p>	<p>Se define el concepto de velocidad de reacción y su importancia a la hora de diseñar reactores químicos. Se enuncia la manera básica de escribir una ley de velocidad.</p>	
<p>1.2. Ecuación general del balance molar</p>	<p>Se escribe la poesía básica que se trabaja en todos los módulos de Reactools: “Lo que entra menos lo que sale más lo que se produce es igual a lo que se acumula”. Se lleva esta frase a una ecuación matemática.</p>	
<p>1.3. Balances molares para reactores intermitentes</p>	<p>Se aplica la ecuación general del balance molar al modelo de reactor intermitente, definiendo cada uno de los términos e introduciendo a los estudiantes a las suposiciones al trabajar con modelos de</p>	



Recuadro 13, Continuación I

	tanques perfectamente mezclados a operación intermitente.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Efectos de énfasis a lo largo del video
1.4. Balances molares para reactores de flujo continuo	Se aplica la ecuación general del balance molar a los modelos de flujo de reactores, PBR, PFR y CSTR. Se introducen las correspondientes suposiciones para cada modelo. Las ecuaciones de diseño resultantes de esta sección quedan en función de las concentraciones y/o flujos molares según sea el caso	<p>5 Ejercicios desarrollados en Microsoft Excel® de diseño de reactores</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Tutoriales explicativos a través de tutorial programados a través de VBA. ✓ Programación de macros en cada ejercicio para el efecto “Start over again” ✓ Inclusión de archivos no habilitados para macros y sus plantillas ✓ Programación en VBA para ingreso de parámetros de diseño con la correspondiente validación de datos
2. Conversión y Tamaño del reactor	La segunda parte del módulo 1 de Reactools se centra en reescribir los balances molares para cada modelo de reactor en términos de la conversión, incluyendo la posibilidad de dimensionar reactores a partir de la función de velocidad de reacción con respecto a la conversión.	<p>1 Ejercicio desarrollado en Comsol Multiphysics®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 41 minutos de grabación detallada del paso a paso de la simulación de un reactor de reducción de NO_x en Comsol Multiphysics® ✓ Documento PDF de 8 páginas con el paso a paso de la simulación ✓ Archivos de texto con los parámetros del proceso ✓ Archivos de simulación .mph
2.1. Conversión en ingeniería de las reacciones química	En primer instancia, se define la conversión de forma literal y en su forma matemática, indicando el contexto industrial en donde es implementada	
2.2. Conceptos básicos de diseño: Velocidad Espacial y Espacio-Tiempo	Antes de introducir la conversión a las ecuaciones de diseño de los modelos de reactores, se presentan parámetros altamente usados en la industria para el diseño de reactores, como lo son la Velocidad Espacial y el Espacio-Tiempo, su definición literal y en expresión matemática	



<p>2.3. Ecuaciones de diseño para reactores intermitentes</p>	<p>En esta sección se introduce la conversión en las ecuaciones de diseño de reactores intermitentes y se hace énfasis en el cálculo del tiempo que requiere el reactor para alcanzar la conversión establecida</p>	
<p>2.4. Ecuaciones de diseño para reactores de flujo continuo</p>	<p>En esta sección se estudia la implementación de la conversión como variable de diseño en el caso de reactores PFR, PBR y CSTR, haciendo énfasis en el cálculo del volumen necesario de cada reactor para alcanzar una conversión establecida</p>	
<p>2.5. Combinaciones de reactores en serie</p>	<p>El módulo 1 finaliza con un análisis cualitativo y cuantitativo de las posibles series de reactores. Esta sección busca responder a las siguientes preguntas: ¿Cuántos reactores debo usar?, ¿Qué tipo de reactores? y ¿En qué orden?</p>	

Recuadro 13: Síntesis de los temas tratados en el módulo 1 de Reactools



5.1.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales

Los ejercicios desarrollados en las herramientas de simulación computacional son claves en la propuesta de Reactools, por lo que en esta sección busca detallarse en qué consisten cada uno de los ejercicios del módulo 1 de Reactools, haciendo énfasis el aporte que da el ejercicio al manejo de la herramienta computacional y a los conceptos de diseño de reactores.

5.1.2.1. Nociones del volumen de los reactores químicos: Comparación del volumen de un CSTR y un PFR para la isomerización de 2-buteno (P1-6, H. Scott Fogler)^[57]

Este primer ejercicio se desarrolla en Microsoft Excel[®]. Tiene como objetivo introducir al estudiante en el dimensionamiento de reactores PBR y CSTR a través de un ejemplo industrial: La isomerización del 2-buteno. El dimensionamiento se realiza partiendo de las ecuaciones de diseño, combinándola con la ley de velocidad y despejando el volumen del reactor (Caso más simple). La figura 13 es una captura de pantalla de la interfaz de la hoja de cálculo en Excel donde se muestran los esquemas de reactores a dimensionar. Este ejercicio cuenta con un manual de instrucciones directamente programado sobre la hoja de cálculo través de VBA.

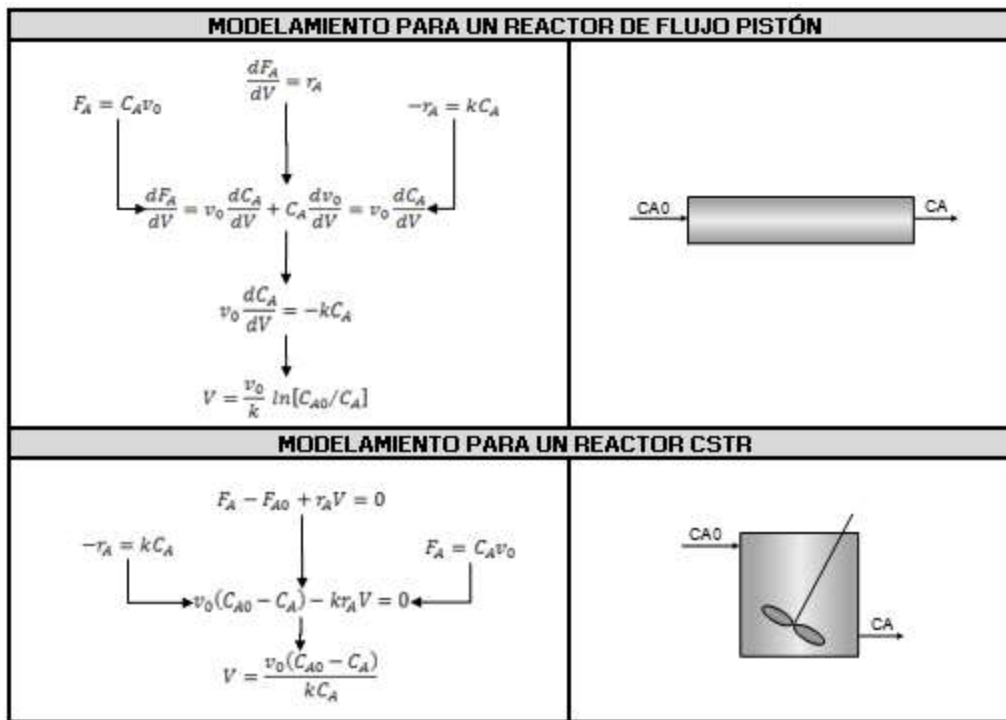


Figura 13: Esquemización del caso de diseño, problema 1-1 Reactools (Captura de pantalla)



A nivel de manejo de las herramientas de simulación computacional, este ejercicio ilustra al estudiante en el manejo de las operaciones básicas en Excel (suma, resta, multiplicación y división), lo familiariza con tablas de datos y le enseña a realizar gráficas a partir de estas. Todo trabajado desde la interfaz principal.

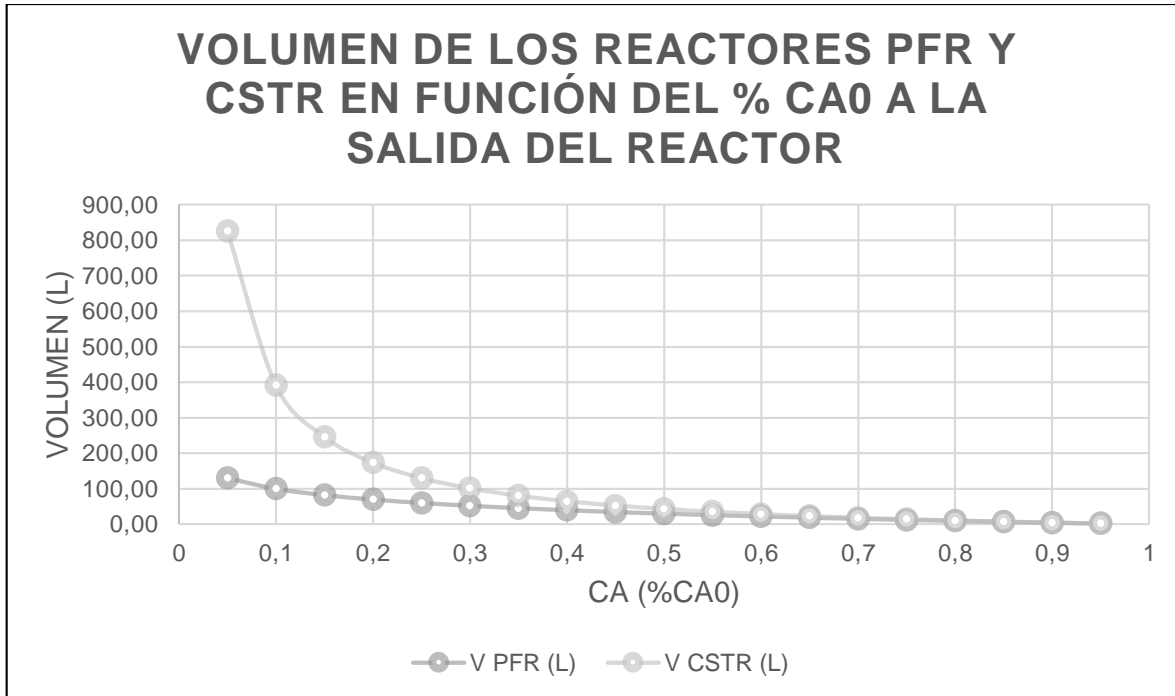


Figura 14: Resultados problema 1-1 Reactools (Captura de pantalla)

En última instancia, el ejercicio le muestra al estudiante la influencia que tiene establecer la concentración de la especie reaccionante a la salida del reactor con respecto al volumen de éste.

5.1.2.2. Dimensionamiento de reactores a partir de la conversión: Contraste entre modelos CSTR y PFR (P2-2, H. Scott Fogler)^[58]

El segundo ejercicio del primer módulo de Reactools se desarrolla en Microsoft Excel®. Tiene como objetivo de aprendizaje que el estudiante esté en la capacidad de dimensionar reactores PBR y CSTR usando la conversión como variable de diseño.). La figura 15 es una captura de pantalla de la interfaz de la hoja de cálculo en Excel donde se muestran los esquemas de reactores a dimensionar. Este ejercicio cuenta con un manual de instrucciones directamente programado sobre la hoja de cálculo través de VBA.



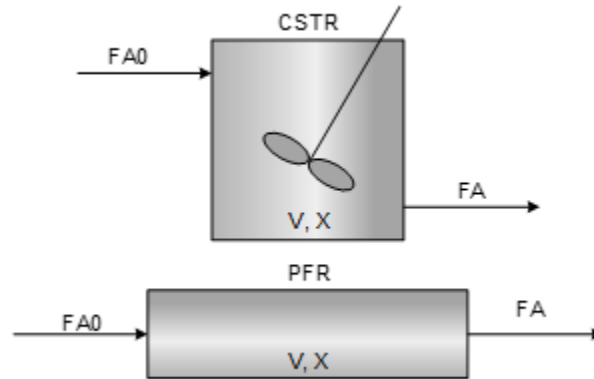


Figura 15: Esquematación reactores del problema 1-2 Reactools (Captura de pantalla)

A nivel de manejo de Microsoft Excel®, el ejercicio permite al estudiante la formulación de funciones objetivo a través de “Análisis de datos” para lograr resolver ecuaciones que se encuentren en forma implícita, además ilustra la manera de graficar varias curvas en una misma figura.

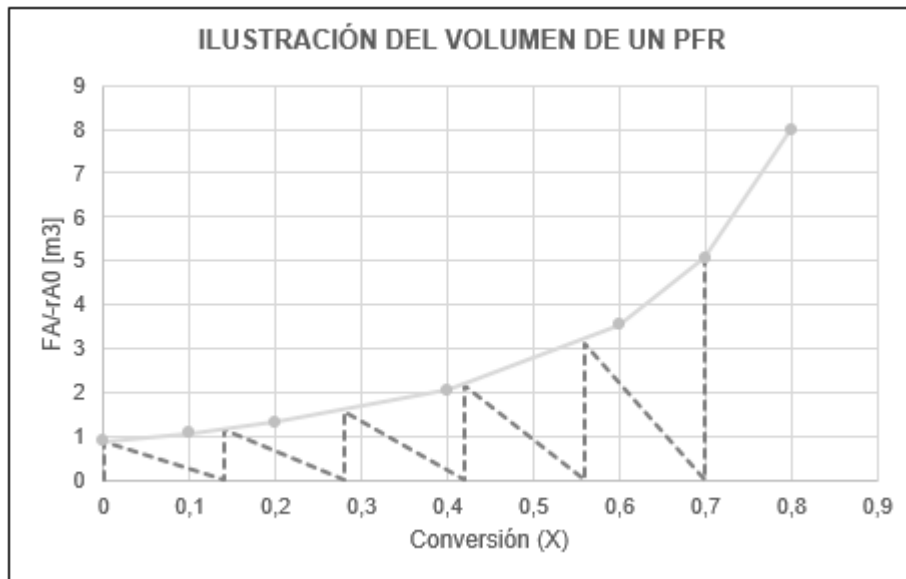


Figura 16: Resultados del problema 1-2 Reactools (Captura de pantalla)

En última instancia, el ejercicio le muestra al estudiante la influencia que tiene establecer la conversión a la salida del reactor con respecto al volumen de éste.



5.1.2.3. Nociones básicas del diseño de reactores por lotes: Determinación del volumen de un reactor por lotes para descomposición del éter dimetílico (Adaptación P3.63, Lanny D. Schmidt)^[59]

El ejercicio 1-3 de Reactools tiene como objetivo introducir al estudiante en el diseño de un reactor por lotes, determinando el tiempo necesario para alcanzar una determinada conversión. La figura 17 es una captura de pantalla de la interfaz de la hoja de cálculo en Excel donde se muestra el esquema de reactor a dimensionar. Este ejercicio cuenta con un manual de instrucciones directamente programado sobre la hoja de cálculo través de VBA y además integra a la herramienta TableCurve 2D[®].

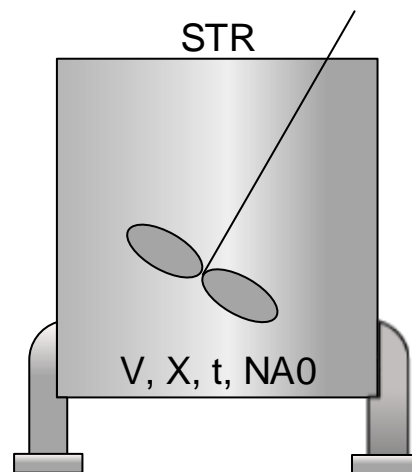


Figura 17: Esquemmatización reactores del problema 1-3 Reactools (Captura de pantalla)

En cuanto a herramientas de simulación computacional, este ejercicio enseña a hacer regresiones directamente con TableCurve 2D[®], haciendo el ajuste de expresiones a los datos experimentales, exportando los resultados de las regresiones e introduciendo al estudiante en el cálculo de derivadas puntuales en la tendencia de los datos experimentales. En Microsoft Excel[®] se enseña a usar las funciones de búsqueda en matrices.



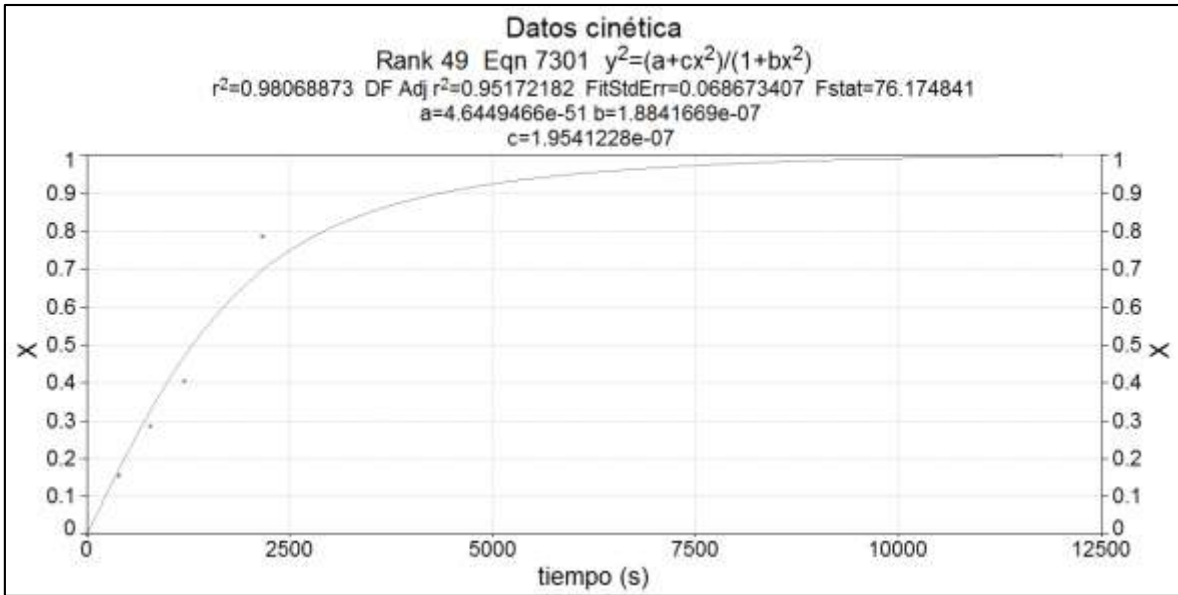


Figura 18: Resultados regresión del problema 1-3 Reactools (Captura de pantalla)

En última instancia, el ejercicio le muestra al estudiante la influencia que tiene establecer la conversión a la salida del reactor con respecto al tiempo de reacción de éste.

5.1.2.4. Análisis de configuración de sistemas de CSTR's en serie: Serie de dos reactores (Adaptación ejemplo 3-8, Lanny D. Schmidt)^[60]

El principal objetivo de este ejercicio es introducir al estudiante en el dimensionamiento de series de reactores CSTR's, y la importancia que tienen estos arreglos en la disminución global del volumen del sistema reactivo. En este ejercicio se trabajan dos reactores. La figura 19 es una captura de pantalla de la interfaz de la hoja de cálculo en Excel donde se muestra el esquema de los reactores a dimensionar. Este ejercicio cuenta con un manual de instrucciones directamente programado sobre la hoja de cálculo través de VBA.



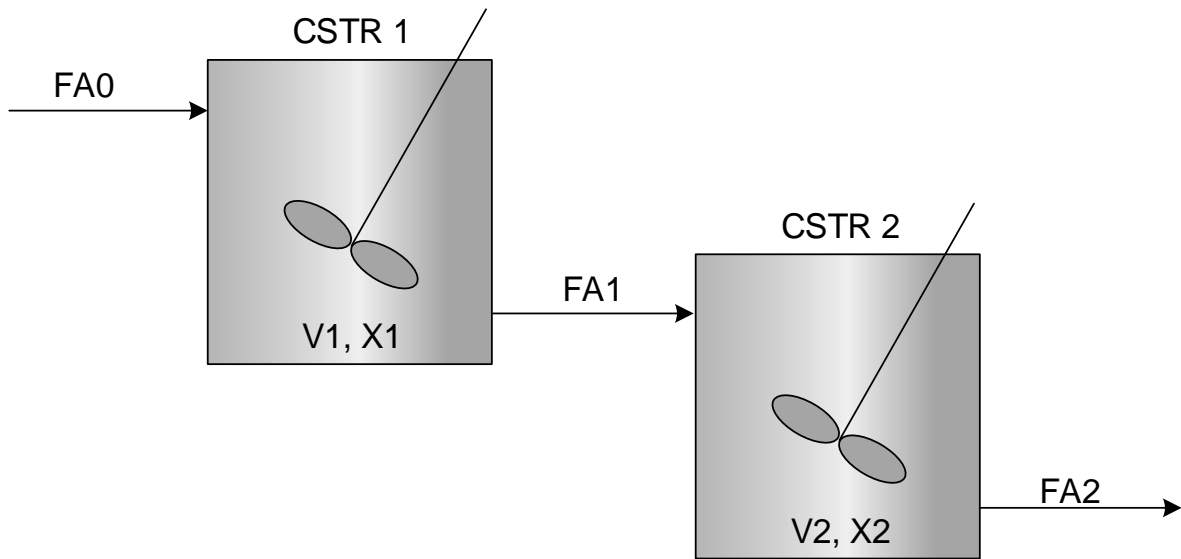


Figura 19: Esquematación reactores del problema 1-4 Reactools (Captura de pantalla)

A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio presenta la manera de plantear funciones objetivo a través de la herramienta “Solver” de Microsoft Excel®, además ilustra la manera en la que podrían resolverse sistemas de ecuaciones a través de esta herramienta.

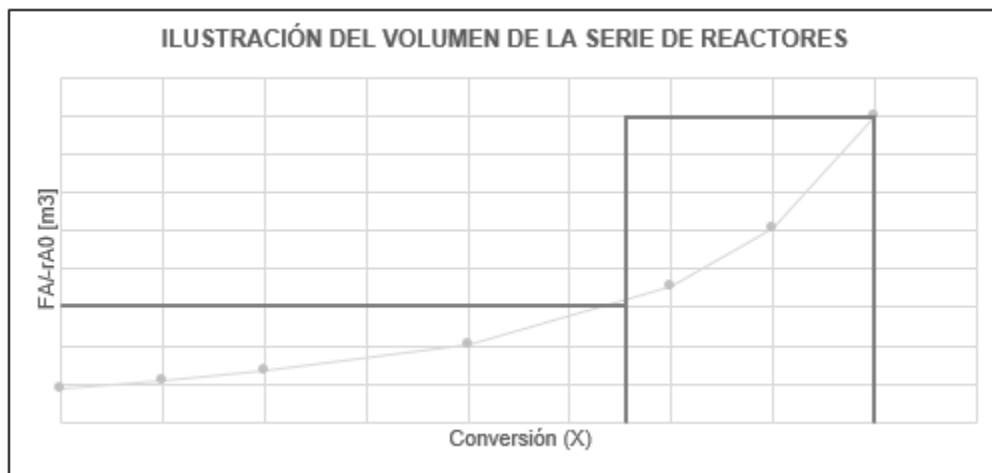


Figura 20: Resultados regresión del problema 1-4 Reactools (Captura de pantalla)

En última instancia, el ejercicio le muestra al estudiante la influencia que tiene formular arreglos de reactores para la disminución del volumen total del sistema reactivo.



5.1.2.5. Análisis de configuración de sistemas de CSTR's en serie: Serie de n reactores (P2-9, H. Scott Fogler)^[61]

El principal objetivo del ejercicio 1-5 de Reactools es generalizar las series de reactores a un número “n” de reactores, para que el estudiante esté en la capacidad de decidir el mejor arreglo de reactores al combinar modelos PFR y CSTR, e identifique las situaciones en las cuales implementar cada modelo según la cinética de la reacción. La figura 21 es una captura de pantalla de la interfaz de la hoja de cálculo en Excel donde se muestra el esquema de los reactores a dimensionar. Este ejercicio cuenta con un manual de instrucciones directamente programado sobre la hoja de cálculo través de VBA.

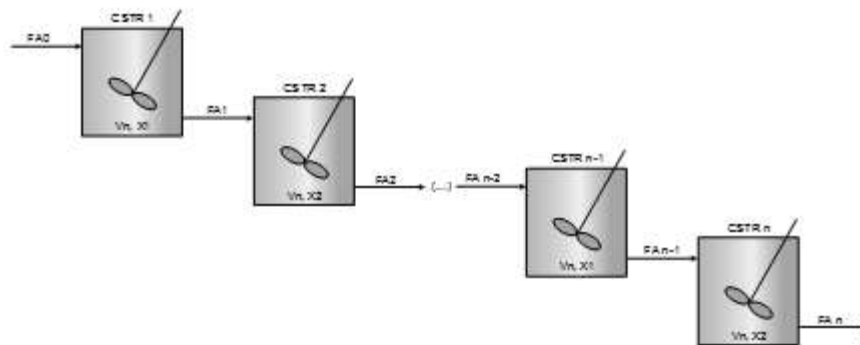


Figura 21: Esquematación reactores del problema 1-5 Reactools (Captura de pantalla)

En cuanto a herramientas de simulación computacional, este ejercicio presenta por primera vez la interfaz de VBA, para que el estudiante programe sus propios comandos y esté en la capacidad de hacer las correcciones del código.



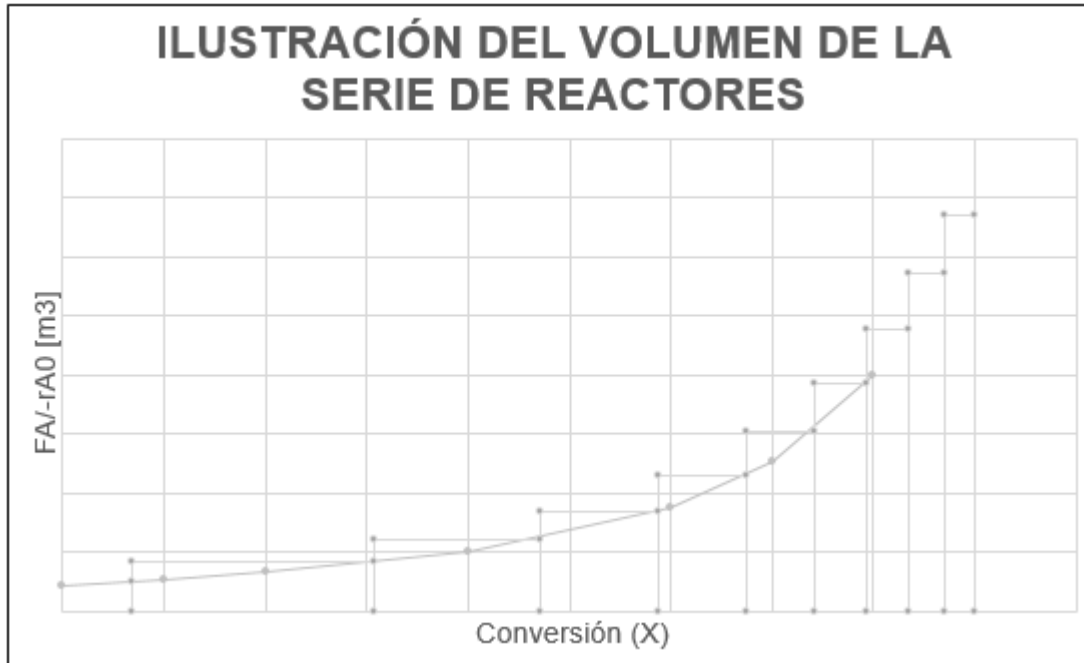


Figura 22: Resultados regresión del problema 1-5 Reactools (Captura de pantalla)

En última instancia, el ejercicio le presenta al estudiante de forma visual, las fracciones de conversión que son transformadas en cada reactor de la serie de n reactores.

5.1.2.6. Proceso de reducción de NO_x en Comsol Multiphysics®: Análisis paramétrico básico sobre sistemas reactivos (P 3-65, G. Schaub, D. Unruh,)^[62]

El ejercicio 1-6 de Reactools es el primero desarrollado en la herramienta Comsol Multiphysics. Este ejercicio pretende simular un reactor PBR para la reducción de NO_x producto de la combustión. Cuenta con un contexto industrial bastante amplio e induce al estudiante en el análisis paramétrico de reactores, ¿Qué pasa si alimento más amoníaco?, ¿Qué pasa si aumento el caudal?; permitiendo el desarrollo inicial del pensamiento crítico, al tener a mano la herramienta que facilita el cálculo. Este ejercicio cuenta con un video tutorial paso a paso de la simulación así como de un texto guía, material de diapositivas en la sección Sesión 2 de Comsol for Dummies, los archivos de la simulación y los parámetros del proceso en archivos de texto.



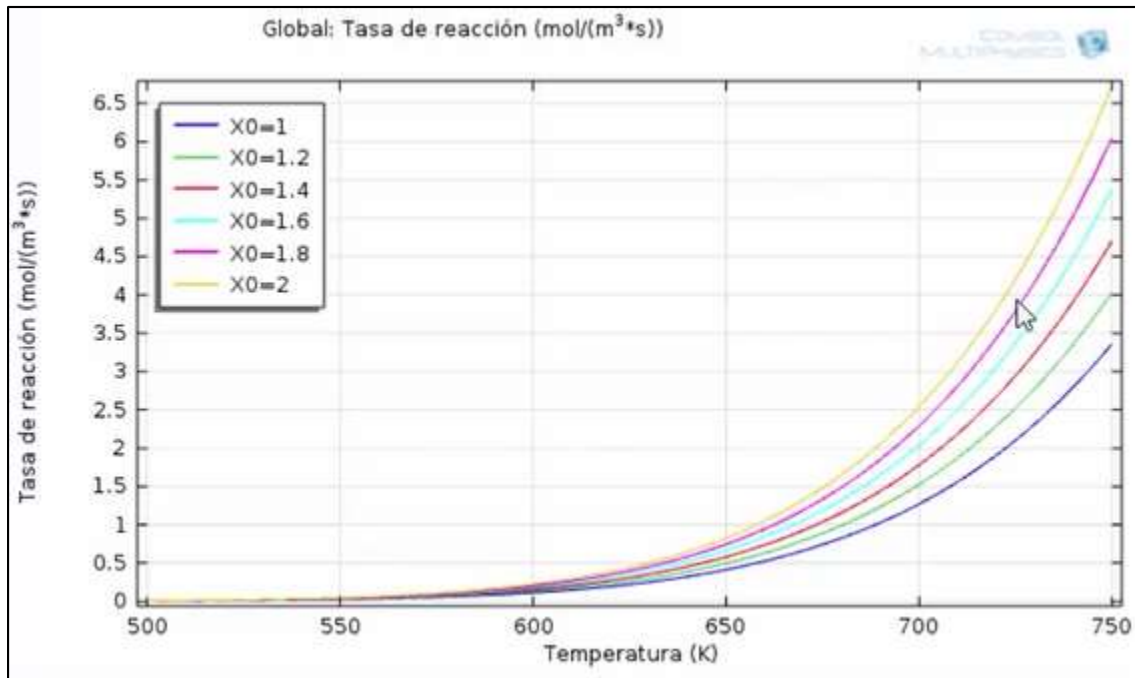


Figura 23: Resultados regresión del problema 1-6 Reactools (Captura de pantalla)

A nivel de herramientas de simulación computacional, el ejercicio introduce la interfaz de ingeniería de las reacciones químicas de Comsol Multiphysics®, así como el modelo de flujo pistó y los parámetros requeridos para llevar a cabo una simulación de este tipo.



5.2. MÓDULO 2: Conceptos básicos de cinética química

5.2.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo

El texto completo del módulo 2 puede visualizarse en la página de Reactools a través del siguiente enlace:

<http://nfrincons.wix.com/reactools#!modulo-2/cu8m>

Que mejor introducción al segundo módulo Reactools que la que se encuentra escrita en el texto guía del módulo:

“Antes de estudiar formalmente el diseño de reactores químicos, existe un campo que es necesario abordar: La cinética química. En general, al hablar de cinética química hacemos referencia a la forma en que se escriben las velocidades de reacción y todos los parámetros que la conforman.

El módulo se divide en dos partes, en la primera se presenta cómo escribir las leyes de velocidad para diversidad de reacciones químicas y se ilustra cómo expresar las concentraciones de las especies en función de la conversión (Tanto en sistemas continuos como intermitentes en fase gaseosa y en fase líquida) para poder aplicar las ecuaciones de diseño de cada modelo de reactor presentadas en el módulo 1.

La segunda parte del módulo se enfoca en la recolección y análisis de datos de velocidad, presentando los métodos tradicionales para la estimación de órdenes de reacción y en general los parámetros de la Ley de Velocidad. Se presentan dos técnicas para la obtención de datos cinéticos: medidas de concentración contra tiempo en un reactor intermitente y medidas de concentración en un reactor diferencial. Para el análisis de datos se presentan seis métodos: el método diferencial, el método integral, el método de las vidas medias, el método de las velocidades iniciales y el análisis de mínimos cuadrados”.

Texto introductorio, segundo módulo de Reactools

Puntualmente, el recuadro 14 resume los ejes temáticos del segundo módulo de Reactools y los correspondientes recursos pedagógicos con los que cuenta cada uno. Cabe resaltar que la herramienta de simulación computacional predominante en el módulo 2 es Microsoft Excel[®], de la mano de TableCurve 2D[®] para una regresión de datos experimentales, el módulo 2 también cuenta con un ejercicio de optimización de parámetros de leyes de velocidad a través de Comsol Multiphysics[®]



Recuadro 14, Primera parte

Temática	Descripción	Herramientas de aprendizaje
<p>1. Leyes de velocidad</p>	<p>La primera parte del segundo módulo de Reactools pretende presentarle al estudiante los conceptos básicos al momento de trabajar con cinéticas de reacciones. Los conceptos van desde los tipos de reactores hasta las formas comunes de escribir leyes de velocidad y un análisis detallado de los parámetros que las componen.</p>	<p>Las herramientas de aprendizaje que se implementan a lo largo de este módulo corresponden a:</p> <p>Texto de apoyo de 42 páginas en PDF.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Algoritmos paso a paso para método de análisis de datos ✓ Imágenes originales adaptadas ✓ Modelo de ecuaciones secuencial y explicación de cada modificación en expresiones ✓ Ejemplos de la industria para cada concepto que lo requiera <p>Presentación del módulo en PowerPoint®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Inclusión de imágenes originales adaptadas ✓ Diapositivas animadas para ilustrar el paso a paso en deducción de modelos <p>Grabación con Camtasia Studio®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 3 sesiones de 40 minutos de explicación detallada de los conceptos del módulo
<p>1.1 Definiciones básicas</p>	<p>Las definiciones básicas inducen al estudiante en: tipos de reacciones químicas según su fase y dirección, conceptos de molecularidad y velocidad de reacción relativa a una especie. Todos estos conceptos resultan de vital importancia en el desarrollo del módulo.</p>	
<p>1.2. Orden de reacción y ley de velocidad</p>	<p>Esta sección presenta la manera cómo se escriben matemáticamente las leyes de velocidad de acuerdo a la naturaleza de la reacción: Sean elementales, heterogéneas, homogéneas, reversibles, irreversibles y biocatalizadas. Introduce a los modelos de leyes de potencias y a las plantillas convencionales para escribir una ley de velocidad según sea el caso</p>	
<p>1.3. Constante de velocidad de reacción</p>	<p>Esta sección se dedica exclusivamente a describir en detalle la velocidad específica de reacción y su comportamiento con la</p>	



Recuadro 14, Continuación I

	temperatura, así como todos los parámetros que componen la expresión de Arrhenius que la conforma	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Efectos de énfasis a lo largo de los video
2. Estequiometria	La segunda sección del módulo 2 de Reactools busca presentar la manera cómo se aplican las relaciones de fase para expresar flujos molares en términos de concentración o conversión para sistemas de flujo y sistemas intermitentes, adicionalmente, explica cómo escribir las concentraciones de todas las especies reaccionantes en términos de una base de cálculo	<p>1 Ejercicio desarrollado en Microsoft Excel® de diseño de reactores con inclusión de TableCurve2D®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Programación de macros en cada ejercicio para el efecto "Start over again" ✓ Inclusión de archivos no habilitados para macros y sus plantillas ✓ Programación en VBA para ingreso de parámetros de diseño con la correspondiente validación de datos ✓ Video explicativo del ejercicio <p>1 Ejercicio desarrollado en Comsol Multiphysics®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 20 minutos de grabación detallada del paso a paso de la simulación en Comsol Multiphysics® ✓ Documento PDF de 6 páginas con el paso a paso de la simulación ✓ Archivos de Excel con datos experimentales de análisis ✓ Archivos de simulación .mph
2.1. Sistemas Intermitentes	Para el caso de los sistemas intermitentes, esta sección explica cómo expresar el número de moles de una especie al finalizar la reacción en términos del número de moles de una especie y de la conversión de la reacción.	
2.2. Sistemas de flujo	Para el caso de los sistemas de flujo, esta sección explica cómo expresar el flujo molar o concentración de una especie al finalizar la reacción en términos de una especie y de la conversión de la reacción.	
3. Recolección y análisis de datos de velocidad	La última sección del módulo 2 se enfoca en la obtención de los parámetros de las leyes de velocidad a través de métodos de análisis y recolección de datos	



	experimentales, en conjunto con métodos de optimización computacional	
3.1. Algoritmo de análisis de datos	El algoritmo de análisis de datos describe el paso a paso en la determinación de los parámetros cinéticos de una ley de velocidad, indicando en qué partes del proceso se debe usar un método u otro.	
3.2. Datos de Reactor Intermitente	En esta sección se presentan los métodos diferencia e integral de análisis de datos experimentales, haciendo énfasis en los métodos que existen para encontrar los valores puntuales de la derivada de la función de los datos experimentales en función del tiempo. Se presenta también el método de minimización del error para la optimización de parámetros cinéticos.	
3.3. Método de las velocidades iniciales	En esta sección se explica el método de velocidades iniciales, implementado cuando se trabajan reacciones reversibles. Consiste en una serie de experimentos realizados a una concentración inicial distinta de la especie reaccionante. El análisis se hace en el tiempo 0 a través de extrapolación.	
3.4. Método de las vidas medias	Este método se basa en el análisis de datos una vez e alcanza la mitad de la concentración inicial para muchos valores iniciales de esta. El principal objetivo es que el estudiante se encuentre en la capacidad de decidir cuál de los métodos resulta más conveniente.	



3.5. Reactores diferenciales	La última sección del módulo 2 busca presentar e manejo matemático que se le da a los reactores diferenciales para la determinación de parámetros cinéticos. En última instancia, se plantea cómo expresar la velocidad de reacción en el pequeño lecho catalítico en función exclusivamente de la concentración inicial del reactivo.	
-------------------------------------	--	--

Recuadro 14: Síntesis de los temas tratados en el módulo 2 de Reactools




5.2.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales

Los ejercicios desarrollados en las herramientas de simulación computacional son claves en la propuesta de Reactools, por lo que en esta sección busca detallarse en qué consisten cada uno de los ejercicios del módulo 2 de Reactools, haciendo énfasis el aporte que da el ejercicio al manejo de la herramienta computacional y a los conceptos de diseño de reactores.

5.2.2.1. Implementación de los métodos Diferencial e Integral de análisis de datos experimentales: Descomposición fotoquímica del bromo acuoso (P5-9B, H. Scott Fogler)^[63]

El ejercicio 2-1 de Reactools busca ilustrar a manera de aplicar el método diferencial e integral de análisis de datos experimentales. Permite sobre una misma hoja de cálculo hacer la verificación de cada uno de los métodos y contrastar los resultados entre cada uno de ellos. Explica el paso a paso de la implementación de cada método e incluso presenta los resultados equívocos para las suposiciones que se realizan durante el método integral. La figura 24 es una captura de pantalla de la interfaz de la hoja de cálculo en Excel donde se muestran los resultados una vez aplicados los métodos. Este ejercicio cuenta con un video tutorial que explica la interfaz a usar.



RESULTADOS MÉTODO INTEGRAL		
Orden de reacción	α	1
Velocidad específica (s^{-1})	k	0,0230

RESULTADOS MÉTODO DIFERENCIAL		
Orden de reacción	α	1
Velocidad específica (s^{-1})	k	0,0305

Figura 24: Resultados regresión del problema 2-1 Reactools (Captura de pantalla)



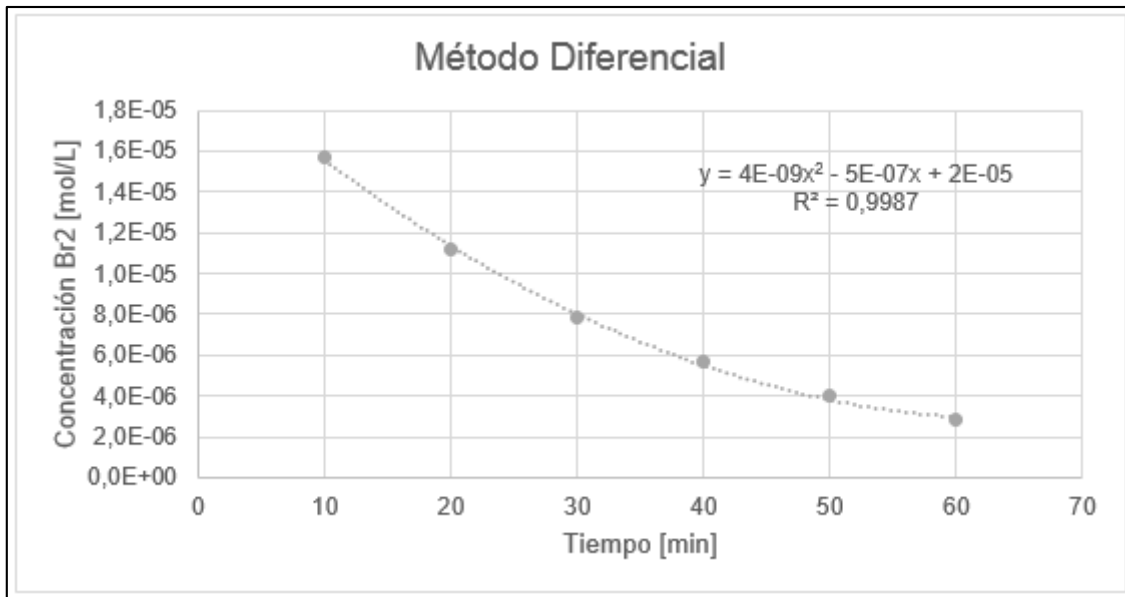


Figura 25: Resultados del problema 2-1 Reactools, método diferencial (Captura de pantalla)

A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio permite evidenciar la manera de calcular derivadas punto a punto experimental a través de regresiones realizadas en Microsoft Excel®. Muestra la manera en la que se plantean problemas de optimización a través de la herramienta solver cuando se tiene más de un parámetro a variar.

5.2.2.2. Estimación de los parámetros cinéticos con optimización en Comsol Multiphysics®: Producción de cloruro de benceno. (E 3-1, H. Scott Fogler)

El ejercicio 2-2 de Reactools se realiza a través de Comsol Multiphysics® y su principal objetivo es presentar el método de minimización del error para la optimización de parámetros cinéticos. Este ejercicio maneja un amplio contexto industrial con respecto a la producción de cloruro de benceno. El ejercicio no se enfoca únicamente en determinar la constante de velocidad específica de reacción, sino que pretende determinar el valor tanto del factor pre-exponencial como de la energía de activación, por lo que se manejan datos experimentales a distintas temperaturas iniciales. La figura 26 es una captura de pantalla de la interfaz de la hoja de Comsol Multiphysics® en donde se esquematiza la ecuación obtenida luego de la optimización de parámetros cinéticos y se contrasta con los datos experimentales.



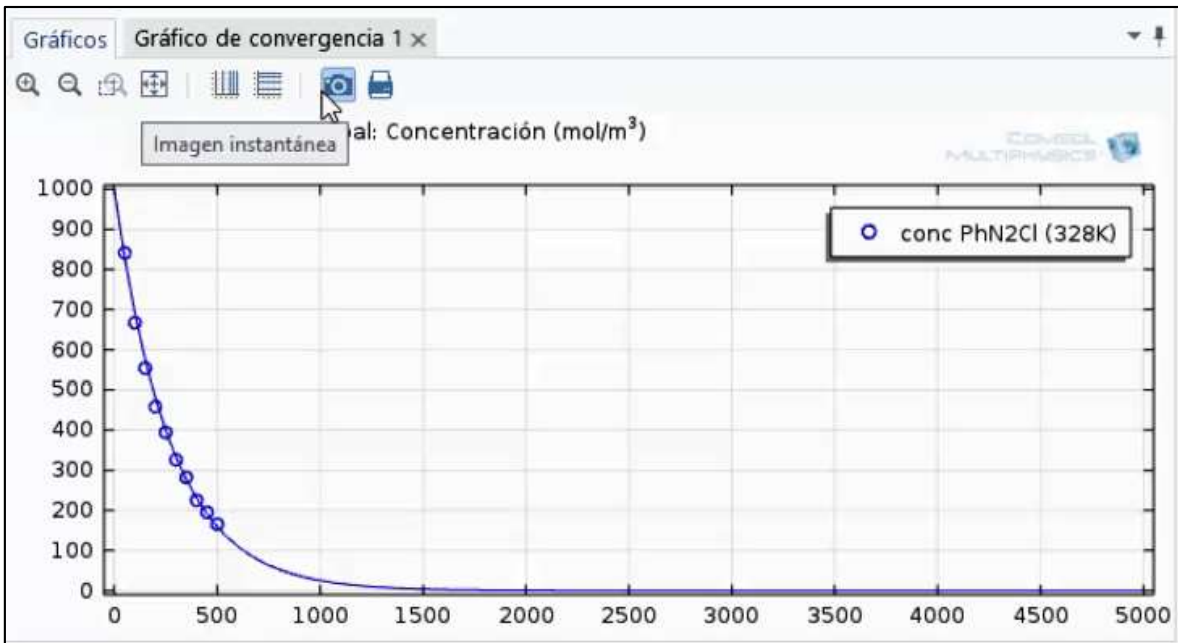


Figura 26: Resultados del problema 2-2 Reactools, optimizador de Comsol Multiphysics® (Captura de pantalla)

A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio muestra los mecanismos de importación de datos experimentales a Comsol, así como las plantillas que hay que usar. Muestra también el manejo de la interfaz de Ingeniería de las Reacciones químicas con la función de optimización.



5.3. MÓDULO 3: Diseño de reactores ideales isotérmicos

5.3.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo

El texto completo del módulo 3 puede visualizarse en la página de Reactools a través del siguiente enlace:

<http://nfrincons.wix.com/reactools#!modulo-3/c1oam>

Que mejor introducción al tercer módulo Reactools que la que se encuentra escrita en el texto guía del módulo:

“El diseño de reactores químicos es lo suficientemente complejo como para enseñarlo con todas sus posibles variables desde el principio. En este módulo, se estudia el diseño de reactores isotérmicos (Excluyendo cambios en la temperatura del sistema reactivo o algún tipo de intercambio de calor con el medio o fluido térmico). En general, al diseñar un reactor isotérmico se busca dimensionarlo y analizar los perfiles de concentración, flujos molares, presión o conversión a lo largo del reactor. Este módulo brinda todas las herramientas para el modelamiento de este tipo de reactores de acuerdo al tipo de reactor y su correspondiente operación.

En la primera sección, se estudian las expresiones de diseño en términos de la conversión para los modelos de reactores presentados en el módulo 1. En la segunda sección, se desarrollan las expresiones en términos de las concentraciones y flujos molares de las especies involucradas en la reacción así como casos en donde el tiempo es una variable determinante para el diseño (Como el arranque e reactores, la destilación reactiva o la operación de reactores intermitentes). En la última parte de este módulo, se discuten las ecuaciones de diseño cuando se consideran múltiples reacciones en el sistema, así como estrategias para minimizar reacciones no deseadas”.

Texto introductorio, tercer módulo de Reactools

Puntualmente, el recuadro 15 resume los ejes temáticos del tercer módulo de Reactools y los correspondientes recursos pedagógicos con los que cuenta cada uno. Cabe resaltar que la herramienta de simulación computacional predominante en el módulo 3 es Microsoft Excel[®], de la mano de Aspen HYSYS[®] para una simulación de reactores con propiedades termodinámicas de su base de datos. El módulo 3 también cuenta con ejercicios de simulación de reactores donde ocurren múltiples reacciones a través de Comsol Multiphysics[®], y la introducción a Matlab[®] y el diseño de reactores tubulares en esta herramienta.



Recuadro 15, Primera parte

Temática	Descripción	Herramientas de aprendizaje
<p>1. Balances molares en términos de la conversión</p>	<p>El principal objetivo de la primera sección de este módulo es aplicar los balances molares para cada modelo de reactor en función de la conversión. La diferencia con el módulo 1, es que aquí se introducen dentro de los balances de materia las relaciones estequiométricas presentadas en el módulo 2, acercando al estudiante a casos de diseño más reales.</p>	<p>Las herramientas de aprendizaje que se implementan a lo largo de este módulo corresponden a:</p> <p>Texto de apoyo de 66 páginas en PDF.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Algoritmos paso a paso para método de análisis de datos ✓ Imágenes originales adaptadas ✓ Modelo de ecuaciones secuencial y explicación de cada modificación en expresiones ✓ Ejemplos de la industria para cada concepto que lo requiera <p>Presentación del módulo en PowerPoint®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Inclusión de imágenes originales adaptadas ✓ Diapositivas animadas para ilustrar el paso a paso en deducción de modelos <p>Grabación con Camtasia Studio®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 3 sesiones de 60 minutos de explicación detallada de los conceptos del módulo
<p>1.1. Estructura de diseño para reactores isotérmicos</p>	<p>En esta sección se presenta el algoritmo general para el diseño de reactores isotérmicos, incluyendo el paso a paso que debe seguirse y lo más importante: en qué manera se combinan las relaciones estequiométricas, los balances molares y las leyes de velocidad según sea la fase de la reacción y el modelo de reactor implementado.</p>	
<p>1.2. Diseño de un reactor intermitente</p>	<p>En esta sección se realiza la combinación de las relaciones estequiométricas, leyes de velocidad y balances molares en los modelos intermitentes de reactores, para llegar a las expresiones de diseño finales para reactores isotérmicos.</p>	
<p>1.3. Diseño de un CSTR</p>	<p>En esta sección se realiza la combinación de las relaciones estequiométricas, leyes de velocidad y balances molares en los modelos CSRT, para llegar a las</p>	



Recuadro 15, Continuación I

	expresiones de diseño finales para reactores isotérmicos.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Efectos de énfasis a lo largo de los video <p>4 Ejercicios desarrollados en Microsoft Excel® de diseño de reactores</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Programación de macros en cada ejercicio para el efecto “Start over again” ✓ Inclusión de archivos no habilitados para macros y sus plantillas ✓ Textos de apoyo que incluyen descripción del proceso, presentación de parámetros de la simulación y análisis de resultados ✓ Video explicativo del ejercicio 3-1
1.4. Diseño de un PFR	En esta sección se realiza la combinación de las relaciones estequiométricas, leyes de velocidad y balances molares en los modelos PFR, para llegar a las expresiones de diseño finales para reactores isotérmicos.	
1.5. Caída de presión en reactores	A lo largo de esta sección se trabajan conceptos de mecánica de fluidos para determinar expresiones que involucren la caída de presión en reactores empacados. En última instancia, se presenta el modelo de Ergun para el cálculo de la caída de presión a lo largo del lecho reactivo.	
2. Balances molares en términos de la concentración y los flujos molares	El principal objetivo de la segunda sección de este módulo es aplicar los balances molares para cada modelo de reactor en función de la concentración y los flujos molares. La diferencia con el módulo 1, es que aquí se introducen dentro de los balances de materia las relaciones estequiométricas presentadas en el módulo 2, acercando al estudiante a casos de diseño más reales. Esta sección es de vital importancia para el estudio posterior de sistemas en donde ocurren múltiples reacciones	<p>1 Ejercicio desarrollado en Comsol Multiphysics®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 30 minutos de grabación detallada del paso a paso de la simulación en Comsol Multiphysics® ✓ Documento PDF de 5 páginas con el paso a paso de la simulación ✓ Archivos de simulación .mph <p>1 Ejercicio desarrollado en Matlab®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Archivos de simulación .mat



Recuadro 15, Continuación II

<p>2.1. Balances de moles para CSRT, PFR, PBR y reactores intermitentes</p>	<p>En esta sección se realiza la combinación de las relaciones estequiométricas, leyes de velocidad y balances molares en los modelos PFR, PBR, CSTR y STR, para llegar a las expresiones de diseño finales para reactores isotérmicos en términos de la concentración y los flujos molares</p>	<p>✓ Documento PDF de 5 páginas con el paso a paso de la simulación y el código implementado</p>
<p>2.2. Reactores de membranas</p>	<p>En esta sección se estudian los fundamentos de los reactores de membranas y se aplican las expresiones de balance para cada tipo de reactor de membranas</p>	
<p>2.3. Operación en estado no estacionario para reactores con agitación</p>	<p>Se presenta el balance molar para casos de operación en estado no estacionario (Donde existe acumulación/pérdida de materia en el reactor), como es el caso de un reactor semicontinuo y el caso de la destilación reactiva.</p>	
<p>3. Reacciones Múltiples</p>	<p>La tercera parte, se enfoca exclusivamente en el tratamiento de sistemas en donde se presentan múltiples reacciones (Caso más frecuente en la industria). Se deducen los balances molares por especie en cada reacción y se combinan con relaciones estequiométricas para llegar a expresiones finales de diseño</p>	
<p>3.1. Definiciones generales</p>	<p>La primera parte, introduce al estudiante en los tipos de reacciones: paralelo, en serie, independientes, mixtas; así como</p>	



	conceptos de selectividad que resultan claves en el planteamiento de problemas de optimización	
3.2. Reacciones en paralelo	En esta sección se profundiza en el planteamiento de los balances molares para casos en donde ocurren reacciones en paralelo	
3.3. Maximización del producto deseado para reacciones en serie	En esta sección se profundiza en el planteamiento de los balances molares para casos en donde ocurren reacciones en serie, también se plantean funciones objetivo que busquen maximizar la selectividad y estrategias de operación para lograr alcanzar este objetivo	
3.4. Algoritmo para resolver reacciones complejas	En esta sección se profundiza en el planteamiento de los balances molares para casos en donde ocurren reacciones en paralelo y en serie. Se hace a través de un algoritmo que explica cómo e escriben matemáticamente las expresiones de balance de acuerdo a la reacción y a la especie correspondiente	
3.5. Reacciones múltiples en un PFR o PBR	En esta sección de aplican las relaciones de balances molares en casos de múltiples reacciones para los modelos tubulares de reactores	
3.6 Reacciones múltiples en un CSTR	En esta sección de aplican las relaciones de balances molares en casos de múltiples reacciones para los modelos de tanques perfectamente mezclados.	



3.7. Reactores de membrana para mejorar la selectividad en reacciones múltiples	Esta última sección presenta la manera en la que pueden implementarse los reactores de membranas a la hora de maximizar la selectividad en casos de múltiples reacciones.	
--	---	--

Recuadro 15: Síntesis de los temas tratados en el módulo 3 de Reactools



5.3.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales

Los ejercicios desarrollados en las herramientas de simulación computacional son claves en la propuesta de Reactools, por lo que en esta sección busca detallarse en qué consisten cada uno de los ejercicios del módulo 3 de Reactools, haciendo énfasis el aporte que da el ejercicio al manejo de la herramienta computacional y a los conceptos de diseño de reactores.

5.3.2.1. Diseño de un reactor semicontinuo: Producción de acetato de butilo (P 4-26, H. Scott Fogler)^[65]

El ejercicio 3-1 de Reactools pretende introducir al estudiante en los conceptos básicos del diseño de reactores intermitentes a través de la simulación en Microsoft Excel[®] de un reactor semicontinuo para la producción de Acetato de Butilo. Se realiza la simulación del reactor a través del tiempo implementando el método de Euler para la resolución numérica de la ecuación diferencial de diseño. Se llega a determinar los perfiles temporales de concentración de cada una de las especies involucradas y la variación en el tiempo de la velocidad de reacción. La figura 27 muestra una captura de pantalla de la interfaz en la herramienta de simulación computacional, mientras que la figura 28 presenta los resultados de los perfiles temporales de concentración.

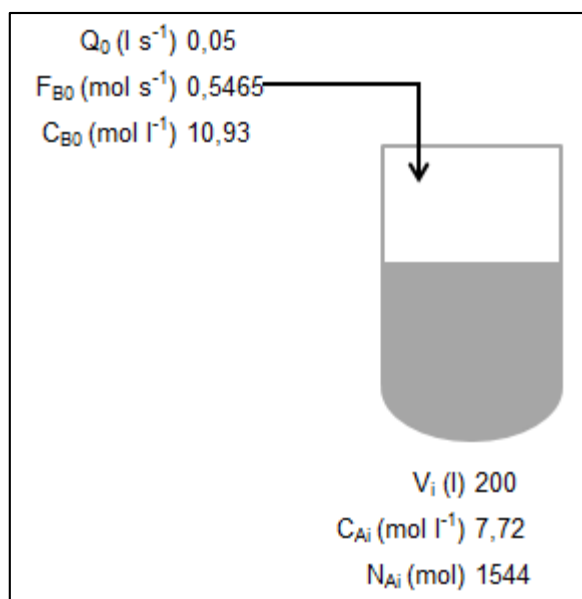


Figura 27: Esquematación del reactor del problema 3-1 (Captura de pantalla)



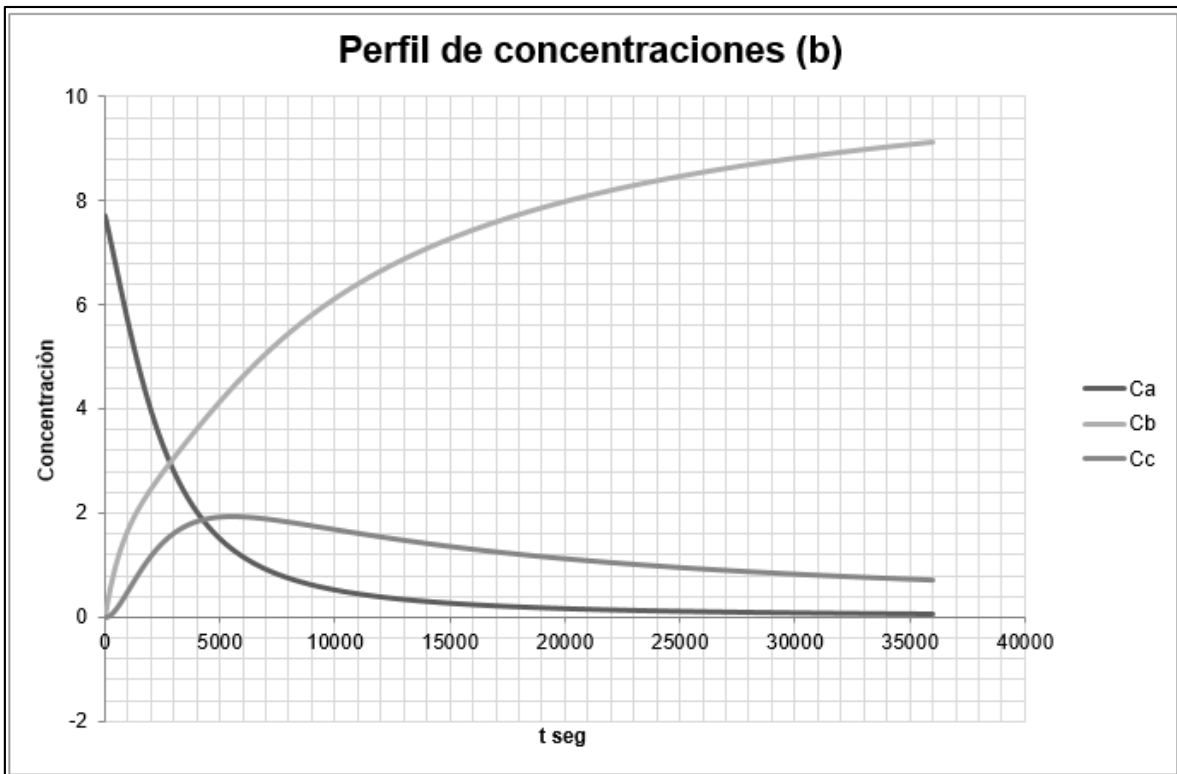


Figura 28: Esquematización de los resultados del problema 3-1 de Reactools (Captura de pantalla)

A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio le permite al estudiante implementar métodos numéricos para la resolución de ecuaciones diferenciales ordinarias en la hoja de cálculo de Microsoft Excel®. Este ejercicio cuenta con una interfaz amigable en Excel y un video tutorial énfasis a lo largo de éste.

5.3.2.2. Modelamiento general en Aspen HYSYS®: Producción de benceno en todos los modelos de reactores.

El ejercicio 3-2 de Reactools es el primero que se realiza sobre la herramienta Aspen HYSYS®. Consiste en un ejercicio simple de producción de benceno llevado a cabo sobre los 4 modelos de reactores que maneja la versión 7.3 de Aspen HYSYS®. A nivel de ingeniería de las reacciones químicas, permite al estudiante evidenciar casos básicos del diseño de reactores isotérmicos y lograr entender la influencia de los parámetros de diseño en el dimensionamiento de los reactores.



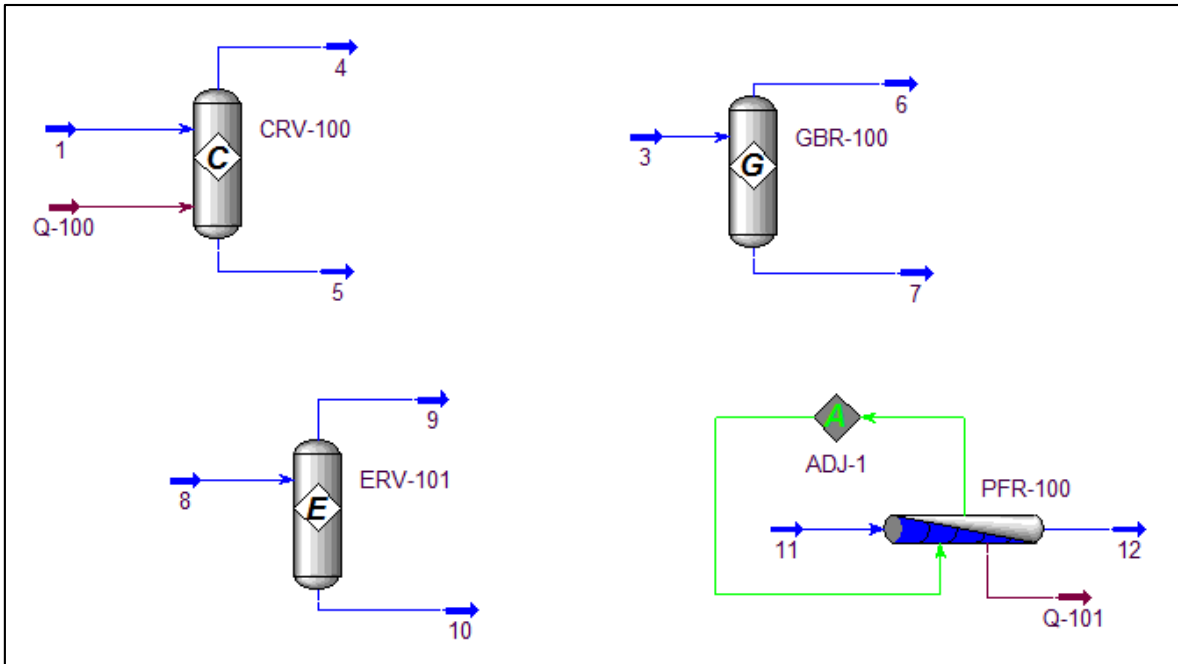


Figura 29: Esquema de los reactores simulados en Aspen HYSYS® del problema 3-2 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 29 corresponde a una captura de pantalla de la interfaz del ejercicio 3-2 de Reactools, donde se evidencia el modelo de reactor de conversión, de Gibbs, de equilibrio y un reactor tubular. A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio presenta la manera en que se introducen componentes, paquetes termodinámicos, reacciones químicas, corrientes de masa y energía, ajustadores y equipos a la interfaz de diseño de Aspen HYSYS®. Este ejercicio cuenta los archivos de simulación y un video tutorial énfasis a lo largo de éste.

5.3.2.3. Sistemas con separación acoplada: Destilación reactiva de etanol (P 4-26, H. Scott Fogler)^[66]

El ejercicio 3-3 de Reactools es una continuación del ejercicio 3-1. Este introduce al estudiante en el modelamiento de destilaciones reactivas a través de Microsoft Excel®. Le permite al estudiante replantear los balances de materia considerando a la especie que se retira por evaporación, así como integrar el modelo termodinámico de equilibrio de fases para la determinación de la concentración de la especie volátil en la fase gaseosa. La figura 30 presenta la captura de pantalla de la esquematización del proceso simple de destilación reactiva que se trabajará.



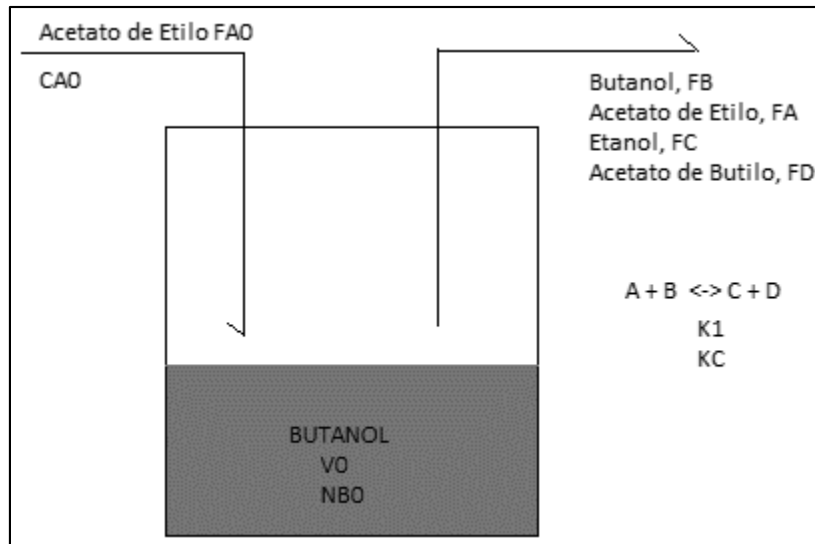


Figura 30: Esquema del equipo de destilación reactiva del problema 3-3 de Reactools (Captura de pantalla)

A nivel de herramientas de simulación computacional, el ejercicio 3-3 ilustra al estudiante en la programación de ciclos iterativos en la interfaz de VBA con el objetivo de resolver múltiples celdas objetivo con un único comando. Esto resulta de vital importancia en los casos en donde se trabajen métodos numéricos para resolver ecuaciones diferenciales y sea necesario un proceso iterativo en cada paso de la ecuación diferencial.

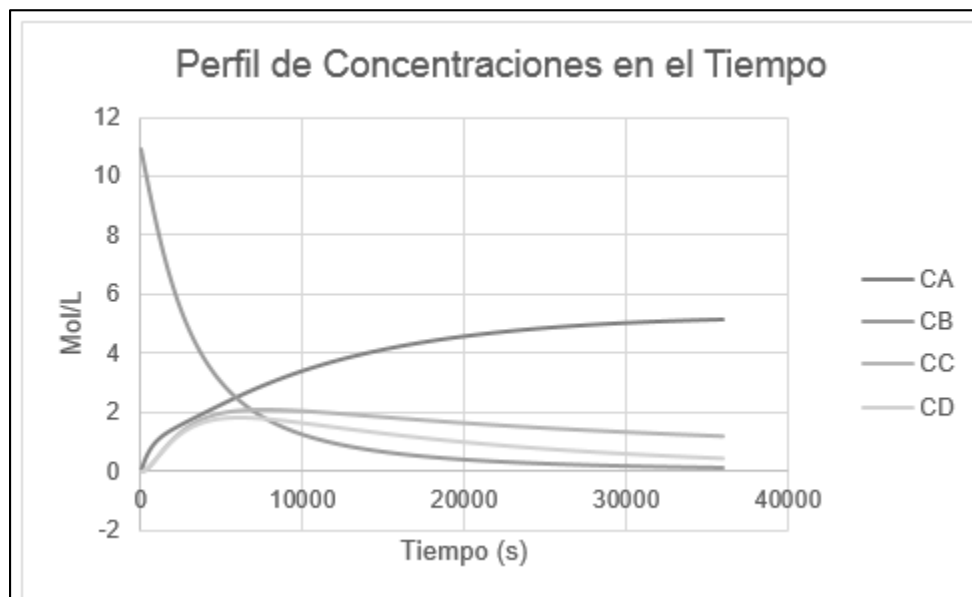


Figura 31: Esquema de los resultados del problema 3-3 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 31 presenta los resultados del perfil de concentraciones en el tiempo para cada una de las especies una vez alcanzada la convergencia en cada paso de la



ecuación diferencial de diseño. Este ejercicio cuenta con una interfaz amigable en Excel, un documento soporte en PDF y un video tutorial énfasis a lo largo de éste.

5.3.2.4. Sistemas de múltiples reacciones en reactores de flujo: Hidrodealquilación sobre catalizador Handry Detol (P 6-16, H. Scott Fogler)^[67]

El ejercicio 3-4 de Reactools brinda una introducción al diseño de reactores tubulares en donde ocurren múltiples reacciones. En particular, se maneja una reacción con un amplio contexto industrial como lo es la Hidrodealquilación sobre catalizador de Handry Detol, en donde se consideran 5 de las principales reacciones involucradas. El problema desarrolla los balances molares en términos de los flujos molares de cada especie y resuelve el sistema de ecuaciones diferenciales acopladas a través de la interfaz de Microsoft Excel®

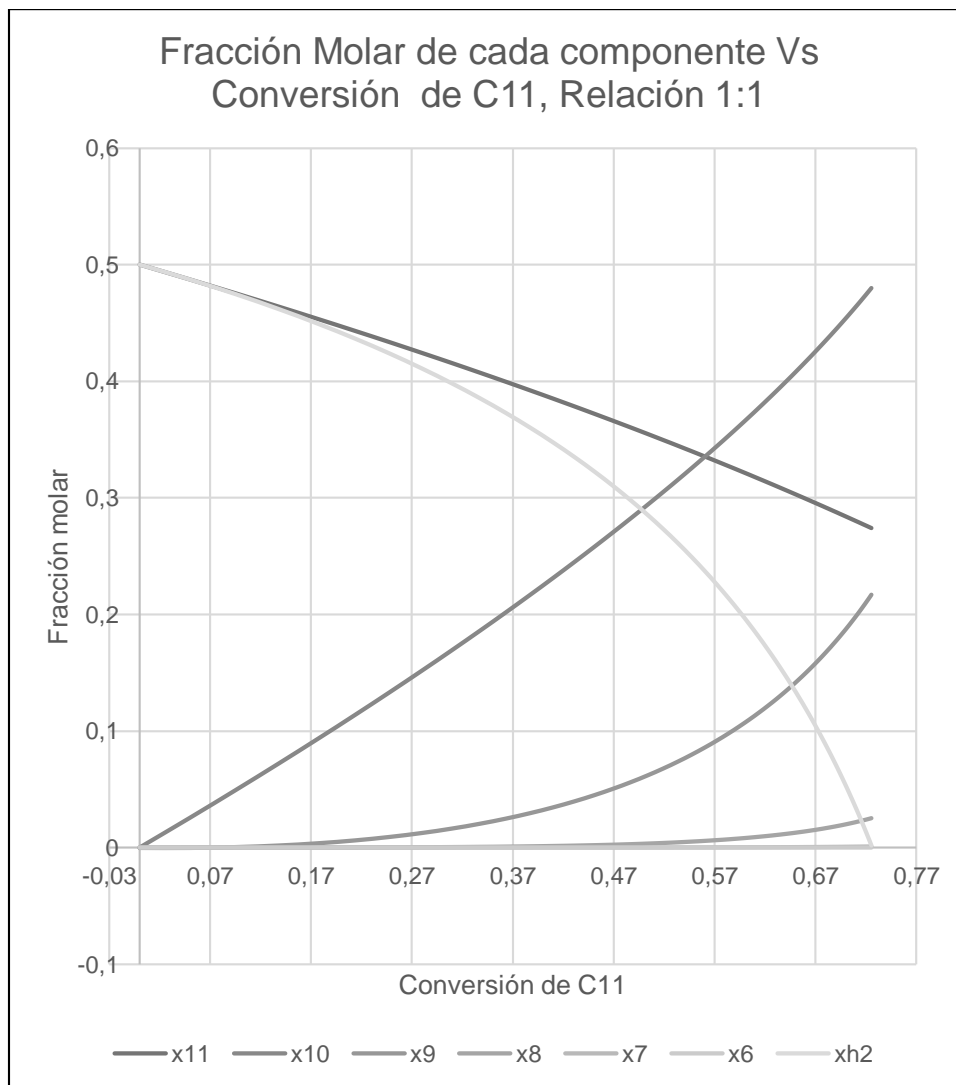


Figura 32: Esquema de los resultados del problema 3-4 de Reactools (Captura de pantalla)



La figura 32 muestra los resultados de la fracción molar de cada uno de los componentes a medida que se consume el C11. A nivel de herramientas de Simulación computacional, este ejercicio permite al estudiante implementar métodos numéricos para la resolución de sistemas de ecuaciones diferenciales (Cada balance molar de una especie es una ecuación diferencial independiente). Este ejercicio cuenta con una interfaz amigable en Excel, un documento soporte en PDF y un video tutorial énfasis a lo largo de éste.

5.3.2.5. Sistemas de múltiples reacciones en reactores intermitentes: Vía catalítica en la producción de ibuprofeno (P 6-26, H. Scott Fogler)^[68]

Este ejercicio permite al estudiante simular la operación de un reactor por lotes en donde se produce Ibuprofeno. Tiene un amplio contexto industrial donde se hace énfasis en la ruta química para producir esta sustancia y la importancia que tiene para la industria farmacéutica hoy en día. Ya que se manejan múltiples reacciones en este problema, el estudiante tendrá que desarrollar los balances molares para cada especie como una función del tiempo para posteriormente integrar numéricamente el sistema de ecuaciones diferenciales resultante.

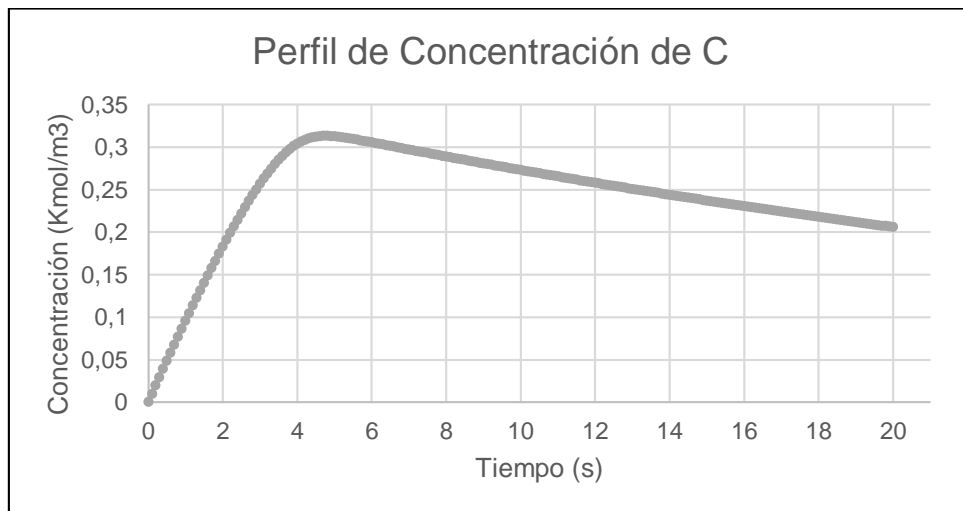


Figura 33: Esquema de los resultados del problema 3-5 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 33 presenta los resultados de la concentración del producto principal con respecto al tiempo de reacción, esto para ilustrarle al estudiante que al trabajar con reacciones de equilibrio, existe un tiempo óptimo en donde se debe retirar el producto para que su concentración alcance un máximo. A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio permite resolver sistemas de ecuaciones diferenciales ordinarias a través de Microsoft Excel®. Este ejercicio cuenta con una interfaz amigable en Excel, un documento soporte en PDF y un video tutorial énfasis a lo largo de éste.



5.3.2.6. Sistemas de múltiples reacciones en Comsol Multiphysics®: Producción de ibuprofeno (R.V. Chaudhari, Catalysis Today)^[69]

El ejercicio 3-6 de Reactools enseña al estudiante a simular sistemas de múltiples reacciones intermitentes en la interfaz de Comsol Multiphysics®. Introduciendo las especies en la interfaz, los parámetros del sistema, así como las variables a analizar, seguido de la escritura de las reacciones en la interfaz y la implementación de un estudio temporal para la resolución del sistema de ecuaciones resultante.

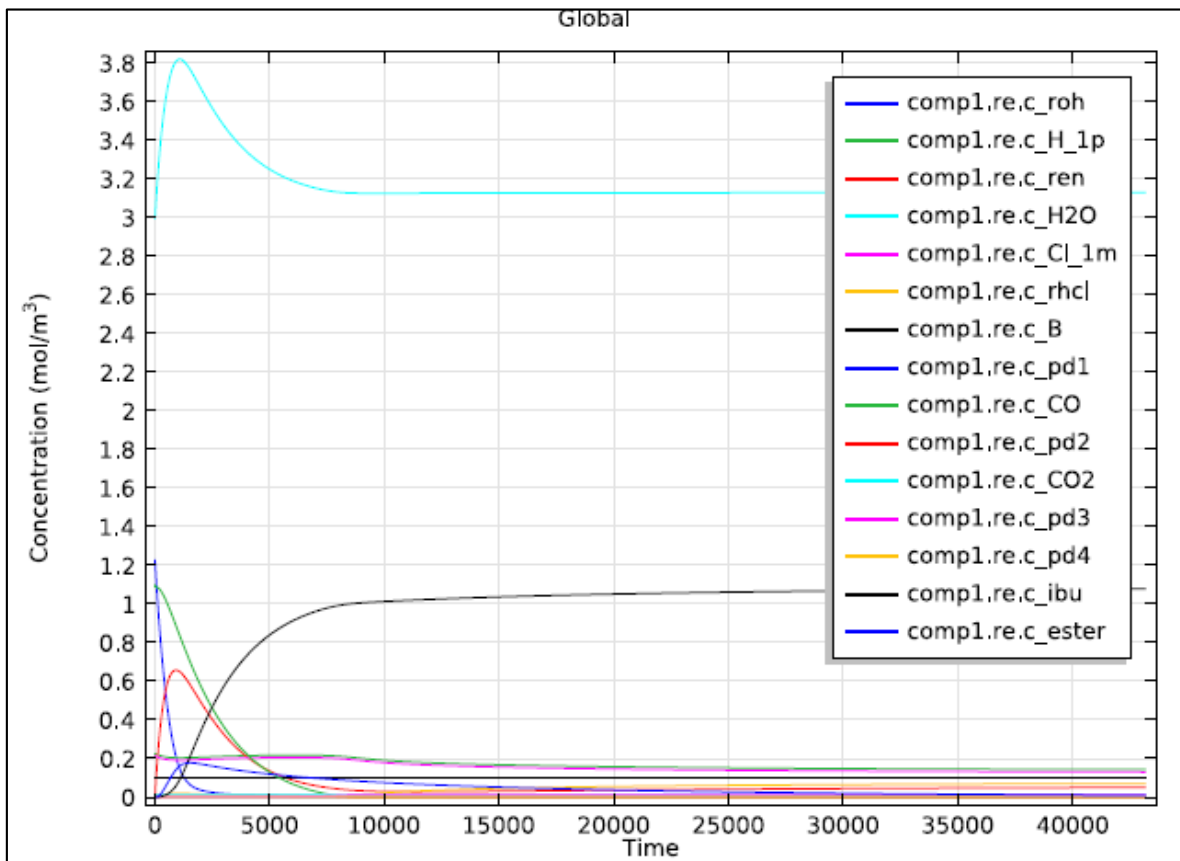


Figura 34: Esquema de los resultados del problema 3-6 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 34 presenta el perfil de concentración para cada especie en función del tiempo de reacción. Este ejercicio presenta una variante en donde se incluye una reacción adicional de esterificación con el objetivo que el estudiante pueda identificar las reacciones controlantes dentro del proceso de producción del Ibuprofeno. El ejercicio cuenta con los archivos de simulación, una guía paso a paso en PDF, archivos de texto con los parámetros del proceso y un video tutorial con énfasis a lo largo de éste.

5.3.2.7. Sistemas de Gasificación en reactores empacados: Introducción al modelamiento de reactores en Matlab®.^[70]



El ejercicio 3-7 de Reactools brinda las herramientas para simular un reactor empacado isotérmico a través de Matlab y su correspondiente resolovedor de ecuaciones diferenciales. El ejercicio pretende hacer análisis de sensibilidad con respecto a algunos parámetros del proceso sin entrar en procedimientos de optimización.

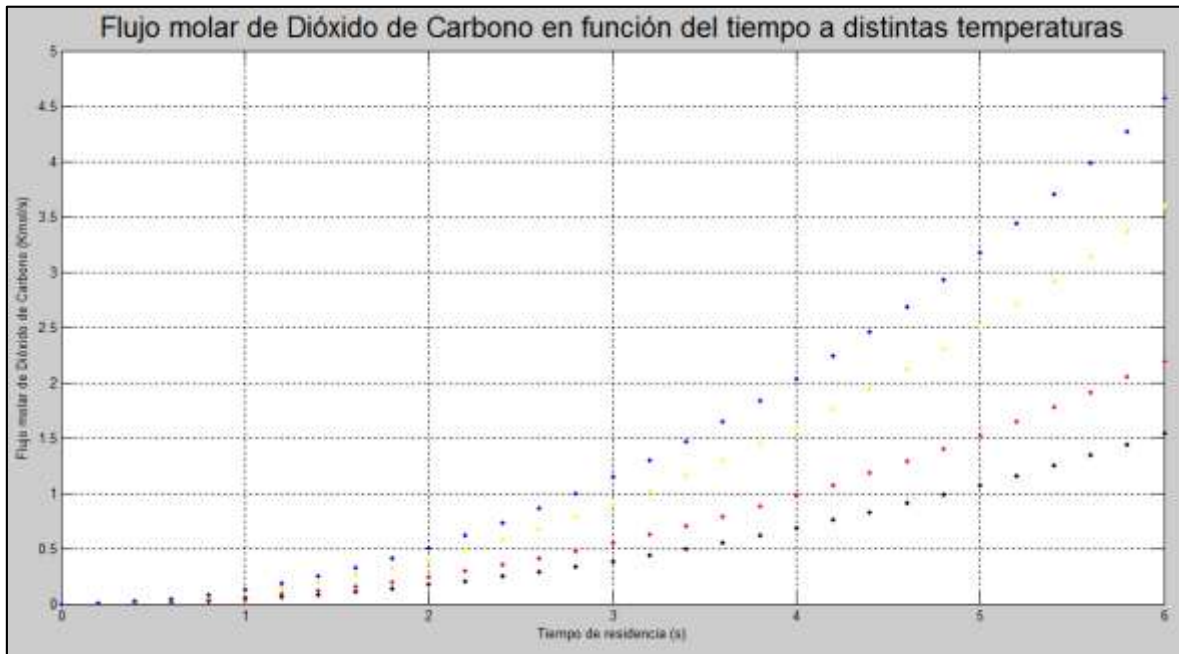


Figura 35: Esquema de los resultados del problema 3-7 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 35 es una captura de pantalla de los resultados obtenidos del flujo molar de dióxido de carbono con respecto al tiempo de residencia en el reactor para 3 temperaturas de alimentación distintas. A nivel de herramientas de simulación computacional, el ejercicio permite al estudiante familiarizarse con la interfaz de Matlab, así como implementar los códigos para declarar parámetros, variables, condiciones iniciales y resolución de ecuaciones diferenciales. El ejercicio cuenta con un documento soporte en PDF y los correspondientes archivos de simulación.



5.4. MÓDULO 4: Diseño de reactores ideales no isotérmicos

5.4.1. Presentación y análisis de los conceptos del módulo

El texto completo del módulo 4 puede visualizarse en la página de Reactools a través del siguiente enlace:

<http://nfrincons.wix.com/reactools#!modulo-4/cbsj>

Que mejor introducción al cuarto módulo Reactools que la que se encuentra escrita en el texto guía del módulo:

“El módulo 4 de Reactools corresponde a una aproximación más cercana a la operación en la vida real de un Reactor a nivel industrial, pues involucra en el modelamiento fenómenos de generación y transferencia de calor. En la primera parte del módulo se trabaja el estado estacionario con efectos de calor para cada uno de los modelos de reactor, deduciendo expresiones para el cálculo de la temperatura de acuerdo al calor liberado por la reacción y a la energía de las corrientes reaccionantes. También se trabajan las curvas de ignición y extinción para la determinación del estado estacionario en donde operará el reactor de acuerdo a la temperatura en alimentación de la corriente reaccionante, se realizan además análisis de sensibilidad al respecto para que el estudiante se encuentre en la capacidad de identificar las variables más influyentes en la operación segura de un reactor.

La segunda parte del módulo trabaja los efectos de calor cuando se trabajan reactores operando en estado dinámico. Se realiza la correspondiente deducción de los modelos y se analizan los casos de aplicabilidad, implementando herramientas de simulación computacional para resolver numéricamente estos modelos de ecuaciones diferenciales parciales. Esta sección tiene un enfoque hacia las variables que hay que manipular para garantizar la operación segura de un reactor. Al final de este módulo, el estudiante contará con las herramientas necesarias para simular cualquier tipo de reactor tanto en su arranque como en estado estacionario incluyendo los efectos de calor que involucra el fenómeno de reacción. Adicionalmente, estará en la capacidad de tener un criterio para realizar simplificaciones sobre los modelos y los balances de energía para poder trasladarlos a herramientas de simulación computacional”.

Texto introductorio, cuarto módulo de Reactools

Puntualmente, el recuadro 16 resume los ejes temáticos del cuarto módulo de Reactools y los correspondientes recursos pedagógicos con los que cuenta cada uno. El módulo 4 también cuenta con ejercicios de simulación de reactores donde ocurren múltiples reacciones a través de Comsol Multiphysics® y explora la interfaz de Matlab para el modelamiento y simulación de reactores en estado dinámico.



Temática	Descripción	Herramientas de aprendizaje
1. Diseño de reactores no isotérmicos en estado estacionario	El módulo 4 inicia con la deducción del balance de energía para sistemas en estado estacionario y una posterior implementación en los modelos de reactores químicos.	<p>Las herramientas de aprendizaje que se implementan a lo largo de este módulo corresponden a:</p> <p>Texto de apoyo de 62 páginas en PDF.</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Algoritmos paso a paso para método de análisis de datos ✓ Imágenes originales adaptadas ✓ Modelo de ecuaciones secuencial y explicación de cada modificación en expresiones ✓ Ejemplos de la industria para cada concepto que lo requiera <p>Presentación del módulo en PowerPoint®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Inclusión de imágenes originales adaptadas ✓ Diapositivas animadas para ilustrar el paso a paso en deducción de modelos <p>Grabación con Camtasia Studio®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 3 sesiones de 60 minutos de explicación detallada de los conceptos del módulo
1.1. El balance de energía	En esta sección se deduce desde los fundamentos termodinámicos el balance de energía aplicado a sistemas reactivos abiertos y cerrados. Se hacen las correspondientes definiciones de cada uno de los términos que componen el balance y se adapta la expresión resultante con definiciones del calor de reacción y la disección de entalpías.	
1.2. Operación adiabática	En esta sección se despreja el término de calor añadido o cedido al reactor y se implementa el balance de energía en los modelos PFR y CSTR.	
1.3. PFR en estado estacionario con intercambiador de calor	En esta sección se realiza la deducción de la ecuación de energía para un reactor tubular con intercambiador de calor en operación en paralelo y contracorriente, e presentan los mecanismos para la resolución del sistema de ecuaciones diferenciales con condición de iteración.	
1.4. Conversión en el equilibrio	En esta sección se estudia el balance de energía aplicado a sistemas donde ocurren reacciones de equilibrio y se	



Recuadro 16, Continuación I

	presentan los métodos para el cálculo de la conversión de equilibrio que puede alcanzarse en un reactor.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Efectos de énfasis a lo largo de los video
1.5. CSTR con efectos de calor	A lo largo de esta sección se trabajan conceptos de diseño de reactores perfectamente mezclados no isotérmicos a través de la combinación de la expresión general del balance de energía con el balance molar para este modelo de reactores.	<p>2 Ejercicios desarrollados en Microsoft Excel® de diseño de reactores no isotérmicos</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Programación de macros en cada ejercicio ✓ Inclusión de archivos no habilitados para macros y sus plantillas ✓ Textos de apoyo que incluyen descripción del proceso, presentación de parámetros de la simulación y análisis de resultados
1.6. Múltiples estados estacionario	En esta sección se discuten los múltiples estados estacionarios que se pueden presentar en la operación de reactores perfectamente mezclados, se presenta el análisis de las curvas de ignición y extinción, así como los diagramas de estabilidad y seguridad de la operación.	<p>2 Ejercicios desarrollados en Comsol Multiphysics®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ 30 minutos de grabación detallada del paso a paso de la simulación en Comsol Multiphysics® ✓ Documento PDF de 5 páginas con el paso a paso de la simulación ✓ Archivos de simulación .mph y parámetros de los sistemas en documentos de texto
1.7. Reacciones químicas múltiples no isotérmicas	En esta sección se adapta la ecuación de diseño y el balance de energía para sistemas en donde ocurren múltiples reacciones, se ejemplifica a través del uso de los flujos molares como variables de diseño.	<p>1 Ejercicio desarrollado en Matlab Simulink®</p>
1.8. Variaciones radiales y axiales del PFR	Esta sección realiza el desarrollo de la ecuación de diseño cuando se consideran variaciones radiales y axiales de temperatura y concentración en un reactor tubular, así como los métodos para la resolución del sistema resultante de ecuaciones diferenciales parciales	



Recuadro 16, Continuación II

<p>2. Diseño de reactores no isotérmicos en estado no estacionario</p>	<p>El principal objetivo de la segunda sección del módulo 4 es introducir al estudiante en el diseño de reactores operando en estado dinámico, esto se realiza a través de la deducción del balance de energía considerando acumulación/pérdida de energía e integrándolo con los modelos de reactores trabajados.</p>	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Archivos de simulación .mat ✓ Documento PDF de 5 páginas con el paso a paso de la simulación y el código implementado <p>2 Ejercicios desarrollados de diseño no isotérmico de reactores químicos (Problemas del Hall de la Fama de Fogler) desarrollados en Aspen Plus® y Aspen Hysys®</p> <ul style="list-style-type: none"> ✓ Archivos de simulación de Aspen Plus y Aspen Hysys ✓ Videos tutoriales de cada ejercicio con el correspondiente paso a paso
<p>2.1. Balance de energía en estado no estacionario</p>	<p>En esta sección se deduce la expresión general del balance de energía cuando se considera la acumulación/pérdida de energía en el sistema reactivo.</p>	
<p>2.2. Balance de energía para reactores intermitentes</p>	<p>En esta sección se implementa el balance de energía en sistemas intermitentes de reacción, acoplándolo con los correspondientes balances molares para obtener un sistema de ecuaciones diferenciales en función del tiempo de reacción.</p>	
<p>2.3. Reactor semicontinuo con intercambiador de calor</p>	<p>En esta sección se aplica el balance de energía dinámico a reactores semicontinuos con sistemas de intercambio de calor, obteniendo expresiones de diseño para dimensionamiento y análisis temporal de la operación de este tipo de reactores.</p>	
<p>2.4. Operación en estado no estacionario de un CSTR</p>	<p>En esta sección se abarca el escenario más común en donde un reactor continuo perfectamente mezclado opera en estado dinámico: Durante su arranque. Se integra el balance molar al balance de energía y</p>	



Recuadro 16, Continuación III

	se desarrolla el sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias a resolver.	
2.5. Reacciones múltiples no isotérmicas	En esta sección se aplica el balance de energía en estado dinámico para sistemas en donde ocurren múltiples reacciones no isotérmicas, profundizando en la manera en que las propiedades termodinámicas de cada especie influyen en el balance de energía.	
2.6. Operación en estado no estacionario de un PFR	La última sección del módulo 4 pretende introducir al estudiante en el diseño dinámico de reactores tubulares no isotérmicos. El sistema de ecuaciones parciales resultante puede únicamente ser resuelta a través de métodos numéricos avanzados o a través de Comsol Multiphysics o Matlab.	

Recuadro 16: Síntesis de los temas tratados en el módulo 4 de Reactools



5.4.2. Selección y presentación de los ejercicios modelados en las herramientas computacionales

5.4.2.1. Acoplamiento de sistemas de intercambio de calor: Arreglos de PFR'S con intercambiadores de calor (P 8-10, H. Scott Fogler)^[71]

El primer ejercicio del módulo 4 de Reactools pretender mostrarle al estudiante la manera de diseñar reactores tubulares no isotérmicos con distintos arreglos en la operación al integrar un equipo de transferencia de calor al sistema. Permite que el estudiante resuelva el balance de energía tanto en el reactor como en el fluido de transferencia de calor para la operación en paralelo y contracorriente e induce al estudiante en el uso de la herramienta solver de Microsoft Excel[®] para solucionar problemas de tipo iterativo, al localizar la función de búsqueda en el extremo del reactor. Este ejercicio también le permite al estudiante integrar los balances de materia y energía para el dimensionamiento diferencial de un reactor no isotérmico ya analizar la razón de las variaciones de temperatura en puntos específicos del reactor.



Figura 36: Esquema del problema 4-1 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 36 presenta una captura de pantalla de uno de los arreglos que se estudian en este ejercicio en donde el fluido de intercambio de calor entra en paralelo al flujo de la mezcla reaccionante, mientras que la figura 37 muestra los resultados del perfil de temperatura para uno de los casos estudiado en el ejercicio, donde resulta evidente que no se trabaja con un modelo de temperatura de fluido de intercambio de calor constante.



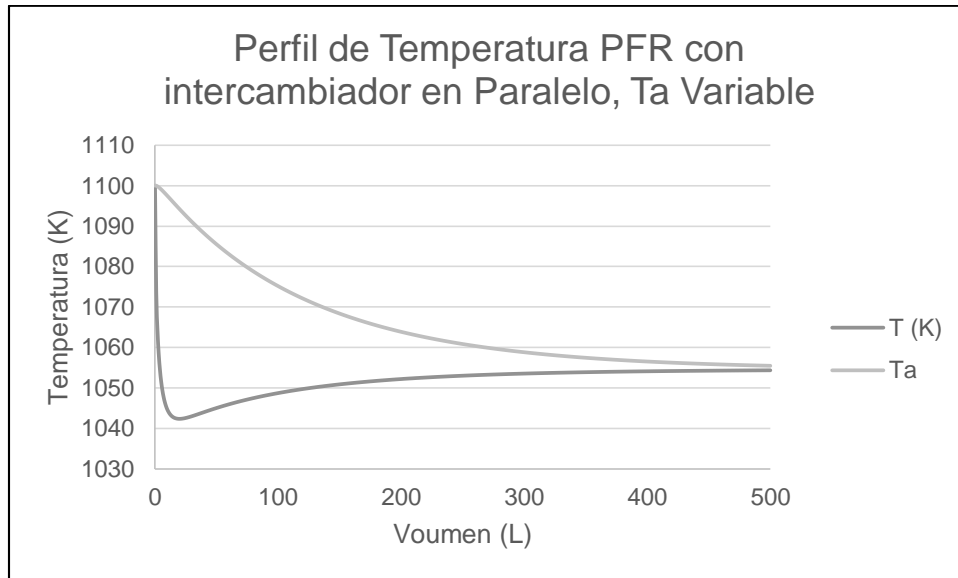


Figura 37: Esquema de los resultados del problema 4-1 de Reactools (Captura de pantalla)

5.4.2.2. Diseño con reacciones de equilibrio: PFR no isotérmico con reacción de equilibrio (P 8-15, H. Scott Fogler)^[72]

El segundo ejercicio pretende ilustrar la manera en la que debe calcularse la conversión cuando se involucra el balance de energía y se tiene una reacción de equilibrio en el sistema, esto permite al estudiante encontrar el punto en donde la conversión calculada por el balance de energía es idéntica a la conversión lograda por el balance de materia, por lo que se alcanza un estado estacionario de reactor. Adicionalmente, el ejercicio desarrolla un análisis de sensibilidad sobre las variables más influyentes en la temperatura del reactor.

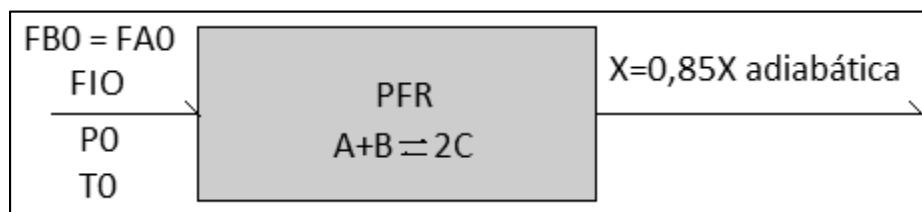


Figura 38: Esquema del problema 4-2 de Reactools (Captura de pantalla)



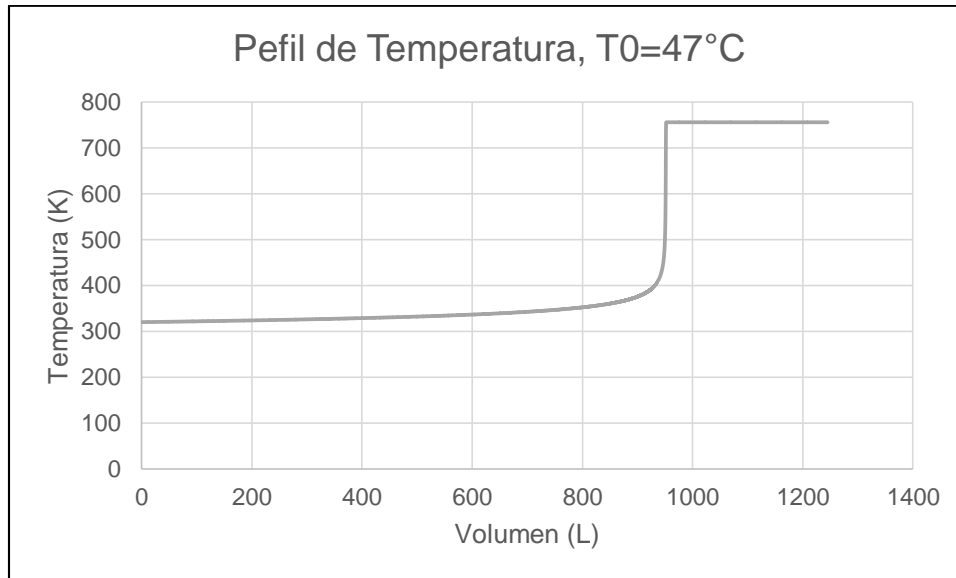


Figura 39: Esquema de los resultados del problema 4-2 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 38 corresponde a una captura de pantalla del ejercicio en donde se ilustra el sistema de reactor tubular empacado a estudiar en el ejercicio así como la correspondiente reacción de equilibrio. La figura 39 presenta los resultados del perfil de temperatura a lo largo del reactor. A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio refuerza la implementación de métodos para la resolución de ecuaciones diferenciales simultáneas.

5.4.2.3. Diseño de reactores no isotérmicos: Reactor no isotérmico para la producción de estireno en Aspen Hysys® y Aspen Plus® (P 8-26, H. Scott Fogler)^[73]

El ejercicio 4-3 de Reactools es la primera aproximación a un diseño de reactores no isotérmicos en Aspen Hysys®. Se busca simular el proceso de reacción de un equipo no isotérmico para la producción de estireno. Este ejercicio corresponde a uno del Hall de la fama del Libro de H. Scott Fogler. Una corriente de vapor y otra de etilbenceno se mezclan antes de entrar a un reactor tubular empacado. El ejercicio proporciona los correspondientes parámetros cinéticos y condiciones para la operación. Se plantea una optimización al variar la temperatura y la relación molar de las corrientes de entrada para maximizar la conversión final de estireno, por lo que induce al estudiante en los conceptos de optimización tales como el análisis de sensibilidad de variables y la selección apropiada de una función objetivo.



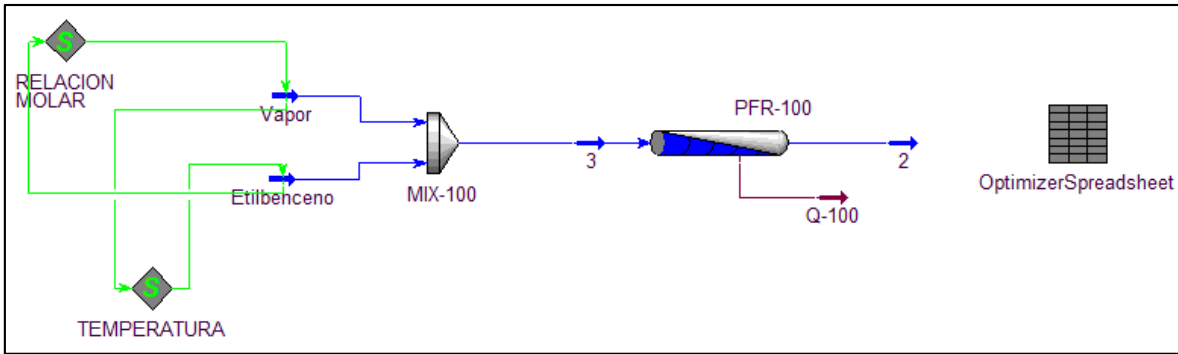


Figura 40: Esquema del problema 4-3 de Reactools (Captura de pantalla)

Uno de los resultados más importantes para fomentar el pensamiento crítico de los estudiantes al abarcar este ejercicio es el perfil de temperatura a lo largo del reactor, una vez se logra completar la optimización planteada. Este perfil se muestra en la figura 41. Este ejercicio a nivel de herramientas de simulación, enseña el manejo de la hoja de optimización en la interfaz de Aspen HYSYS®, así como el uso de los mezcladores y visualización de resultados a manera de perfiles a lo largo de los equipos.

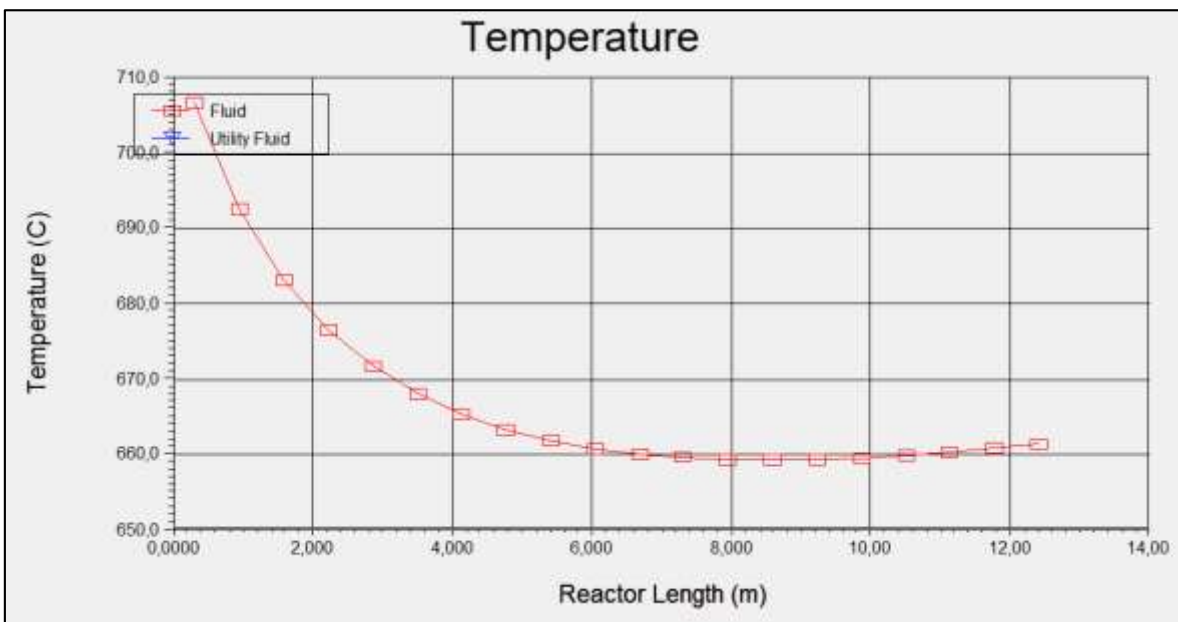


Figura 41: Esquema de los resultados del problema 4-3 de Reactools (Captura de pantalla)

5.4.2.4. Diseño de reactores no isotérmicos: Reactor no isotérmico para la producción de Formaldehído en Aspen Hysys® y Aspen Plus®.^[74]

El cuarto ejercicio del módulo 4 de Reactools corresponde a una aproximación más al detalle del diseño y simulación de reactores no isotérmicos en la herramienta Aspen HYSYS®. El ejercicio propone un sistema para la producción de formaldehído



en un reactor empacado donde la caída de presión no es despreciable, por lo que se enseña cómo introducir el modelo de caída de presión en el reactor a través de la interfaz de Aspen HYSYS®. Durante este ejercicio no se realiza una optimización como tal pero si un barrido paramétrico que pretende analizar la influencia del modelo de caída de presión en el desempeño del reactor no isotérmico.

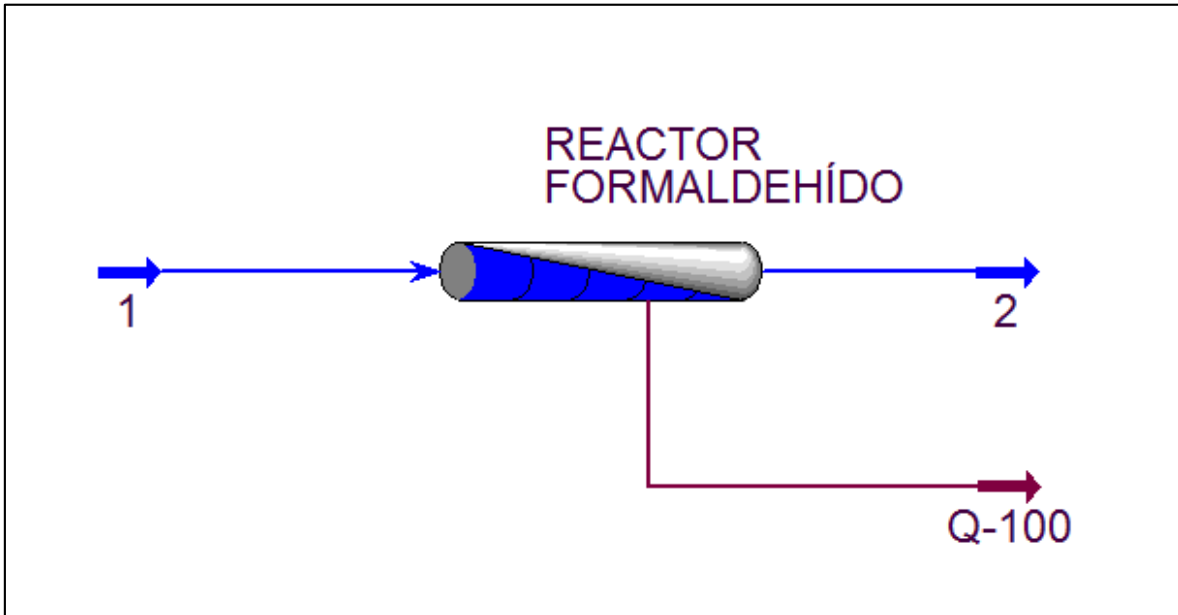


Figura 42: Esquema del problema 4-4 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 42 presenta el esquema del ejercicio a resolver a través de Aspen HYSYS®, en donde se ilustra el reactor empacado implementado para la producción de formaldehído junto a sus corrientes correspondientes, mientras que la figura 43 muestra los resultados del perfil de temperatura a lo largo del reactor tanto para la mezcla reactiva como para el fluido refrigerante cuando se alcanza la operación a temperatura de pared constante. A nivel de herramientas de simulación computacional, este ejercicio permite al estudiante aprender cómo insertar la propiedades del fluido refrigerante acoplado al reactor y explora la introducción de cinéticas avanzadas en la interfaz de Aspen HYSYS®.



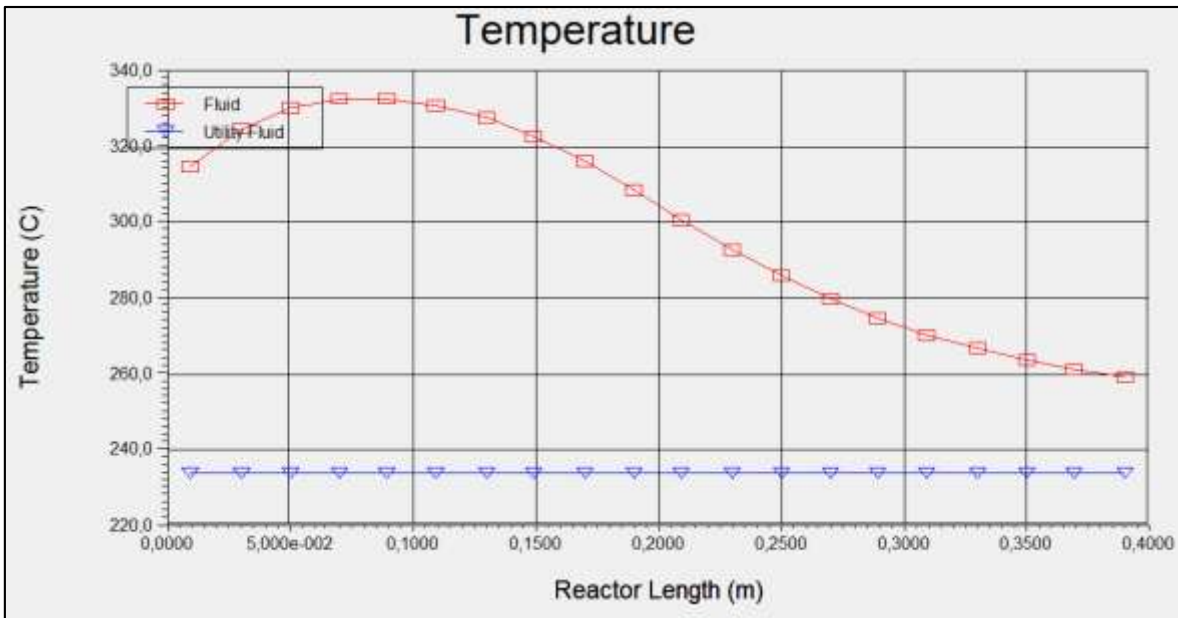


Figura 43: Esquema de los resultados del problema 4-4 de Reactools (Captura de pantalla)

5.4.2.5. Diseño de reactores tubulares con variaciones radiales: Variaciones radiales en reactores tubulares a través de Comsol Multiphysics®

El ejercicio 5 del módulo 4 de Reactools pretende introducir al estudiante en el diseño tridimensional de reactores tubulares en donde se contemplan variaciones radiales en un reactor perfectamente cilíndrico en Comsol Multiphysics®, desarrollando y aplicando los modelo de variaciones radiales presentados en la última sección de la primera parte del módulo 4 de Reactools. A nivel de herramientas de simulación computacional, enseña al estudiante a construir geometrías tridimensionales en la interfaz de Comsol, así como a especificar condiciones de frontera y propiedades físicas del material del reactor. Adicionalmente, enseña las técnicas de mallado manejadas por Comsol y la visualización de resultados como iso-superficies en la interfaz de Comsol.



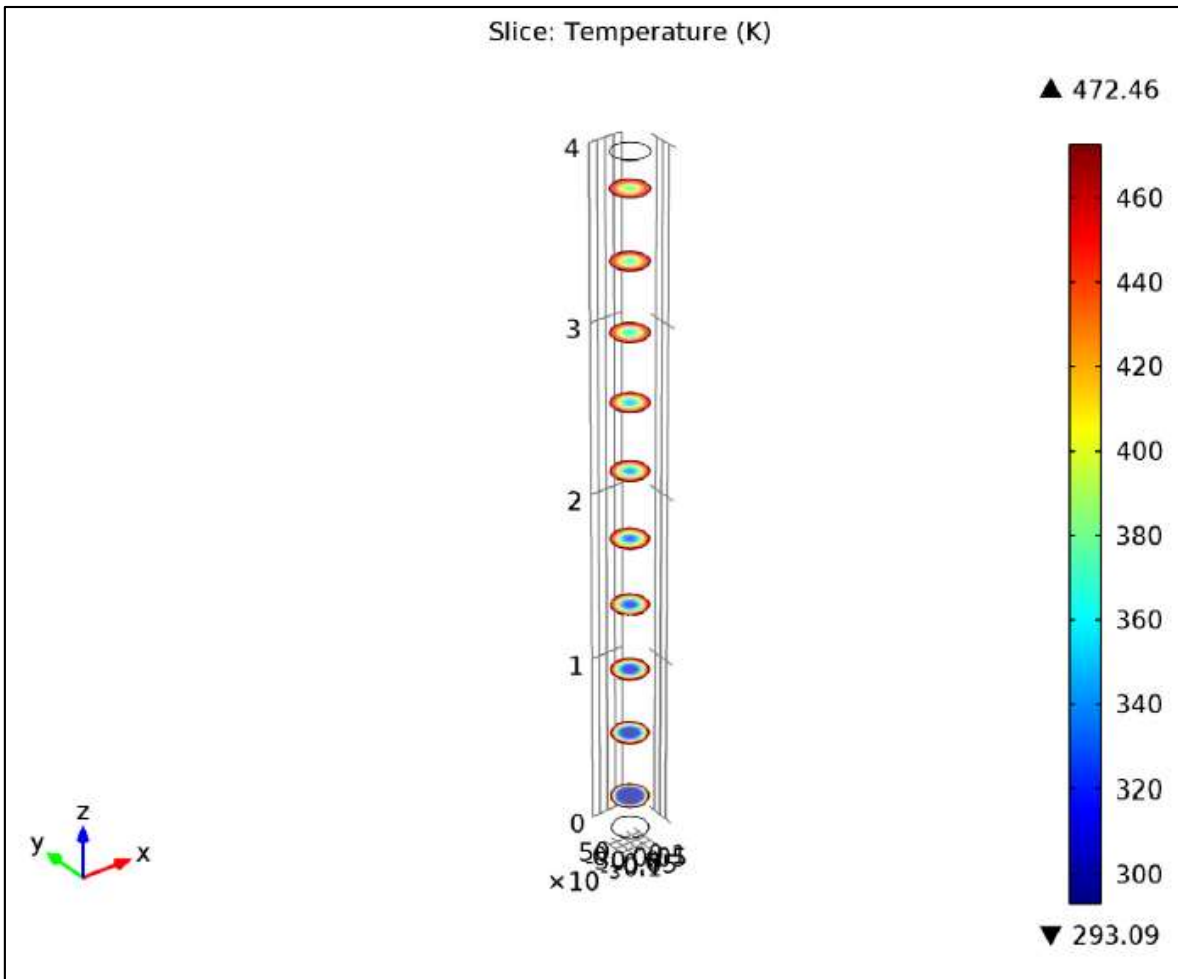


Figura 44: Esquema de los resultados del problema 4-5 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 44 presenta los resultados como cortes transversales del perfil de temperatura radial a lo largo del reactor, se aprecia una mayor temperatura hacia las paredes del reactor en donde la velocidad de flujo de la mezcla reactiva es menor. El objetivo es que el estudiante de igual manera encuentre los motivos para explicar las variaciones tanto axiales como radiales del perfil de temperatura y concentración logrados.

5.4.2.6. Diseño de reactores en estado no estacionario: Reactor dinámico para la producción de Hexametiltriamina en Simulink®

El sexto ejercicio del módulo 4 de Reactools introduce la herramienta Simulink del paquete de Matlab® para el modelamiento y simulación de un reactor no isotérmico en estado no estacionario para la producción de Hexametiltriamina. Lo interesante de este ejercicio es la construcción del diagrama de bloques en la herramienta que representa explícitamente el modelo dinámico planteado del reactor. Este ejercicio permite realizar cambios en los parámetros del proceso a través de escalones o



perturbaciones y hacer un análisis de las respuestas del sistema ante estas alteraciones.

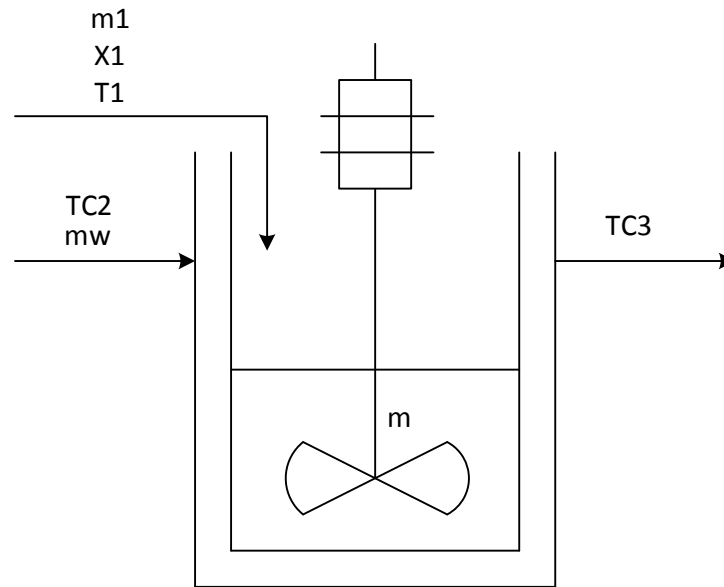


Figura 45: Esquema del problema 4-6 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 45 presenta el esquema del reactor CSTR en el cual se lleva a cabo la reacción de producción de Hexametiltriamina y las variables principales de análisis, mientras que la figura 46 es una representación del diagrama de cajas resultante una vez implementado el modelo en Simulink®. Se evidencian todas las operaciones necesarias para desarrollar el modelo así como las perturbaciones en las variables analizadas.



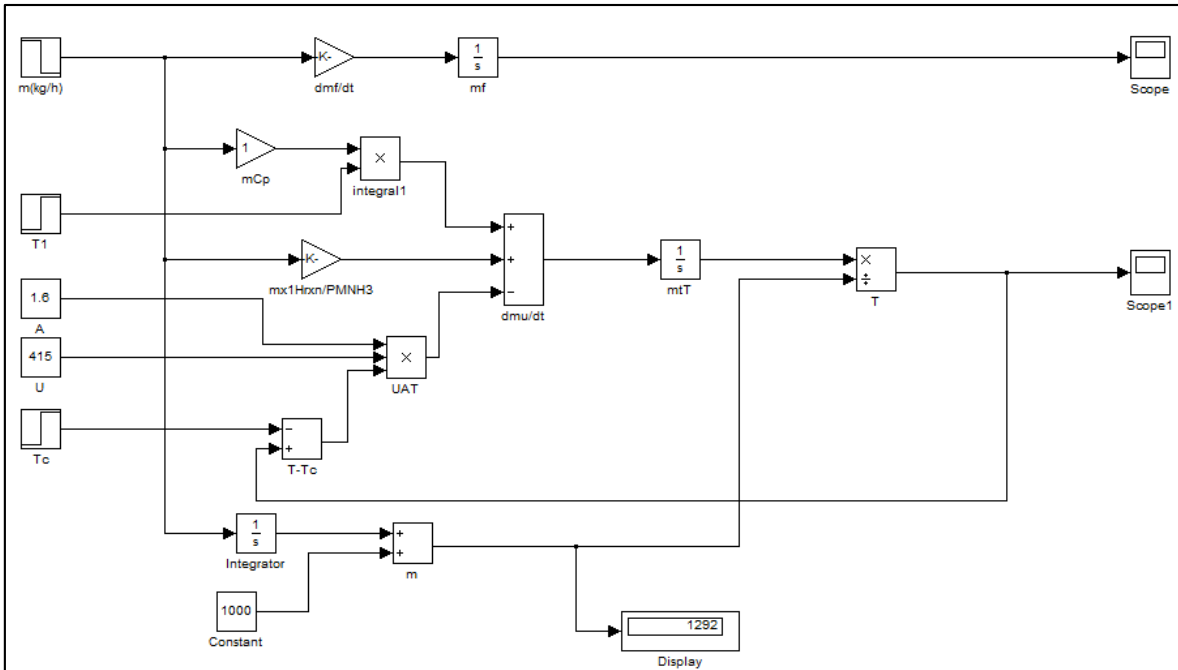


Figura 46: Esquema de los resultados del problema 4-6 de Reactools (Captura de pantalla)

5.4.2.7. Arranque seguro de un reactor no isotérmico: Producción de propilenglicol en Comsol Multiphysics® (E 9-4, H. Scott Fogler)^[75]

El séptimo ejercicio del módulo 4 de Reactools corresponde a la implementación de sistemas dinámicos en la Herramienta Comsol Multiphysics® con un énfasis en la seguridad en el arranque de la operación, pues el ejercicio enseña al estudiante a generar las curvas de arranque de un CSTR para determinar si en algún momento del arranque se alcanzan temperaturas que sobrepasan los límites de seguridad.



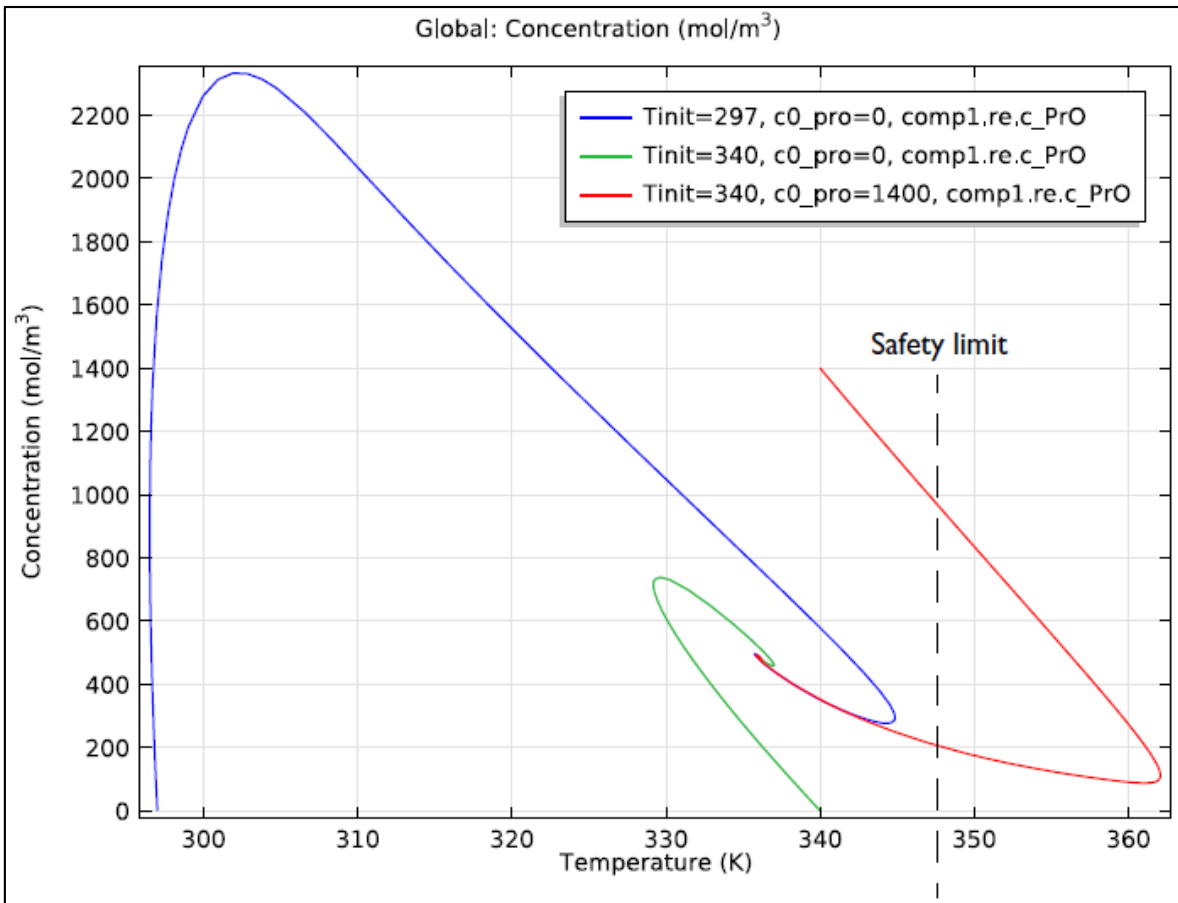


Figura 47: Esquema de los resultados del problema 4-7 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 47 muestra los resultados de la simulación desarrollada en el ejercicio, en donde se seleccionan tres temperaturas iniciales distintas así como concentraciones iniciales diferentes. Cada color representa una trayectoria que sigue el reactor durante su arranque. Todas las líneas finalizan en el mismo punto de concentración y temperatura: las del estado estacionario. Sin embargo, una temperatura y concentración inicial elevada hacen que el arranque sobrepase los límites de seguridad en la operación (Línea roja). Todos estos tipos de análisis son los que da pie este ejercicio para discutir en las sesiones de clase.

5.4.2.8. Diseño de reactores en tres dimensiones: Reactor para la reducción de NO_x en Comsol Multiphysics® (P 3-65, G. Schaub, D. Unruh,)^[76]

El último ejercicio de Reactools integra todos los fenómenos estudiados a lo largo del curso en un caso de reducción de NO_x en un reactor empacado, donde se incluyen los soportes del catalizador en la estructura tridimensional del reactor. Este ejercicio se simula en Comsol Multiphysics® y enseña al estudiante cómo construir geometrías complejas usando la interfaz de Comsol o a importarlas desde paquetes de dibujo adicionales (Como Autocad® o Solid Edge®), posteriormente, induce al



estudiante en la especificación de condiciones de frontera y en la división de la geometría según el material del que esté construido la parte específica del reactor. Posteriormente, enseña al estudiante a introducir los modelos termodinámicos en las secciones geométricas y así mismo a especificar las correspondientes superficies de frontera energéticas, necesarias para que la simulación pueda llevarse a cabo. Finalmente, el ejercicio ilustra al estudiante en las diferentes maneras que tiene Comsol para visualizar los resultados obtenidos (Cortes transversales, diagramas 2D, secciones transversales)

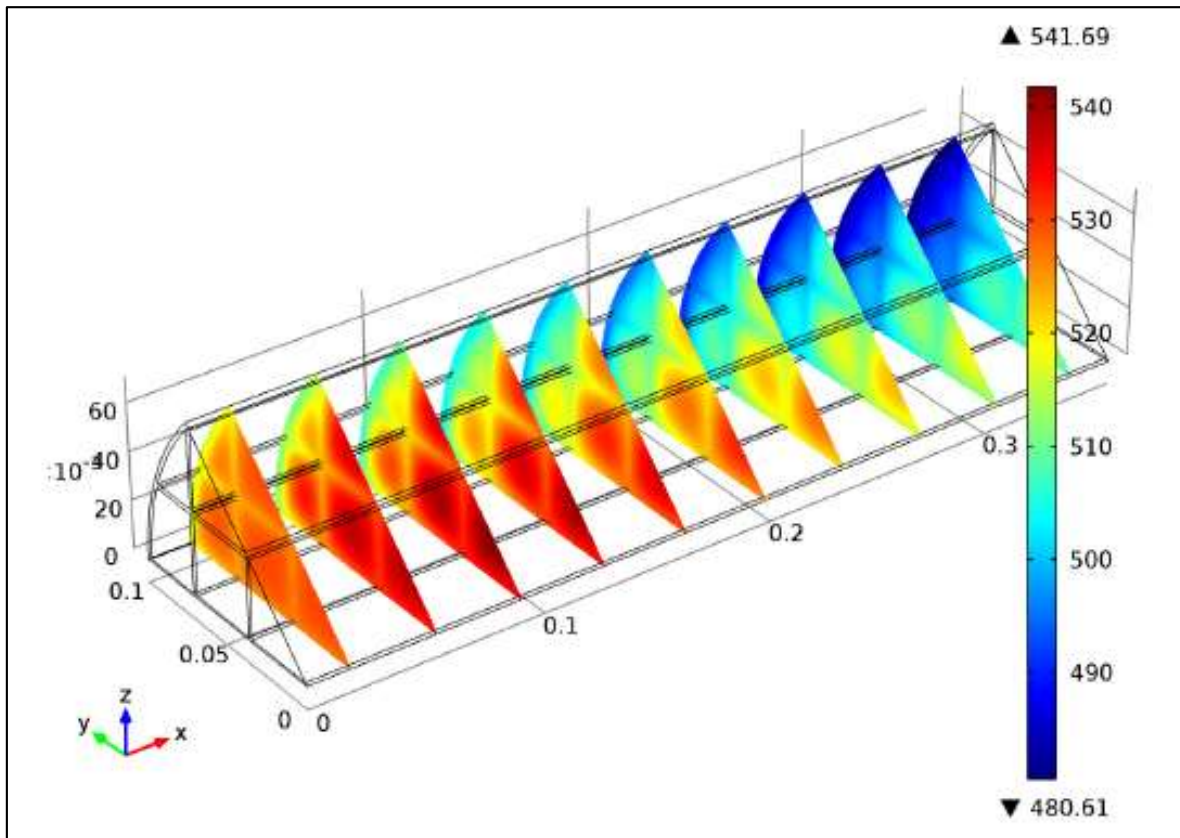


Figura 48: Esquema de los resultados del problema 4-7 de Reactools (Captura de pantalla)

La figura 48 permite visualizar el perfil de temperatura a manera de corte transversal una vez terminada la simulación del reactor. Se evidencia que las mayores temperaturas se alcanzan al inicio del reactor, en donde la velocidad de reacción es más elevada y disminuye a medida que se acerca a las paredes de reactor. El objetivo de obtener los perfiles tridimensionales es que los estudiantes puedan desarrollar su pensamiento crítico al encontrar la explicación lógica del porqué cambian axial y radialmente los perfiles de temperatura, concentración, presión y conversión obtenidos.



5.6. Compilación de los módulos

La compilación de todo el material desarrollado se realiza a través del gestor de páginas web Wix®, en donde se encuentran todos los recursos de aprendizaje especificados para cada módulo y a los que tienen acceso todo aquel que entre al sitio web:

<http://nfrincons.wix.com/reactools>

La sección posterior describe la interfaz de la página web final en donde se encuentra todo el material desarrollado así como información general del proyecto Reactools y todo lo concerniente a lo que fue la fase de implementación a través del curso “Comsol for Dummies”.

5.6.1. Descripción del compilado como página web a través de Wix®

La página principal del sitio web de Reactools se presenta en la figura 49, consta de una interfaz acorde con el diseño inicial del material de didáctico, y un menú principal situado a la izquierda de la pantalla en donde se puede encontrar discriminados cada uno de los módulos didácticos de Reactools, así como un menú para encontrar toda la información concerniente a la fase de implementación a través del curso “Comsol for Dummies”.



Figura 49: Página principal página web Reactools

La figura 50, por otra parte corresponde a la segunda parte de la interfaz principal de la página web, en donde se resume el contenido de cada uno de los módulos de Reactools con el propósito que los estudiantes puedan tener de entrada un panorama de lo que pueden aprender con el material didáctico.



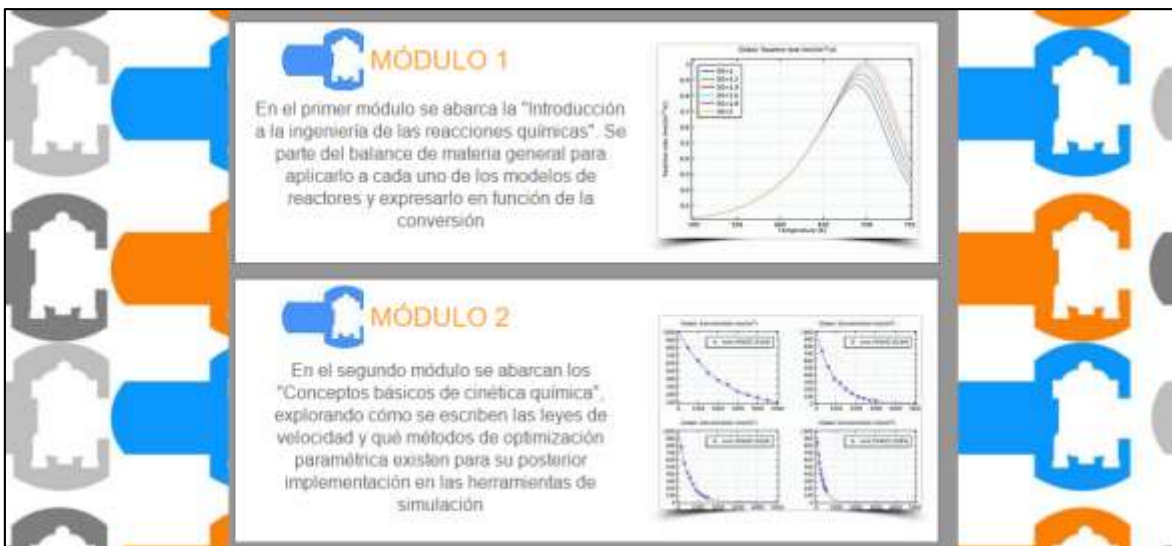


Figura 50: Página principal página web Reactools, visualización de módulos

La figura 51, muestra la sección de noticias de la página web de Reactools en donde se enuncian todos los eventos y lanzamientos que ha tenido el proyecto a lo largo de su realización. Se incluye toda la información de la participación de Reactools en la III Jornada Técnica Procesa de Ingeniería Química y Biológica, así como el XV Encuentro Nacional de Estudiantes de Ingeniería Química y el XXI Congreso Latinoamericano de estudiantes de Ingeniería Química, entre otros.



Figura 51: Sección de noticias página web Reactools



La figura 52 es una captura de pantalla de la interfaz de cada uno de los módulos temáticos de Reactools, se aprecia un texto introductorio al módulo, así como los videos tutoriales correspondientes, las presentaciones teóricas del módulo, el texto guía en formato PDF y la opción de acceder a la ventana de ejercicios.

The screenshot shows the Reactools website interface for Module 3. The main content area is titled "MÓDULO 3 REACTOOLS" and contains introductory text about the design of chemical reactors. Below the text is a diagram of a reactor and a set of mathematical equations for an example reaction: $A \rightarrow B$. The equations include $N_{A0} \frac{dX}{dt} = -r_A V_R$, $-r_A = kC_A^2$, $C_A = C_{A0}(1-X)$, and $\frac{dX}{dt} = kC_{A0}(1-X)^2$. The page also features a sidebar with navigation options: "REACTOOLS", "NOTICIAS", "Modulo 1", "Modulo 2", "Modulo 3", "Modulo 4", "COMOSOL FOR DUMMIES", and "CONTACTO". There are buttons for "PDF" and "PPT" documents, and a video player showing a slide titled "2.2 REACTORES DE MEMBRANAS".

Figura 52: Material didáctico de los módulos en página web de Reactools

La figura 53 representa la interfaz que se maneja para acceder a los ejercicios de simulación de cada módulo. Incluye (Si el ejercicio lo requiere) un video tutorial directamente elaborado en la interfaz de la herramienta de simulación estudiada y el link directo al gestor de descargas 4Shared para acceder a los archivos de simulación y documentación adicional de cada ejercicio.



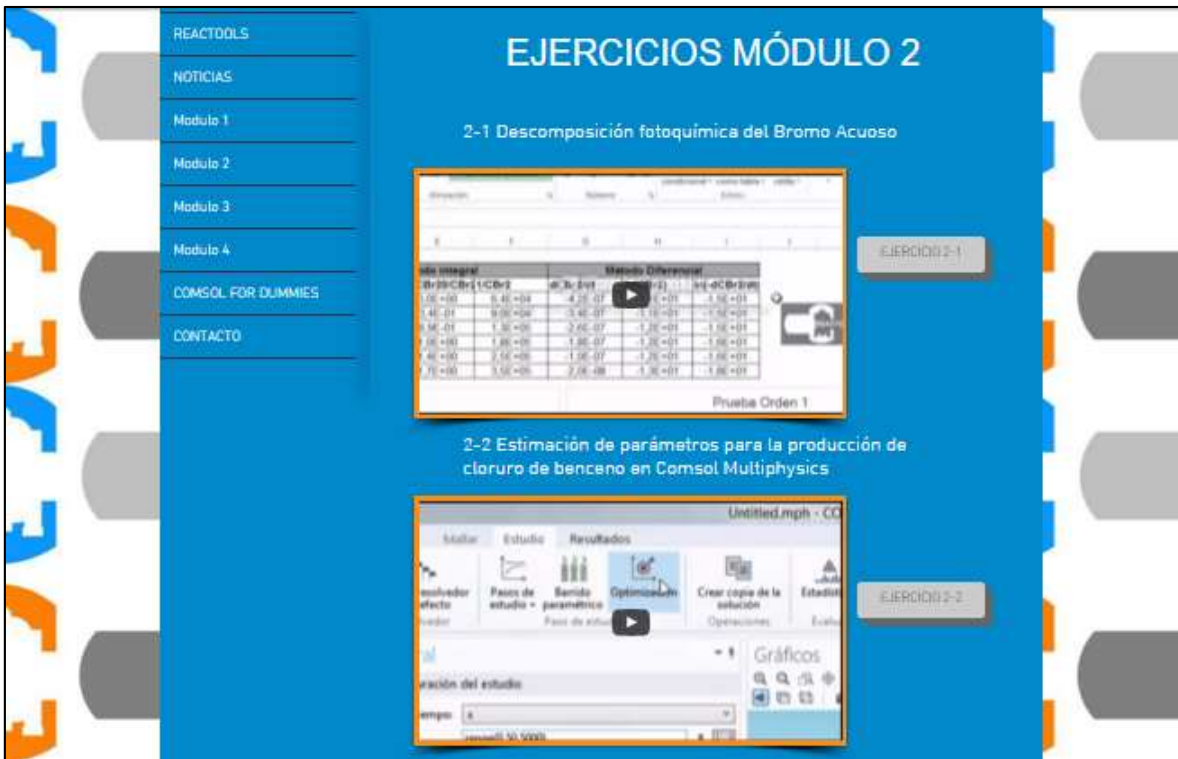


Figura 53: Acceso a los ejercicios de cada módulo en página web de Reactools

La figura 54 presenta la sección en donde se puede encontrar toda la información acerca del curso que se realizó como fase de implementación de Reactools “Comsol for Dummies”. Puede encontrarse al navegar en este menú, las presentaciones manejadas, videos tutoriales de cada sesión, así como las grabaciones completas de las clases, archivos de simulación y textos guías.



Figura 54: Sección del curso “Comsol for Dummies” desde la página web de Reactools



Finalmente, la figura 55 muestra la sección de contacto en donde los estudiantes pueden enviar cualquier inquietud ya sea del tipo académica o logística para ser atendida por el gestor de la página web.



Figura 55: Sección contacto de la página web de Reactools

5.6.2. Gestor de descargas (4Shared®) para acceder a los ejercicios

Al momento de acceder a los archivos de simulación de un ejercicio de Reactools determinado, es necesario manejar el gestor de descargas 4Shared. Inmediatamente, el estudiante hace click en el botón de un ejercicio dado de Reactools, es llevado al gestor de descargas, la figura 56 es una captura de pantalla de lo que el estudiante puede visualizar una vez accede a los ejercicios. Se aprecia que todos los archivos relativos a un ejercicio se encuentran en una carpeta en la web; basta con darle click al botón "Descargar" para tener acceso a los archivos. No se requiere la creación de una cuenta en 4Shared para tener acceso a los archivos.





Figura 56: Gestor de descargas 4shared para el acceso a los ejercicios de Reactools

De esta manera funciona la interfaz de la página web de Reactools y se tiene acceso a los archivos, al ser un dominio web gratuito, existe la posibilidad de experimentar publicidad adicional en el momento de acceder a algunos contenidos del portal web.



6. IMPLEMENTACIÓN Y EVALUACIÓN DEL MATERIAL DIDÁCTICO

En la sección a continuación se presentan los resultados de toda la fase de implementación del material didáctico a través del curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos, Comsol for Dummies”. Esta sección inicialmente presenta la convocatoria realizada, así como todas las presentaciones que tuvo el proyecto en congresos de ingeniería química a nivel nacional e internacional. Posteriormente, se presenta como tal el contenido específico de cada una de las sesiones del curso y finalmente se muestran los resultados de la percepción que tuvieron los estudiantes con respecto al curso.


6.1. Resultados de la convocatoria curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”

La convocatoria al curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” o “Comsol for Dummies”, se llevó a cabo durante la III Jornada Técnica de Ingeniería Química y Biológica Procesa, 2015, llevada a cabo en la Universidad Nacional de Colombia, Sede Medellín. Se invitó a participar a todos aquellos que estén interesados en aprender a simular reactores químicos en Comsol Multiphysics®, independientemente si tuviesen conocimientos previos de diseño de reactores, ya que durante cada sesión virtual se profundizará sobre la teoría correspondiente. El material gráfico que se implementó durante la convocatoria se presenta en la figura 57. En el anexo A se presenta una lista detallada de las personas inscritas al curso.

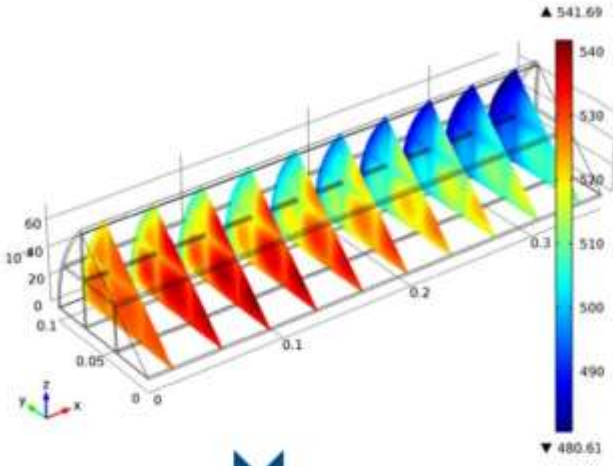


CURSO

COMSOL MULTIPHYSICS®



“Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”



¿QUIÉNES PUEDEN PARTICIPAR?

Todos los que deseen aprender Comsol Multiphysics® con un enfoque al diseño de reactores químicos

Comsol Multiphysics® es un simulador de fenómenos físicos y químicos. Cuenta con un módulo especializado en el diseño de reactores químicos, permitiendo integrar múltiples físicas en una misma simulación

¿CUÁNDO ES EL CURSO?

Del 11 al 25 de mayo del 2015 en la Sede Bogotá de la Universidad Nacional de Colombia


¡EL CURSO NO TIENE COSTO ALGUNO!

Mayores Informes:

nfrincons@unal.edu.co
diprinconva@unal.edu.co
3002857218
3107571409

¿CÓMO PUEDEN PARTICIPAR?

Asistiendo a los talleres presenciales o a través de los webinarios virtuales.



Con el apoyo de:








Figura 57: Publicidad diseñada para la convocatoria del curso “Comsol for Dummies”



6.1.1. Presentación durante la tercera Jornada Técnica Procesa 2015 en la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín

La primera presentación pública que tuvo el proyecto Reactools fue durante la III Jornada Técnica de Ingeniería Química e Ingeniería Biológica, Procesa 2015. El proyecto Reactools gana una mención de honor por ser uno de los proyectos ganadores durante el Concurso de Ponencias llevado a cabo durante el evento académico.

El espacio de la Jornada técnica fue de vital importancia para la difusión del proyecto y la concientización a nivel nacional por parte de los estudiantes de ingeniería química de la necesidad de integrar las herramientas de simulación computacional a los procesos de aprendizaje de diseño de reactores químicos.



Figura 58: Reconocimiento al Proyecto Reactools durante la III Jornada Técnica de Ingeniería Química e Ingeniería Biológica



6.1.2. Presentación durante el XXV Encuentro Nacional de Estudiantes de ingeniería química

El segundo evento público en donde se presentó el proyecto Reactools fue el XXV Encuentro Nacional de Estudiantes de Ingeniería Química, celebrado en la Universidad del Atlántico, Barranquilla. El proyecto participó en el concurso de ponencias del evento en el área de diseño y simulación de procesos. Fue evaluado por tres jurados especializados en el tema, su evaluación final se presenta en la figura 59.

La participación en este evento, permitió por primera vez mostrarle al público los resultados de la fase de implementación del proyecto, con el ánimo de motivar a futuras estudiantes de diseño de reactores a implementar Reactools dentro de sus recursos de aprendizaje.





ENEIQ
XXV 2015
BARRANQUILLA

Universidad
del **Atlántico**

CONCURSO DE PONENCIAS Y DE POSTERS

DIQ-04

EVALUACIÓN DE RESÚMENES

1. INFORMACIÓN

TÍTULO	DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN MATERIAL DIDÁCTICO PARA LA ENSEÑANZA DE INGENIERÍA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS
PONENTES	NELSON FELIPE RINCÓN SOTO
UNIVERSIDAD	UNIVERSIDAD NACIONAL – SEDE BOGOTÁ

2. CALIFICACIÓN TOTAL

EVALUADOR	CALIFICACIÓN
Evaluador No. 1	4,60
Evaluador No. 2	5,00
Evaluador No. 3	4,10
	4,57

Figura 59: Apreciaciones del proyecto Reactools según los jurados del XXV ENEIQ



6.1.3. Presentación durante el XXI Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química

La presentación del proyecto Reactools durante el XXI Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química celebrado en la Ciudad Antigua de Guatemala, permitió al proyecto darse a conocer a nivel internacional y presentar los resultados de la implementación de las herramientas de simulación en los procesos de aprendizaje de ingeniería de las reacciones químicas. El proyecto participó en el concurso de ponencias del congreso y obtuvo el segundo lugar dentro de todos los proyectos que se presentaron.



Figura 60: Premio al proyecto Reactools durante el XXI Congreso Latinoamericano de Estudiantes de Ingeniería Química

6.1.4. Resultados de la inscripción al curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”

Los resultados de la fase de implementación de Reactools se dividen en tres partes: Convocatoria y eventos, contenidos de los módulos virtuales, y evaluación del material didáctico. Hasta el momento se han presentado los resultados de la participación del proyecto en los eventos de ingeniería y los resultados de la publicidad de la fase experimental.



En esta sección se presentarán los resultados generales de la convocatoria realizada. Para consultar el detalle de los inscritos al curso “Comsol for Dummies”, remitirse al Anexo A. El curso contó con la participación de 92 estudiantes, provenientes de 4 Universidades a nivel nacional. El 52% de los estudiantes ya había cursado una asignatura referente al diseño de reactores. El recuadro 17 presenta los resultados generales de la convocatoria.

Universidad	Número de Participantes
Universidad de Cartagena	2
Universidad del Atlántico	39
Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá	46
Universidad Nacional de Colombia sede Manizales	5
Total	92

Recuadro 17: Resultados generales convocatoria curso “Comsol for Dummies”

Una vez inscritos los estudiantes al curso, se procede como tal con las clases a través de la plataforma Anymeeting. Toda la información que se le entrega a los asistentes para la instalación de Comsol Multiphysics versión 4.4, y los pasos para acceder a las sesiones virtuales, así como la información preliminar al curso se presenta en los anexos B y C.

6.2. Descripción detallada del curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”

La descripción detallada de los contenidos brindados a los estudiantes en el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos” se presenta en el sitio web del Proyecto Reactools. El recuadro 18 resume los puntos más importantes que se trataron en cada una de las sesiones. Las grabaciones completas de las sesiones desarrolladas, así como todo el material de cada una (Incluidos tutoriales en .PDF del manejo de Comsol, presentaciones en PowerPoint con los temas de cada sesión y el video animado del manejo de la herramienta), pueden encontrarse en la página web de Reactools

<http://nfrincons.wix.com/reactools#!curso/c2tv>



Recuadro 18, Primera parte

N° Sesión	Título de Sesión	Comsol Multiphysics	Ingeniería de las reacciones químicas
1	Introducción a Comsol Multiphysics	Exploración de la interfaz, desarrollo de un modelo estacionario en 3D importando geometría, aplicación de condiciones de superficie, visualización de resultados en 3D, selección de físicas de trabajo	Esta sesión es de introducción al programa, se abarca un ejercicio clásico que no compete al tema de ingeniería de las reacciones químicas. Se estudian las tensiones generadas sobre una pieza tridimensional al aplicar un esfuerzo constante
2	Introducción a la Ingeniería de las reacciones químicas: Reducción de NO _x en un SRT.	Exploración del módulo de ingeniería de las reacciones químicas, estudios en estado no estacionario, introducción de parámetros de proceso a la interfaz, exploración de resultados en gráficas 1D	Desarrollo de un modelo para la reducción de NO _x con amoníaco en un reactor de mezcla perfecta isotérmico. Concepto de selectividad, análisis del efecto de un exceso de amoníaco en el reactor. Este es el modelo más sencillo de reactor que se trabajará durante el curso
3	Conceptos básicos de cinética química: Determinación de los parámetros de Arrhenius para la descomposición a cloruro de benceno	Exploración del módulo de optimización de parámetros e integración con el módulo de ingeniería de las reacciones químicas	Planteamiento de leyes de velocidad, definición de los parámetros cinéticos y caracterización de la constante de velocidad específica como función de la temperatura. Explicación de los parámetro de Arrhenius y su determinación
4	Diseño de reactores ideales isotérmicos: Producción de Ibuprofeno	Exploración del módulo e ingeniería de la reacciones químicas, visualización de múltiples resultados en 1D y 2D, análisis en estado dinámico	Diseño de reactor isotérmico en estado dinámico para la producción de ibuprofeno, se contemplan múltiples reacciones en la ruta química y se desarrollan las correspondientes expresiones



5	Diseño de reactores ideales no isotérmicos: Arranque de un CSTR	Integración y resolución de balances de masa y energía a través del módulo de ingeniería de las reacciones químicas	Ocurre la descomposición a cloruro de benceno en un reactor CSTR. Se hace un análisis de cómo operará el reactor de acuerdo a la temperatura inicial de la mezcla reaccionante. Se explican las curvas de calor generado del diseño de reactores ideales no isotérmicos
6	Diseño de reactores reales: Modelo real para la reducción de NO _x	Integración de los módulos de transferencia de masa, transferencia de calor y flujo de fluidos para desarrollar modelo real del reactor involucrando geometría tridimensional	Se explican los fenómenos de transferencia de masa, calor y transporte, y cómo estos afectan en la velocidad de reacción y en la temperatura.

Recuadro 18: Temas generales tratados en cada sesión del curso “Comsol for Dummies”

6.3. Resultados evaluación del material didáctico

La evaluación de la fase de implementación del proyecto Reactools, tal como se presenta en la metodología del proyecto, se divide en dos partes: Una evaluación de percepción de los estudiantes y una evaluación de comprensión y aplicación de los conceptos aprendidos por parte de los mismos estudiantes.

La percepción de los estudiantes es evaluada a través de una encuesta que consta de 6 preguntas, que se presentan en la sección de metodología. Los resultados a estas preguntas se presentan en las secciones a continuación. La comprensión y aplicación de los conceptos se evalúa inicialmente a través de 7 preguntas especificadas en la metodología junto al “Concurso de Simulación”, ambos resultados se presentan de igual forma en las secciones subsiguientes.

6.3.1. Resultados Encuesta de percepción de los asistentes

La primera pregunta de la encuesta de percepción evalúa cuántos de los asistentes ya habían tomado cursos en la modalidad virtual. Esta pregunta es importante para identificar si la experiencia que tuvieron los estudiantes fue de entrada diferente con respecto a la experiencia convencional de aprendizaje de Ingeniería de las reacciones químicas.



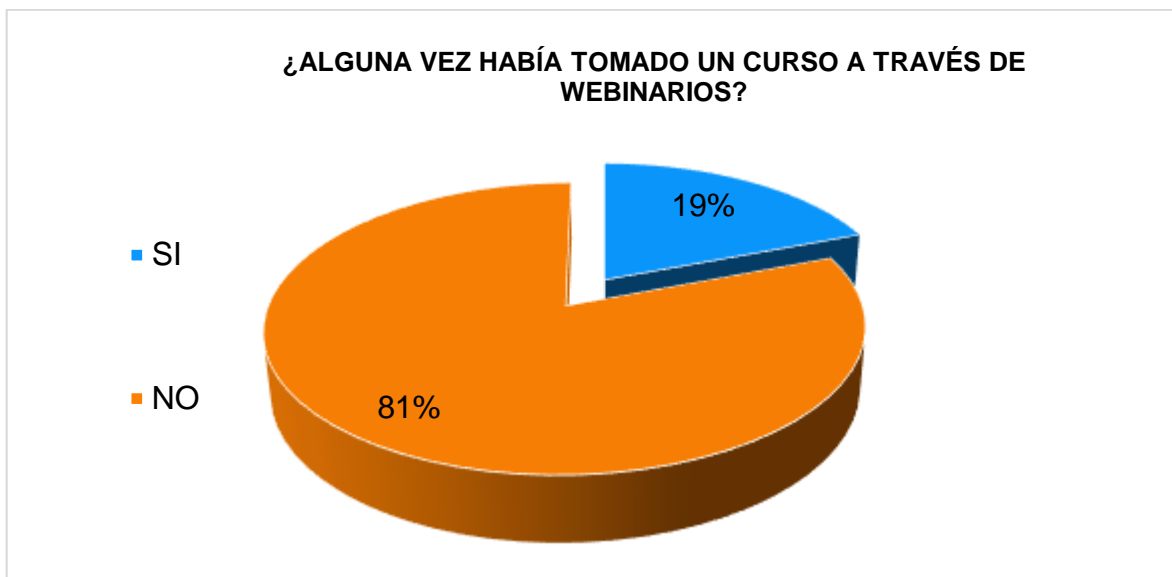


Figura 61: Resultados de la primera pregunta de la encuesta de percepción

La figura 61 presenta como más de un 80% de los asistentes al curso no habían tomado antes un curso en la modalidad virtual, por lo que la experiencia de la mayoría de los asistentes a “Comsol for Dummies” fue nueva.

A partir de este punto, las preguntas se realizan para ser respondidas de acuerdo a una escala valorativa de 1 a 5, a continuación se describe el significado de cada punto en la escala de valoración:

Calificación 1: Califica un total desacuerdo o una puntuación muy deficiente en la pregunta en cuestión.

Calificación 2: Califica un desacuerdo o una puntuación deficiente en la pregunta en cuestión.

Calificación 3: Califica neutralidad o una puntuación aceptable en la pregunta en cuestión.

Calificación 4: Califica un acuerdo o una puntuación sobresaliente en la pregunta en cuestión.

Calificación 5: Califica un total acuerdo o una puntuación excelente en la pregunta en cuestión.

La segunda pregunta de la encuesta apreciativa evalúa la organización temática de Reactools según los participantes del curso. La importancia de esta pregunta radica en el hecho de conocer si los participantes consideran que en general todos los ejes temáticos de Reactools se encuentren ordenados de forma lógica y que esta organización permita elaborar un curso cuyas temáticas sean de impacto para la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas.



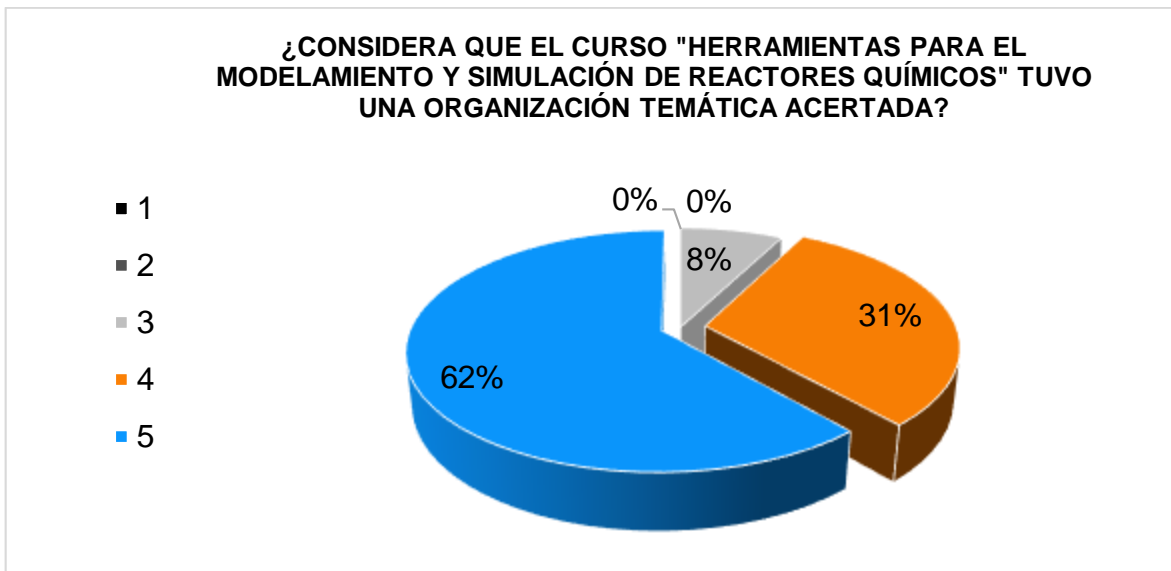


Figura 62: Resultados de la segunda pregunta de la encuesta de percepción

Según la figura 62, más del 60% de los asistentes a “Comsol for Dummies”, considera que la organización temática del curso fue excelente, esto es un claro indicio que el estudio de las necesidades de aprendizaje en Diseño de Reactores presentado en la sección 3.2.3. es coherente con lo que los estudiantes requieren para su formación en la asignatura. La tercera pregunta evalúa aspectos logísticos del curso “Comsol for Dummies”, como que la información suministrada para el proceso de inscripción e instalación del simulador fuese adecuada, que las sesiones empezaran a tiempo y abarcaran toda la temática establecida, que se cumplieran con todas las actividades y evaluaciones programadas, así como que se respondieran cada una de las inquietudes de los participantes del curso.

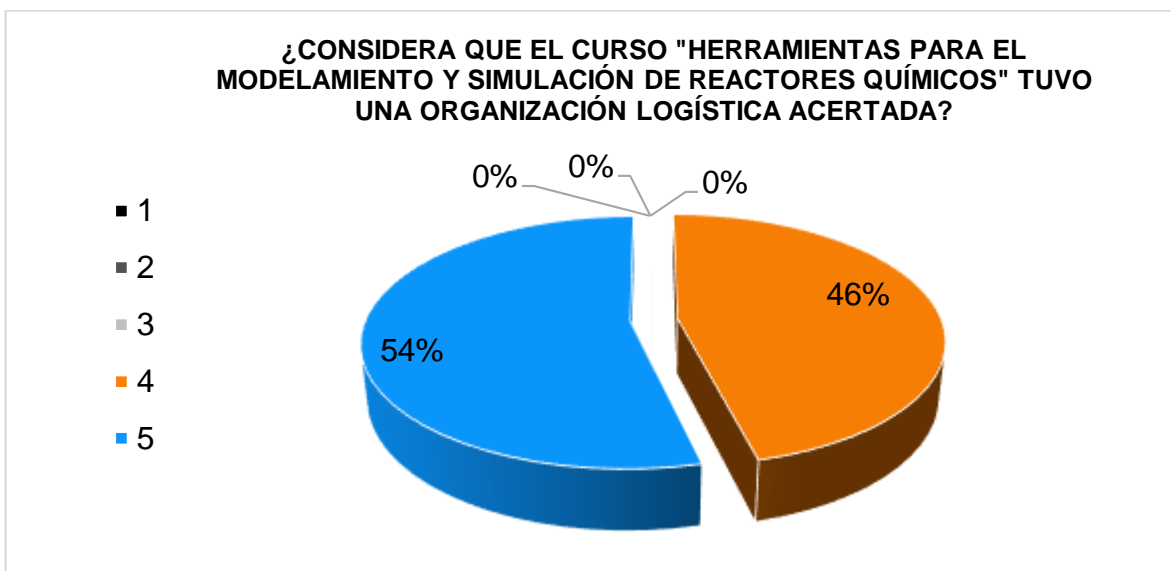


Figura 63: Resultados de la tercera pregunta de la encuesta de percepción



La figura 63 presenta que la logística del curso se encuentra entre un 4 (Sobresaliente) y un 5 (Excelente) según la totalidad de los participantes, un claro indicativo que no hubo contratiempos ni malentendidos durante el desarrollo de “Comsol for Dummies”. La pregunta número 4 de la encuesta de percepción evalúa si el material enseñado en el curso es aplicable en el ejercicio profesional, se realiza con el principal objetivo de identificar si los participantes del curso aprecian el componente de “Ejercicios aplicados a una situación real a nivel industrial”.

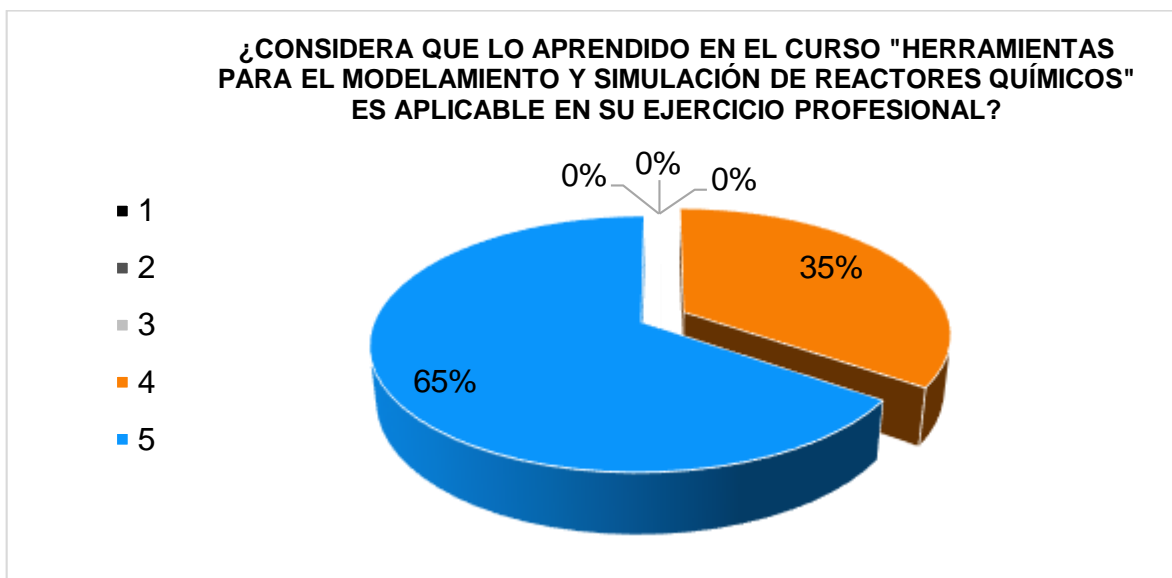


Figura 64: Resultados de la cuarta pregunta de la encuesta de percepción

La figura 64 presenta los resultados de la cuarta pregunta de la encuesta de percepción, en donde se evidencia claramente que en su totalidad, los asistentes de “Comsol for Dummies” están de acuerdo o completamente de acuerdo con el hecho de que los contenidos trabajados en el curso son aplicables al ejercicio profesional, lo que evidencia un claro indicio que los asistentes fueron capaces de identificar que los ejercicios desarrollados fueron diseñados para que correspondan a un contexto industrial. La quinta pregunta evalúa la metodología bajo la cual se llevaron a cabo cada una de las seis sesiones del curso, donde se involucraban unos minutos para recordar las partes más importantes de la sesión anterior, una parte del tiempo a la explicación teórica de los modelos de reactores, otra parte en la ilustración del ejercicio a desarrollar en Comsol, seguido del video tutorial del ejercicio directamente aplicado en la herramienta Comsol Multiphysics® y finalizando con una sesión de preguntas. Ante esta cuestión, los participantes respondieron lo siguiente:



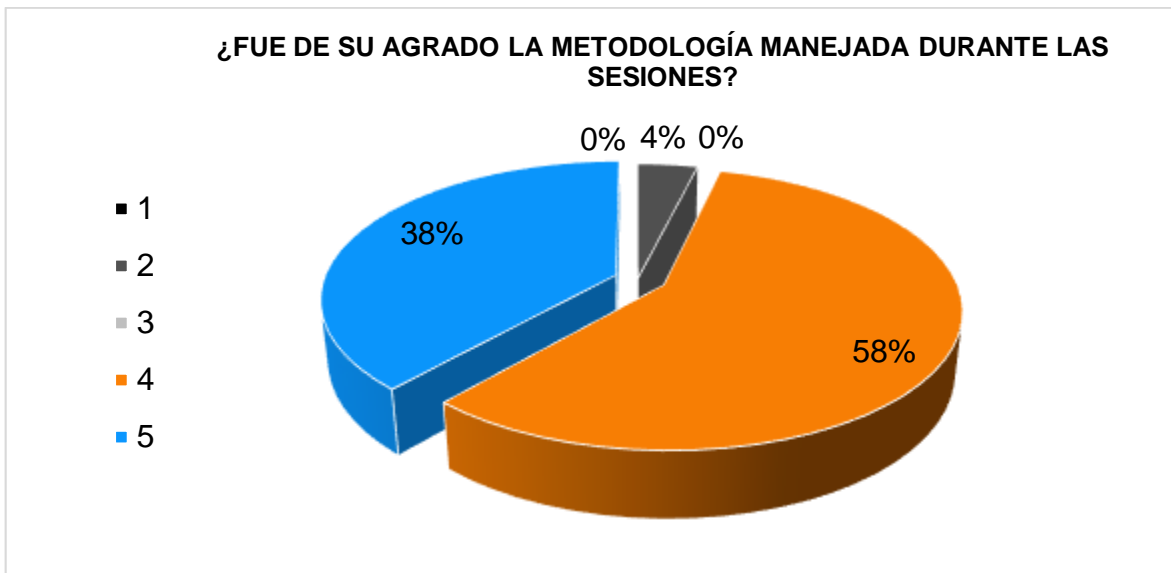


Figura 65: Resultados de la quinta pregunta de la encuesta de percepción

A nivel general, la figura 65 muestra que más de un 95% de los estudiantes están de acuerdo o completamente de acuerdo con la metodología manejada durante el curso “Comsol for Dummies”. La última pregunta de la encuesta de percepción pide a los estudiantes que le otorguen una calificación global al curso según la escala valorativa presentada anteriormente. Ante la pregunta, los estudiantes respondieron lo siguiente:

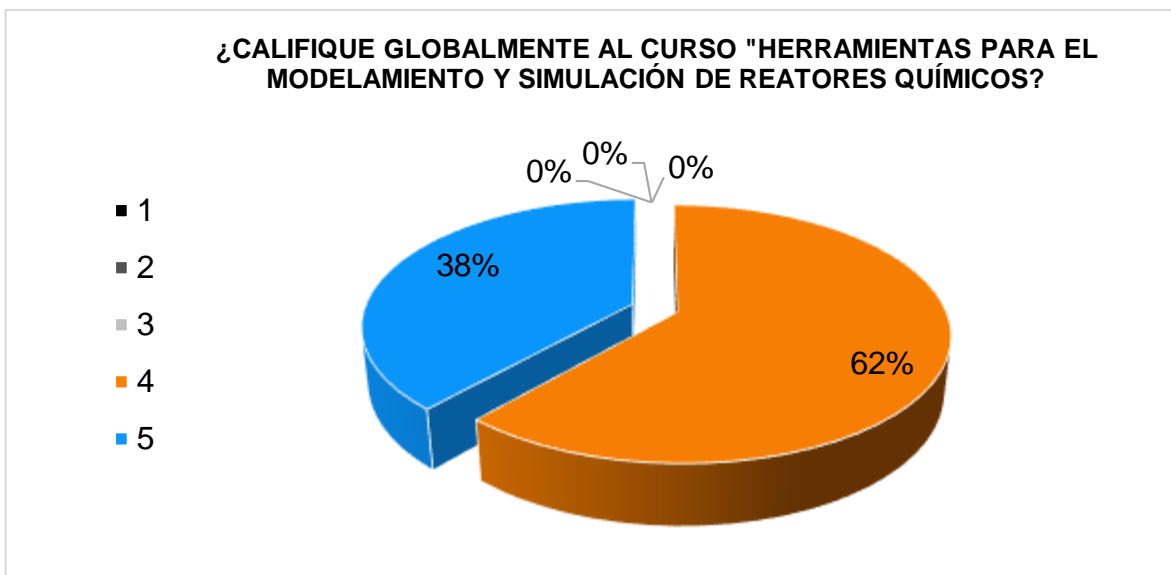


Figura 66: Resultados de la sexta pregunta de la encuesta de percepción



Según la figura 66, un 62% de los estudiantes encuestados considera que el desempeño global del curso fue sobresaliente, mientras que el 38% restante considera que fue un curso excelente. Los resultados de la encuesta de percepción permiten concluir que los estudiantes que estén interesados en diseño de reactores, aceptan de manera apropiada la inclusión de herramientas computacionales en los procesos de aprendizaje. Los soportes a los resultados de esta encuesta se encuentran documentos en las base de datos de la Plataforma Anymeeting, en donde se realizó e implementó la encuesta.

Adicional a la encuesta de percepción, se diseñó una encuesta para que los mismos estudiantes evalúen lo conceptos aprendidos, las preguntas de esta se describen en la metodología. A continuación se presentan los correspondientes resultados:

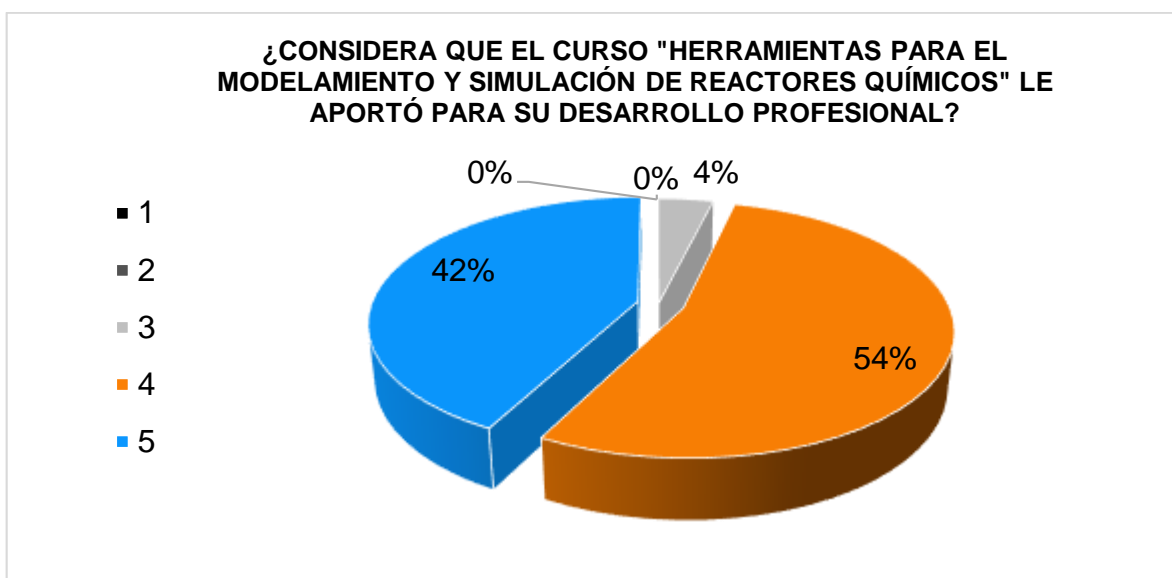


Figura 67: Resultados de la primera pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos

La primera pregunta de la encuesta de evaluación conceptual cuestiona a los participantes si el curso tuvo un aporte a su desarrollo profesional. Para esta pregunta, alrededor del 96% de los estudiantes considera que el curso tuvo un aporte entre sobresaliente y excelente a su desarrollo profesional, siendo un muy buen indicio del enfoque que se le dio a las temáticas del curso. La segunda pregunta de la evaluación conceptual se basa en uno de los pilares del aprendizaje que se presentan en el marco teórico del proyecto Reactools: El pensamiento creativo. Esta pregunta cuestiona si “Comsol for Dummies” contribuyó al desarrollo del pensamiento creativo de los estudiantes, los resultados se presentan a continuación:



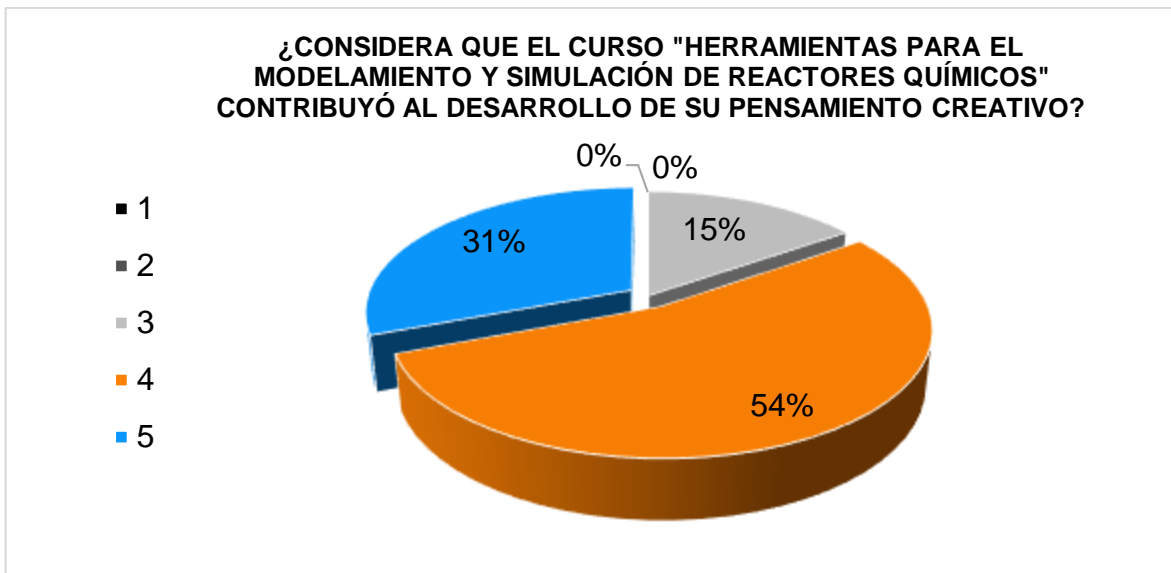


Figura 68: Resultados de la segunda pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos

Según la figura 68, alrededor de un 85% de los estudiantes considera que el curso contribuyó al desarrollo de su pensamiento creativo, lo que es un excelente indicio que el curso cumplió con serle fiel a uno de sus pilares de aprendizaje. La tercera pregunta de la evaluación conceptual se basa en uno de los pilares del aprendizaje que se presentan en el marco teórico del proyecto Reactools: El pensamiento crítico. Esta pregunta cuestiona si “Comsol for Dummies” contribuyó al desarrollo del pensamiento crítico de los estudiantes, los resultados se presentan a continuación:

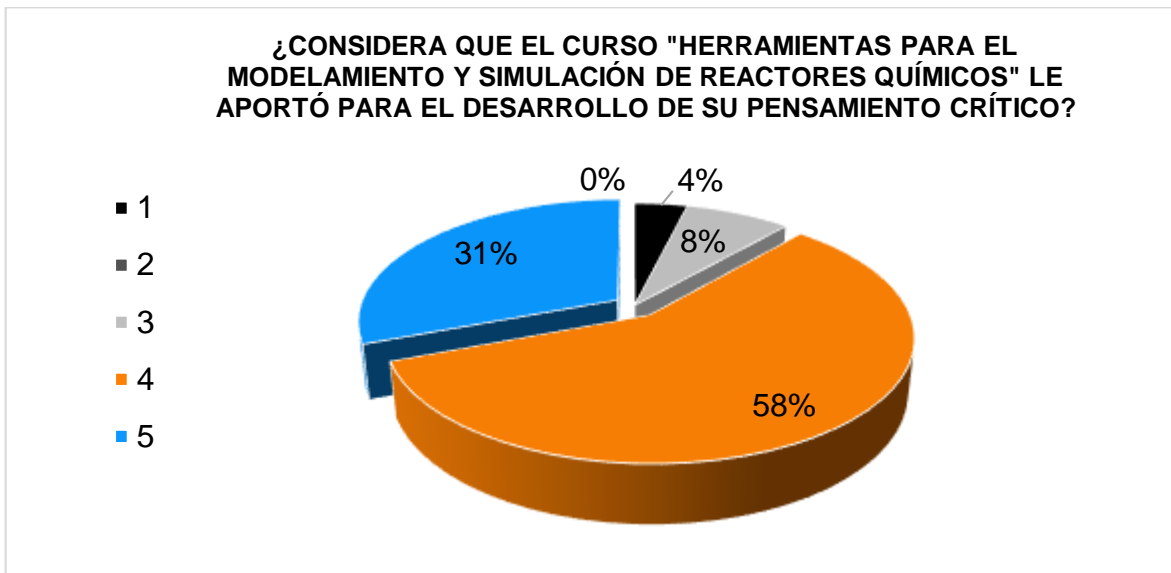


Figura 69: Resultados de la tercera pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos



Según la figura 69, alrededor de un 88% de los estudiantes considera que el curso contribuyó al desarrollo de su pensamiento crítico, lo que es un excelente indicio que el curso cumplió con serle fiel a uno de sus pilares de aprendizaje. La cuarta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos es vital, pues cuestiona a los estudiantes puntualmente en la comprensión de conceptos relativos a Ingeniería de las Reacciones Químicas, esta pregunta se realiza con el objetivo de evaluar la coherencia de la fase de implementación de Reactools con el pilar de “Comprensión de conceptos”. Los estudiantes respondieron lo siguiente:

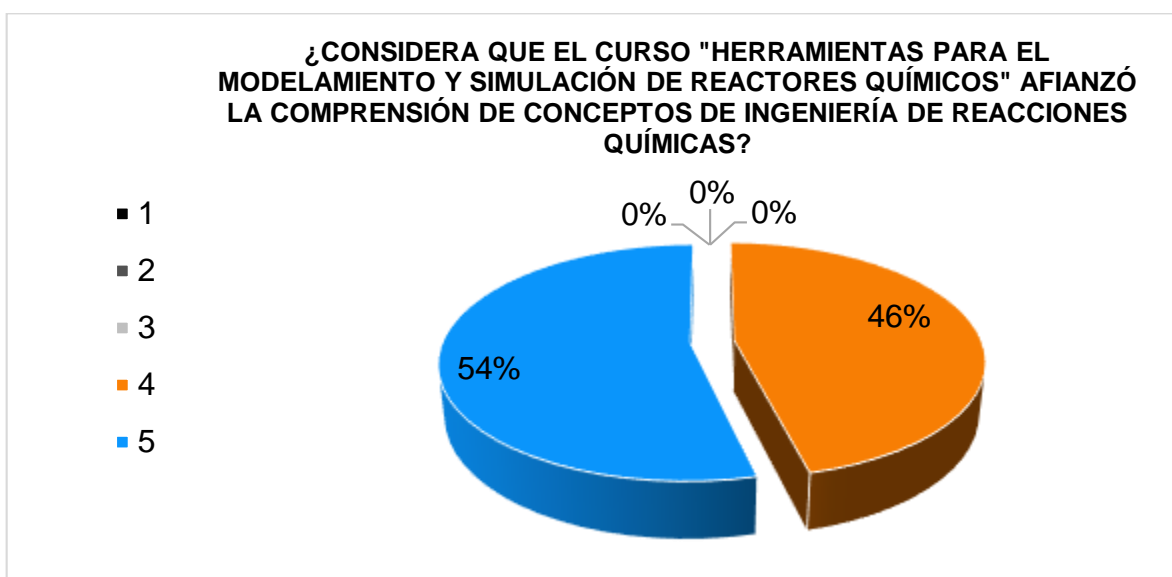


Figura 70: Resultados de la cuarta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos

La figura 70 afirma que todos los estudiantes consideran que “Comsol for Dummies” afianzó los conocimientos conceptuales de ingeniería de las reacciones químicas. Lo que permite concluir que la fase de implementación del proyecto Reactools es coherente con el pilar “Comprensión de Conceptos”. La quinta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos evalúa la motivación hacia la implementación de Comsol Multiphysics para proyectos de ingeniería de las reacciones químicas. Ante esta cuestión, los estudiantes respondieron:



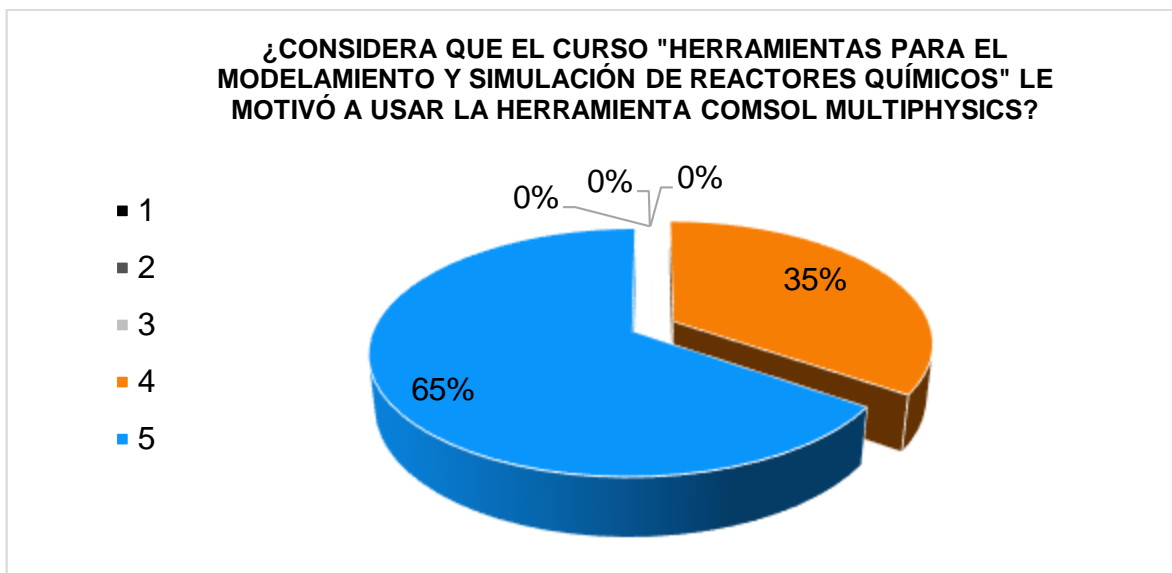


Figura 71: Resultados de la quinta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos

Según la figura 71, la totalidad de los estudiantes se sienten motivados a implementar Comsol Multiphysics en sus proyectos de simulación de reactores químicos, lo que comprueba que los estudiantes en general si están interesados en implementar herramientas de simulación computacional dentro de sus procesos de aprendizaje.

La sexta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos se basa en el pilar de la importancia de las herramientas de simulación en los procesos de aprendizaje de ingeniería de las reacciones químicas, cuestiona a los estudiantes sobre un cambio en la perspectiva con respecto a las herramientas de simulación computacional en el sentido que puedan ser usadas en los procesos de aprendizaje. Ante esta cuestión, los estudiantes respondieron:



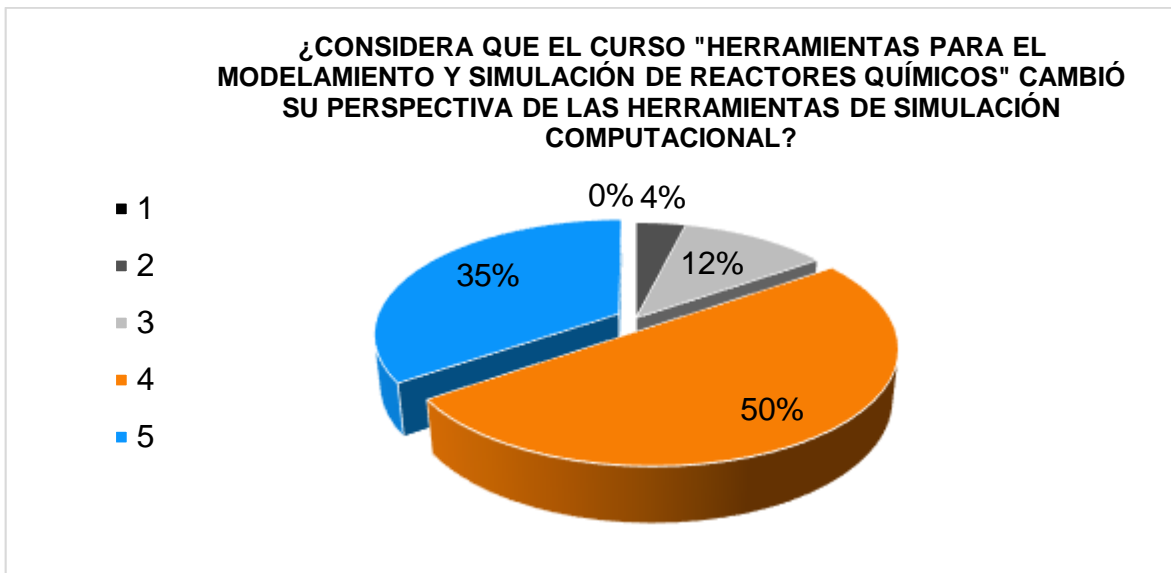


Figura 72: Resultados de la sexta pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos

La figura 72 permite evidenciar que alrededor de un 85% de los estudiantes cambió su perspectiva de las herramientas de simulación computacional una vez realizaron el curso. Esto permite concluir que los estudiantes reconocen ampliamente la importancia de las herramientas de simulación computacional dentro de los procesos de aprendizaje en ingeniería de las reacciones químicas. La última pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos evalúa las destrezas adquiridas por los estudiantes para implementar Comsol Multiphysics® al momento de realizar sus simulaciones. Esta pregunta es de vital importancia porque en esencia cuestiona si aprendieron o no a manejar la herramienta.

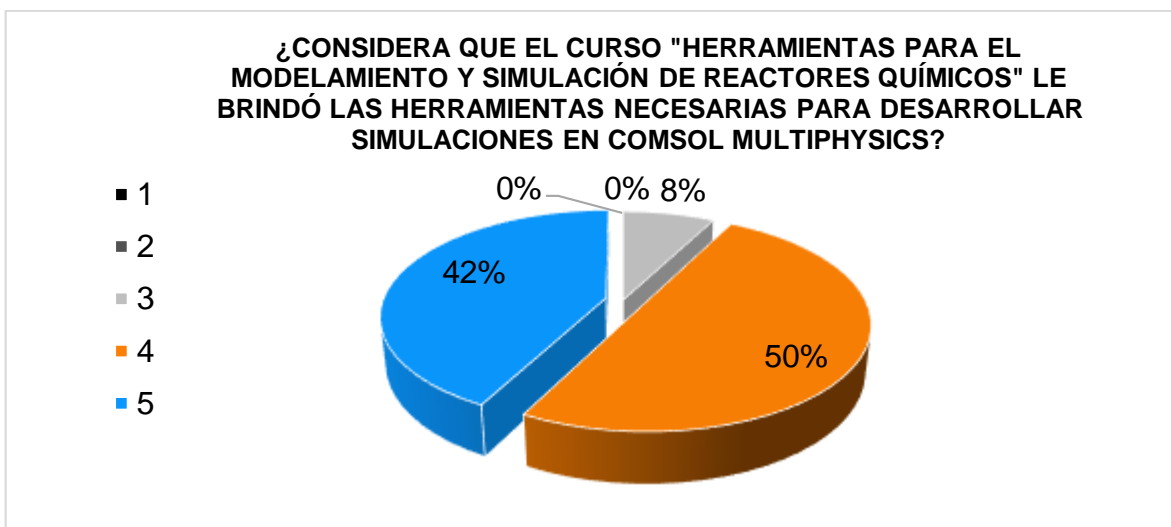


Figura 73: Resultados de la séptima pregunta de la encuesta de evaluación de conceptos



La figura 73 evidencia que más de un 90% de los estudiantes consideran que adquirieron las destrezas necesarias para desarrollar simulaciones usando Comsol Multiphysics®. Esto permite concluir que la parte técnica del manejo de la herramienta fue enseñada correctamente durante “Comsol for Dummies”. Finalmente, para resumir todos los resultados de ambas encuestas, se construye la figura 74 en donde en el eje vertical se enuncia la pregunta correspondiente y en el eje horizontal el promedio en la escala valorativa que le corresponde a cada pregunta.

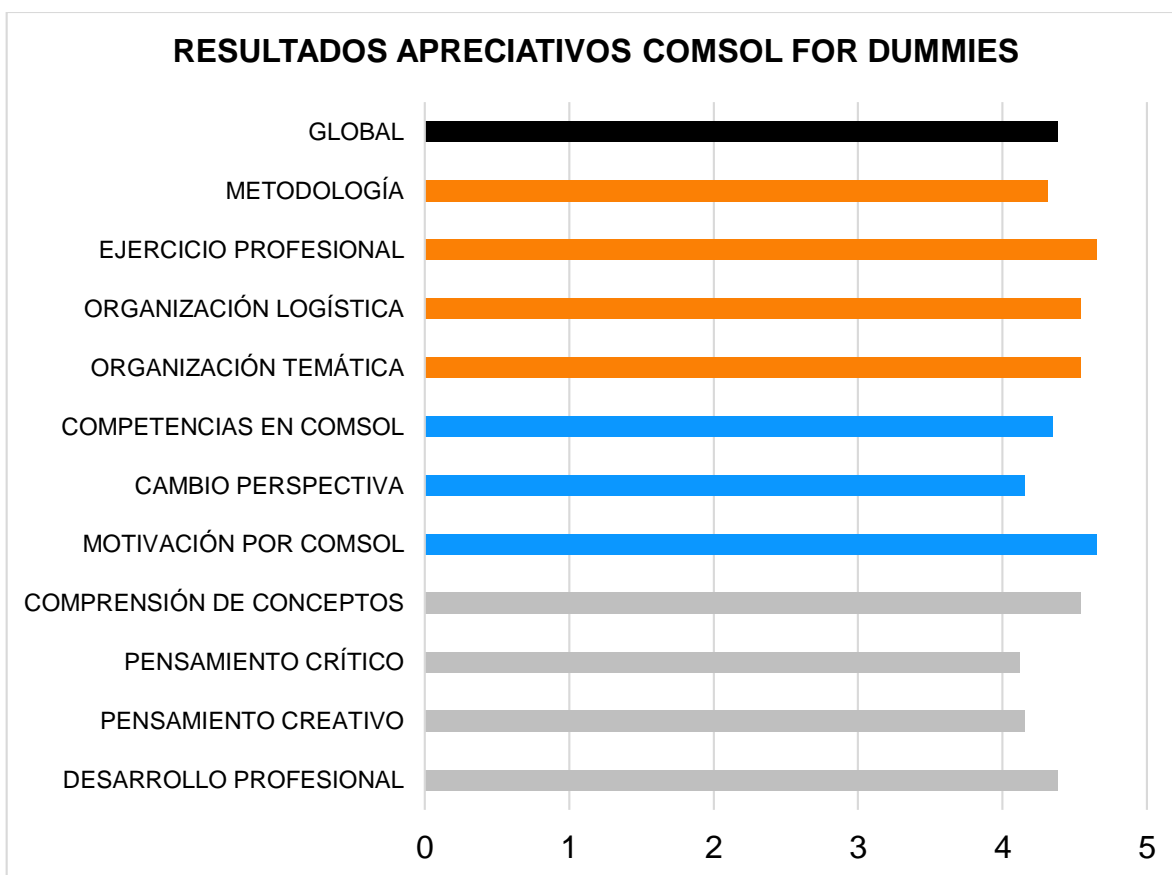


Figura 74: Resumen de resultados de la implementación del proyecto Reactools

En la figura 74 se evidencia que todas las preguntas evaluadas tienen un desempeño superior al sobresaliente (Por encima de 4 al graficar el promedio de cada pregunta), al promediar los resultados de todas las preguntas, se obtiene el resultado “Global” del curso, que se ilustra en la figura 73 con la línea negra, este se encuentra sobre la puntuación sobresaliente, lo que permite concluir que a nivel general el curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos, Comsol for Dummies” fue del agrado de los estudiantes y aportó a sus conocimientos en diseño de reactores y manejo de Comsol Multiphysics®.



6.3.2. Concurso de simulación para evaluación conceptual

El segundo recurso planteado para evaluar la comprensión de conceptos por parte de los estudiantes es el “Concurso de simulación en Comsol Multiphysics®”. Durante el curso, se les informó a los estudiantes del concurso y se les brindó las herramientas y asesoría personalizada para cada uno de los participantes del concurso. A continuación se presentan los resultados de este.

6.3.2.1. Convocatoria para el “Concurso de simulación en Comsol Multiphysics®”

Luego de la convocatoria realizada durante “Comsol for Dummies”, se inscribieron 12 grupos participantes. El recuadro 19 presenta los nombres de los participantes así como la universidad a la que pertenecen y el proyecto que presentaron al concurso de simulación:

Nombre de Integrantes	Universidad	Título del Proyecto
Kevin Mendoza Martín Guerrero	Universidad del Atlántico	Simulación de un reactor para la producción de ácido nítrico en Comsol Multiphysics®
Johana Orjuela Camilo Monroy	Universidad Nacional de Colombia	Simulación de un reactor para la producción de formaldehído en Comsol Multiphysics®
Sebastián Ochoa Erika Corredor	Universidad Nacional de Colombia	Síntesis de Syngas en Comsol Multiphysics®
Jaime Andrés Puello	Universidad de Cartagena	Simulación de un reactor isotérmico para la producción en MEKO en Comsol Multiphysics®
Antohony Morales	Universidad del Atlántico	Simulación de un reactor de saponificación en Comsol Multiphysics®
Santiago Torres Ximena Mora Mayerly Serrano	Universidad Nacional de Colombia	Modelamiento de la producción de etilenglicol a partir de óxido de etileno en Comsol Multiphysics®
Héctor Díaz Jean Pimentel	Universidad Nacional de Colombia	Simulación de un reactor heterogéneo en Comsol Multiphysics®
Rogelio Rodríguez Luis Aguilar	Universidad del Atlántico	Simulación de un reactor para la producción de Estireno en Comsol Multiphysics®
Pavel Hermosa	Universidad Nacional de Colombia	Estudio de mezcladores estáticos en reactores PFR en Comsol Multiphysics®



Recuadro 19, Continuación I

Diana Rincón Laura Aponte	Universidad Nacional de Colombia	Modelamiento y simulación de un reactor para la producción de HI en Comsol Multiphysics®
Juan Pablo Dussán	Universidad Nacional de Colombia	Modelo tridimensional de un reactor de placas en Comsol Multiphysics®
Joel Morales	Universidad Nacional de Colombia	Optimización del proceso de refrigeración de un reactor para la producción de acetaldehído en Comsol Multiphysics®

Recuadro 19: Participantes del Concurso para la evaluación de “Comsol for Dummies”

La información detallada de cada uno de los proyectos participantes del concurso fue compartida en el sitio web del proyecto Reactools a través del enlace:

<http://nfrincons.wix.com/reactools#!propuestas---concurso/c1jri>

En general, los proyectos que se presentaron al concurso de simulación involucraron todos procesos químicos Bidimensionales y algunos modelos tridimensionales de reactores. Desde procesos clásicos como el de producción de ácido nítrico, formaldehído, estireno y Syngas, pasando por procesos de optimización sencillos hasta llegar a modelos tridimensionales de reactores heterogéneos.

6.3.2.2. Resultados del “Concurso de simulación en Comsol Multiphysics®”

Una vez finalizada la sesión del concurso de simulación en Comsol Multiphysics®, se escogieron tres proyectos ganadores con base en los siguientes criterios:

1. Implementación de Herramientas de Comsol Multiphysics®: Haciendo referencia a la utilización correcta de los módulos concernientes al caso de simulación, así como las opciones de visualización de resultados, importación de parámetros, variables y propiedades termodinámicas.

2. Explicación del modelo de reactor simulado en la herramienta: Se evaluó la coherencia del modelo matemático con su correspondiente deducción de acuerdo a las expresiones generales del balance molar y de energía en el momento de la implementación en Comsol Multiphysics®.

3. Innovación y creatividad al momento de presentar los análisis: Se evaluó la capacidad de cada uno de los participantes de analizar de una manera creativa e innovadora la influencia de las variables en el diseño del reactor, siendo capaces de identificar condiciones óptimas de operación y la posibilidad de implementar este tipo de simulaciones en un contexto real.

Teniendo claros los tres criterios de evaluación, se procede a la elección de los proyectos ganadores. Estos se presentan a continuación:





Figura 75: Resultados del proyecto ganador del Tercer Puesto durante el concurso de simulación

El ganador del tercer puesto fue el proyecto “Simulación de un reactor de hidrodealquilación en Comsol Multiphysics®”, presentado por Jaime Andrés Puello Yarce de la Universidad de Cartagena. Este proyecto presentó la simulación de un reactor tubular con un proceso muy conocido en la industria. La innovación de este proyecto recae en el hecho que el estudiante realiza un análisis de sensibilidad con la herramienta “Sensitive Brush” de Comsol Multiphysics® para determinar las condiciones óptimas de temperatura y composición en la entrada del reactor tal que se maximice la conversión. El estudiante analizó de una manera apropiada la influencia de las variables y presentó los resultados de una manera muy didáctica y entendible para el público.



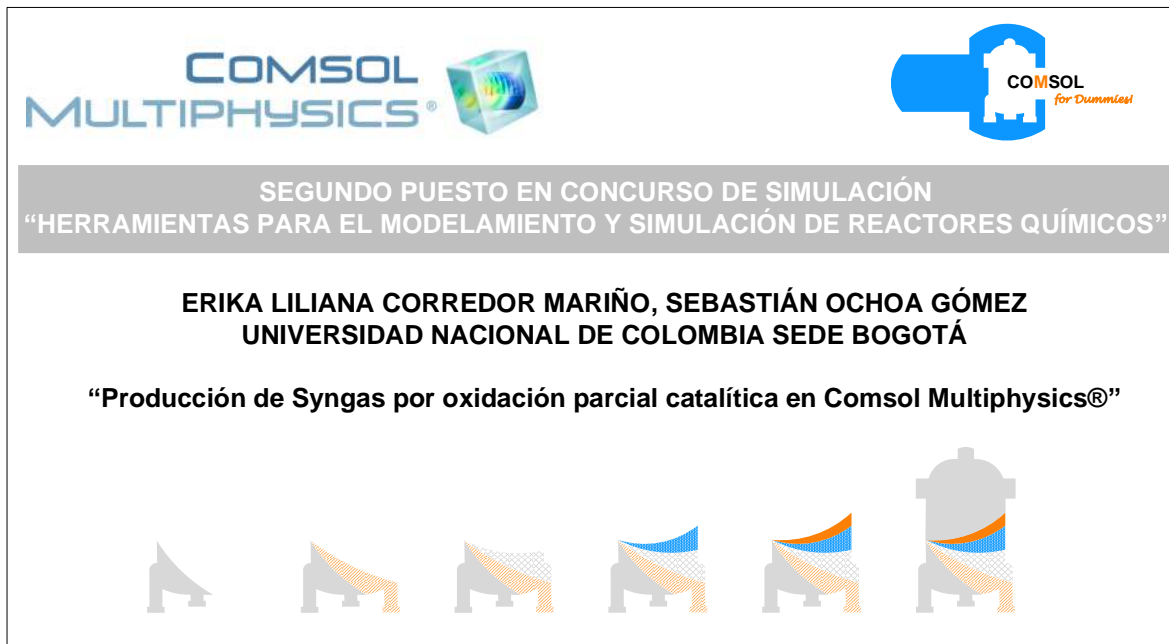


Figura 76: Resultados del proyecto ganador del Segundo Puesto durante el concurso de simulación

El segundo puesto del concurso de simulación lo obtuvo el proyecto “Producción de Syngas por oxidación parcial catalítica en Comsol Multiphysics®”, presentado por los estudiantes Erika Liliana Corredor Mariño y Sebastián Ochoa Gómez. Este proyecto brilló por la claridad en la deducción del modelo partiendo desde las ecuaciones elementales del balance de materia y energía, y por el análisis de sensibilidad a través del barrido paramétrico realizado en Comsol Multiphysics®. También, este equipo logró plantear alternativas para implementar los resultados obtenidos en su simulación en un proceso de la vida real y plantear actividades para optimizar el uso de los reactivos en la planta. Por esta razón obtuvieron el segundo lugar.





Figura 77: Resultados del proyecto ganador durante el concurso de simulación

El proyecto ganador del concurso de simulación corresponde a “Mezcladores estáticos en reactores PFR simulados con Comsol Multiphysics”, presentado por Pavel Ernubis Ramírez Hermosa. Este proyecto se corona como ganador porque implementa herramientas que únicamente Comsol Multiphysics® puede brindar para integrar modelos tridimensionales de flujo de fluidos con ecuaciones de ingeniería de las reacciones químicas. El proyecto estudia la implementación de superficies tridimensionales (Mezcladores estáticos) para alterar la velocidad y la dirección del flujo de mezcla reactiva al interior del reactor, teniendo grandes impactos en la conversión a la salida del reactor. Por este motivo, el proyecto es el ganador del concurso.



7. CONCLUSIONES

- ❏ Se lograron identificar los principales ejes temáticos que se manejan en los cursos de diseño de reactores químicos a nivel nacional e internacional, a través de una investigación de necesidades de aprendizaje para posteriormente diseñar un material didáctico que fuese coherente con éstos. Los ejes temáticos elementales corresponden a: Introducción a los modelos de reactores químicos, fundamentos de cinética química, diseño de reactores isotérmicos y diseño de reactores no isotérmicos.
- ❏ Se identificaron e implementaron herramientas de simulación computacional para la resolución de casos de diseño de reactores químicos. Las herramientas seleccionadas para implementar durante el material fueron: Comsol Multiphysics®, Microsoft Excel®, Aspen HYSYS®, MatLab/Simulink® y TableCurve 2D®
- ❏ Se logró recopilar, organizar y adaptar la información presente en la literatura sobre los ejes temáticos manejados en cursos de diseño de reactores a través del material desarrollado presente en el sitio web: <http://nfrincons.wix.com/reactools>, de tal manera que es de fácil acceso para los estudiantes, docentes y demás interesados en el diseño de reactores químicos.
- ❏ Se logró Implementar el material didáctico en un grupo de estudiantes de ingeniería química, concluyendo que los mismos estudiantes reconocen la importancia de las herramientas de simulación computacional en los procesos de aprendizaje de diseño de reactores químicos y que están muy abiertos y dispuestos a implementarlas. Esta afirmación se soporta con base en los resultados de las encuestas de percepción y conceptos, junto al concurso de simulación desarrollado.
- ❏ A nivel general, el Proyecto Reactools permitió diseñar e implementar un material didáctico para la enseñanza de ingeniería de las reacciones químicas a nivel de pregrado, involucrando las herramientas de simulación computacional más frecuentadas en el diseño de reactores químicos, destacando la importancia de una continua innovación y actualización en el material de aprendizaje en el diseño de reactores químicos.

“No hay que temer a nada en esta vida, sólo hay que entenderlo.”
Marie Curie



8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R.W. Paul, "Critical Thinking". Santa Rosa, Cal.: Foundation for Critical Thinking, (1992)
- [2] B.K. Scheffer y M.G. Rubenfield, "Critical Thinking: What is it and How do we teach it?". Current Issues in Nursing (2001)
- [3] H.S. Fogler y S.E. LeBlanc, "Strategies for Creative Problem Solving". Upper Saddle River, N.J. Prentice Hall, (1995)
- [4] Reaction kinetics for Chemical engineers [imagen]. Tomado de <http://ebooksacademicos.blogspot.com.co/2015/01/reaction-kinetics-for-chemical.html>. 21 de Octubre de 2015.
- [5] S.M. Walas. "Reaction kinetics for Chemical Engineers". California, ed. Butterworths. (1959)
- [6] Elementary Chemical Reactor Analysis [imagen]. Tomado de <http://www.amazon.com/Elementary-Chemical-Reactor-Analysis-Butterworths/dp/0409902217>. 22 de Octubre de 2015
- [7] R. Aris. "Elementary Chemical Reactor Analysis". Minnessota, ed. Dover Pubn Inc. (1969)
- [8] Chemical Engineering kinetics [imagen]. Tomado de <http://www.amazon.com/Chemical-Engineering-Kinetics-J-M-Smith/dp/0070665745>. 22 de Octubre de 2015
- [9] J.M. Smith. "Chemical Engineering Kinetics". US, ed. McGraw-Hill Inc. (1980)
- [10] Chemical Reactor analysis and design [imagen]. Tomado de <http://www.amazon.es/Chemical-Reactor-Analysis-Gilbert-Froment/dp/0470565411>. 22 de Octubre de 2015
- [11] G.F. Froment, K.B. Bischoff, J. De Wilde. "Chemical Reactor analysis and design". US, ed. John Wiley & Sons Inc. (1990)
- [12] Chemical Reaction Engineering [imagen]. Tomado de <http://www.vedamsbooks.com/no79593/chemical-reaction-engineering-3rd-ed-octave-levenspiel>. 22 de Octubre de 2015
- [13] O. Levenspiel. "Chemical Reaction Engineering". US, ed Wiley Inda. (1999)
- [14] Fundamentals of chemical reaction Engineering [imagen]. Tomado de www.ebookks/chem.net. 22 de Octubre de 2015
- [15] M.E. Davis, R.J. Davis. "Fundamentals of chemical reaction Engineering". US, ed. McGraw-Hill (2003)



- [16] Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas [imagen]. Tomado de <http://www.amazon.com/Elements-Chemical-Reaction-Engineering-Edition/dp/0130473944>. 23 de Octubre de 2015.
- [17] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. Prentice Hall International. (2006)
- [18] Universidad de Michigan, Programa de ingeniería Química. [Información]. Tomado de <http://www.engin.umich.edu/che>. 25 de Octubre de 2015
- [19] Logo de la Universidad de Michigan [Imagen]. Tomado de https://en.wikipedia.org/wiki/University_of_Michigan. 25 de Octubre de 2015
- [20] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. Prentice Hall International. Páginas 15-16 (2006)
- [21] Logo Universidad de los Andes [Imagen]. Tomado de <http://fisicaexpdemostrativos.uniandes.edu.co/>. 01 de Noviembre de 2015
- [22] Universidad de los Andes, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información]. Tomado de: <https://ingquimica.uniandes.edu.co/>. 27 de Octubre de 2015
- [23] Logo Universidad de Pamplona [Imagen]. Tomado de <http://www.zoomcanal.com.co/IES%20Afiliadas/entidades/46/>. 01 de Noviembre de 2015
- [24] Universidad de Pamplona, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: http://www.unipamplona.edu.co/unipamplona/portallG/home_1/recursos/facultades/ingenierias/31052009/ing_quimica.jsp. 27 de Octubre de 2015
- [25] Logo Universidad de San Buenaventura [Imagen]. Tomado de <http://web.usbmed.edu.co/colillas/iniciarcol.php>. 01 de Noviembre de 2015
- [26] Universidad de San Buenaventura, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://ingenieria.usbcartagena.edu.co/programas/pregrado/ingenieria-quimica>. 27 de Octubre de 2015
- [27] Logo Universidad del Atlántico [Imagen]. Tomado de <http://moir.org.co/Bienvenidos-a-la-Universidad-del.html>. 01 de Noviembre de 2015
- [28] Universidad del Atlántico, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://www.uniatlantico.edu.co/uatlantico/docencia/ingenieria/programas/ingenieria-quimica>. 27 de Octubre de 2015



[29] Logo Universidad de la Sabana [Imagen]. Tomado de <https://twitter.com/unisabana>. 01 de Noviembre de 2015

[30] Universidad de la Sabana, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://www.unisabana.edu.co/carreras/ingenieria-quimica/ingenieriaquimica/>. 27 de Octubre de 2015

[31] Logo Universidad de América [Imagen]. Tomado de <http://empleos.universia.net.co/fichaempresa/idempresa/654075/fundacion-universidad-de-america.html>. 01 de Noviembre de 2015

[32] Universidad de América, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://www.uamerica.edu.co/programas-academicos/pregrado/ingenieria-quimica/>. 27 de Octubre de 2015

[33] Logo Universidad Jorge Tadeo Lozano [Imagen]. Tomado de <http://www.utadeo.edu.co/es>. 01 de Noviembre de 2015

[34] Universidad Jorge Tadeo Lozano, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://www.utadeo.edu.co/es/facultad/ciencias-naturales-e-ingenieria/programa/layout-1/ingenieria-quimica>. 27 de Octubre de 2015

[35] Logo Universidad de Antioquia [Imagen]. Tomado de <http://www.zoomcanal.com.co/IES%20Afiliadas/entidades/2/>. 02 de Noviembre de 2015

[36] Universidad de Antioquia, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://portal.udea.edu.co/wps/portal/udea/web/inicio/institucional/unidades-academicas/facultades/ingenieria>. 28 de Octubre de 2015

[37] Logo Universidad de Cartagena [Imagen]. Tomado de <http://www.intersoftware.org.co/content/ceiba-software-y-sus-ultimas-noticias>. 02 de Noviembre de 2015

[38] Universidad del Cartagena, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://www.unicartagena.edu.co/index.php/programa-ingenieria-quimica#.VtmtzZzhDIU>. 28 de Octubre de 2015

[39] Logo Universidad del Valle [Imagen]. Tomado de: <http://www.univalle.edu.co/la-universidad/nuestros-simbolos/manual-de-identidad-visual-corporativa>. 02 de Noviembre de 2015



[40] Universidad del Valle, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://ing-quimica.univalle.edu.co/>. 28 de Octubre de 2015

[41] Logo Universidad Nacional de Colombia [Imagen]. Tomado de https://es.wikipedia.org/wiki/Universidad_Nacional_de_Colombia. 02 de Noviembre de 2015

[42] Universidad Nacional de Colombia, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://www.admisiones.unal.edu.co/home/pregrado/programas-curriculares-pregrado>. 28 de Octubre de 2015

[43] Logo Universidad Pontificia Bolivariana [Imagen]. Tomado de http://orientacion.universia.net.co/que_estudiar/universidad-pontificia-bolivariana-11.html. 03 de Noviembre de 2015

[44] Universidad Pontificia Bolivariana, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: http://www.upb.edu.co/portal/page?_pageid=1054,32443046&_dad=portal&_schema=PORTAL. 29 de Octubre de 2015

[45] Logo Universidad Tecnológica del Bolívar [Imagen]. Tomado de <http://www.zoomcanal.com.co/entidades/35/>. 03 de Noviembre de 2015

[46] Universidad Tecnológica del Bolívar, Programa ingeniería Química, asignatura diseño de reactores [Información] Tomado de: <http://programas.unitecnologica.edu.co/ingenieria-quimica-tags>. 29 de Octubre de 2015

[47] Logo AspenTech® [Imagen]. Tomado de: <http://www.sabisu.co/uses/failure-prediction/>. 01 de Noviembre de 2015

[48] Logo TableCurve 2D®. Tomado de: <http://www.sigmaplot.co.uk/products/tablecurve2d/tablecurve2d.php>. 01 de Noviembre de 2015

[49] Logo Microsoft Excel 2D®. Tomado de: <https://www.domo.com/connectors/excel>. 01 de Noviembre de 2015

[50] Logo Matlab®. Tomado de: <http://www.566intern.com/resume>. 01 de Noviembre de 2015

[51] Logo Comsol Multiphysics® [Imagen]. Tomado de: <https://www.cambridgenetwork.co.uk/news/comsol-conference-2012-milan-call-for-papers/>. 01 de Noviembre de 2015

[52] Información básica de AspenTech® [Información adaptada]. Tomada de: <https://www.aspentech.com/>. 03 Noviembre de 2015



- [53] Información básica de TableCurve 2D® [Información adaptada]. Tomada de: <https://www.addlink.es/productos/software/tablecurve-2d-detail>. 03 Noviembre de 2015
- [54] Información básica de Microsoft Excel® [Información adaptada]. Tomada de: <https://products.office.com/es/excel>. 03 Noviembre de 2015
- [55] Información básica de Matlab® [Información adaptada]. Tomada de: <http://www.mathworks.com/products/matlab/?requestedDomain=www.mathworks.com>. 03 Noviembre de 2015
- [56] Información básica de Comsol Multiphysics® [Información adaptada]. Tomada de: <https://www.comsol.com/>. 03 Noviembre de 2015
- [57] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (2006). (P1-6, H. Scott Fogler)
- [58] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (2006). (P2-2, H. Scott Fogler)
- [59] Schmidt, L. D. “The Engineering of Chemical Reactions”. US, ed 2. Prentice Hall International. (2004). (Adaptación P3.63, Lanny D. Schmidt)
- [60] Schmidt, L. D. “The Engineering of Chemical Reactions”. US, ed 2. Prentice Hall International. (2004). (Adaptación ejemplo 3-8, Lanny D. Schmidt)
- [61] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (2006). (P2-9, H. Scott Fogler)
- [62] G. Schaub, D. Unruh. “Chemical Engineering and Processing: Process Intensification”. US, ed. 3. Limusa Wiley. (2003). (P 3-65, G. Schaub, D. Unruh,)
- [63] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (2006). (P5-9B, H. Scott Fogler)
- [64] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (E 3-1, H. Scott Fogler)
- [65] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (P 4-26, H. Scott Fogler)
- [66] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (P 4-26, H. Scott Fogler)
- [67] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (P 6-16, H. Scott Fogler)
- [68] Fogler, H. S. “Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas”. US, ed. 4. Prentice Hall International. (P 6-26, H. Scott Fogler)



- [69] R.V. Chaudhari, "Catalysis Today". 2010, Auto-engineering publications (R.V. Chaudhari, Catalysis Today)
- [70] Supercritical water gasification of glycerol: Intermediates and kinetics. Simao Guo, Liejin Guo, Jiarong Yin, Hui Jin. The Journal of Supercritical Fluids. 2013
- [71] Fogler, H. S. "Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas". US, ed. 4. Prentice Hall International. (P 8-10, H. Scott Fogler)
- [72] Fogler, H. S. "Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas". US, ed. 4. Prentice Hall International. (P 8-15, H. Scott Fogler)
- [73] Fogler, H. S. "Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas". US, ed. 4. Prentice Hall International. (P 8-26, H. Scott Fogler)
- [74] O. Levenspiel, Chemical Reaction Engineering. (1962). New York, Ed. Jhon Wiley and Sons, Pág. 45-70.
- [75] Fogler, H. S. "Elementos de Ingeniería de las Reacciones Químicas". US, ed. 4. Prentice Hall International. (E 9-4, H. Scott Fogler)
- [76] G. Schaub, D. Unruh. "Chemical Engineering and Processing: Process Intensification". US, ed. 3. Limusa Wiley. (2003). (P 3-65, G. Schaub, D. Unruh,)



9. ANEXOS

ANEXO A: Lista de inscritos al curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de reactores químicos”

NOMBRE	UNIVERSIDAD	SEMESTRE	CIUDAD
Diana Paola Rincón Valbuena	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Martín Guerrero Pérez	Universidad del Atlántico	9	Barranquilla
Juan Camilo Solarte Toro	Universidad Nacional de Colombia	10	Manizales
Kevin Alexander Mendoza Salgado	Universidad del Atlántico	9	Barranquilla
Yuli Tatiana Trujillo	Universidad Nacional de Colombia	7	Manizales
Julian Andres Ruiz Mejia	Universidad Nacional de Colombia	3	Manizales
Cindy Natalia López Sandoval	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Diego Andrés Perdomo	Universidad del Atlántico	8	barranquilla
Kevin Johan Zabala Rodríguez	Universidad del Atlántico	9	Barranquilla
Danalejandra Martinez Jimenez	Universidad del Atlántico	8	Barranquilla
David Joel Morales Buitrago	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Stefany Chamorro	Universidad Nacional de Colombia		Bogotá D.C.
Leinis Paola Sará Sarmiento	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Carol Gelvez Fontalvo	Universidad del Atlántico	8	Barranquilla
Natalia Marcela Ramos Castillon	Universidad del Atlántico		Barranquilla
Andrés Felipe Martínez Valencia	Universidad Nacional de Colombia	7	Manizales
Laura Alejandra Gutiérrez Rodríguez	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Carlos Jaime Espinosa Guerra	Universidad de Cartagena	8	Cartagena
Hector Dario Diaz Ortiz	Universidad Nacional de Colombia	11	Bogotá D.C.
Sergio Alejandro Rubio Silva	Universidad Nacional de Colombia	5	Bogotá D.C.
Kevin Klemm Amaya	Universidad Nacional de Colombia	5	Bogotá D.C.
Andrés Javier Bello Hernández	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Lida Marcela Bello Sanchez	Universidad Nacional de Colombia	8	Bogotá D.C.
David Felipe Orjuela Hurtado	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Luna Violeta Castellanos Manosalva	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.



Anexo A, Continuación I

Camilo Antonio Monroy Peña	Universidad Nacional de Colombia	5	Bogotá D.C.
Johana Milena Orjuela Ramos	Universidad Nacional de Colombia	2	Bogotá D.C.
Ginna Marcela Parra Rodríguez	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Daniel Ricardo Gonzalez Villamizar	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Carlos González de Avila	Universidad del Atlántico	5	Barranquilla
Jose Roberto Diaz Mercado	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Miguel Angel Ibarra Montes	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Mayerly Rocío Serrano Bernal	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Ingrid Dallana Morales Zoque	Universidad Nacional de Colombia	8	Bogotá D.C.
Yireh Juliana Carrizosa Landazábal	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Walther Darío Bejarano Peña	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Oscar Yesid Rincón Ortíz	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Rosa Alejandra De la pava Salcedo	Universidad del Atlántico	9	Barranquilla
Tonny Manuel Chaves Muñoz	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Miguel Ibarra	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Jaime Andrés Rodríguez Ramos	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Lina Lorena Paez Baltazar	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Santiago Torres Jaimes	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Antohony alejandro morales ochoa	Universidad del Atlántico	6	Barranquilla
Luisa Fernanda González	Universidad Nacional de Colombia	8	Bogotá D.C.
Jean Pierre Andres Pimentel Losada	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Luis Carlos Rocha Manzano	Universidad del Atlántico	6	Barranquilla
Stefany Carolina Fernandez Rojano	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Kevin Adrián Rodríguez Ruiz	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Andrés Granada	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Edilberto José Fontalvo	Universidad del Atlántico	8	Barranquilla
Ludy Francesca Bula Acuña	Universidad del Atlántico	10	Barranquilla
Eliana Patricia Escorcia Salcedo	Universidad del Atlántico	10	Barranquilla
Liliana Bolivar Bello	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Erika Liliana Corredor Mariño	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Laura Andrea Medina Durán	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.



Anexo A, Continuación II

Carolina Huertas Pinto	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Cristian David Bonilla Candela	Universidad Nacional de Colombia	11	Bogotá D.C.
Julian Leonardo Garcia Pablos	Universidad Nacional de Colombia		Bogotá D.C.
Laura Camila Aponte Gutiérrez	Universidad Nacional de Colombia	6	Bogotá D.C.
Hasbleidy Dayany Ochoa Moreno	Universidad Nacional de Colombia	8	Bogotá D.C.
Joan Sebastián Henao Fontecha	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Marla Alejandra Suarez Fontalvo	Universidad del Atlántico	9	Barranquilla
Luis Enrique Aguilar Pajaro	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Harif Daniel Fontecha	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Rogelio De Jesús Rodríguez Barrios	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Luis Alfonso Molina Cantillo	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Jessica Carolina Romero Fontalvo	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Samira Sarmiento Gonzalez	Universidad del Atlántico	6	Barranquilla
Geraldine Liseth Palacio Morell	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Leslie Vanessa Sánchez Castillo	Universidad Nacional de Colombia	8	Bogotá D.C.
Jorge Luis Grau Pérez	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Angy Milena Leira Ortiz	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Mailenth Irina Cantillo Orozco	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Lina María Montoya Ortega	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Mileinys Milena Miranda Silvera	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Camilo Alejandro Suarez	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Oswaldo Miguel Tovar Corrales	Universidad del Atlántico	8	Barranquilla
Nathalie Sarmiento González	Universidad del Atlántico	7	Soledad, Atlántico
Sebastian Ochoa Gomez	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Ricardo Felipe Cortés Cruz	Universidad Nacional de Colombia	6	Bogotá D.C.
Juan Carlos Riveros Medina	Universidad Nacional de Colombia	8	Bogotá D.C.
Fabio Andres Arevalo Gutierrez	Universidad del Atlántico	9	Barranquilla
Mateo Roldan Carvajal	Universidad Nacional de Colombia	8	Medellín
María Ximena Mora Argüelles	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.
Pavel Ernubis Ramírez Hermosa	Universidad Nacional de Colombia	9	Bogotá D.C.
Gabriel Eduardo Diaz Barrios	Universidad Nacional de Colombia	10	Bogotá D.C.
Jesus Alberto Mizger Ortega	Universidad del Atlántico	8	Barranquilla
Angelica Velez Saker	Universidad del Atlántico	7	Barranquilla
Jenry Daniel Fonseca Jinete	Universidad del Atlántico	10	Barranquilla



Jaime Andres Puello Yarce	Universidad de cartagena	8	Cartagena
Juan Pablo Dussan	Universidad Nacional de Colombia	7	Bogotá D.C.

ANEXO B: Información brindada a los participantes del Curso “Herramientas para el modelamiento y simulación de Reactores Químicos



INFORMACIÓN PARA LA INSCRIPCIÓN AL CURSO “HERRAMIENTAS PARA EL MODELAMIENTO Y SIMULACIÓN DE REACTORES QUÍMICOS”

Lo primero que les sugiero es revisar el algoritmo general para participar en el curso, antes aclarando los canales de comunicación que habrán:

1. Página en Facebook del evento:

<https://www.facebook.com/events/1438630986432747/>



2. Carpeta en Dropbox con archivos de Instalación y material del curso (Que les será compartida inmediatamente llenen el formulario de inscripción):

<https://www.dropbox.com/home/COMSOL%20FOR%20DUMMIES#>

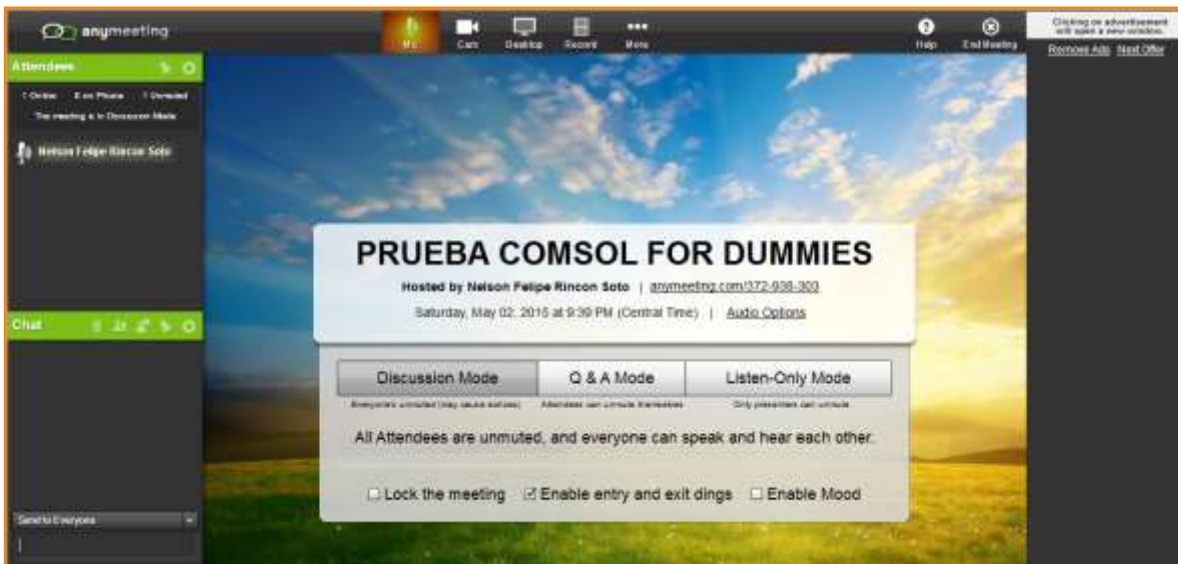


Dropbox > COMSOL FOR DUMMIES

📁 📁 📁 📎 🗑️ 🔍 Buscar

Nombre ▲	Tipo	Modificado
📁 ARCHIVOS DE INSTALACIÓN	carpeta	--
📁 MATERIAL DEL CURSO	carpeta	--

3. Plataforma Anymeeting para la realización de los Webinarios:



4. Correo electrónico y Whatsapp de los organizadores

Nelson Felipe Rincón Soto: nfrincons@unal.edu.co, 3002857218
 Diana Paola Rincón Valbuena: diprinconva@unal.edu.co, 3107571409



Aclarado esto, los invito a revisar el algoritmo de participación en el curso:

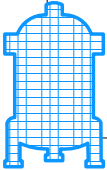





1. INFORMACIÓN DEL CURSO:

Lo primero que necesitan saber son las fechas de las sesiones virtuales que se tendrán a través de la plataforma "Anymeeting". Cada sesión se dará en dos grupos diferentes en dos horarios como se puede ver en el cronograma de actividades. En caso de no poder asistir a una sesión, estas están siendo grabadas y se les facilitará la correspondiente grabación.



CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES

LUNES 4	MARTES 5	MIÉRCOLES 6	JUEVES 7	VIERNES 8
 JORNADAS DE INSCRIPCIÓN E INSTALACIÓN DE COMSOL MULTIPHYSICS 4.4				
LUNES 11 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> SESIÓN 1: GRUPO A: 7:00-8:30 pm GRUPO B: 8:30-10:00 pm </div>	MARTES 12 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> SESIÓN 2: GRUPO A: 7:00-8:30 pm GRUPO B: 8:30-10:00 pm </div>	MIÉRCOLES 13 	JUEVES 14 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> SESIÓN 3: GRUPO A: 7:00-8:30 pm GRUPO B: 8:30-10:00 pm </div>	VIERNES 15 
LUNES 18 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> SESIÓN 4: GRUPO A: 7:00-8:30 pm GRUPO B: 8:30-10:00 pm </div>	MARTES 19 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> SESIÓN 5: GRUPO A: 7:00-8:30 pm GRUPO B: 8:30-10:00 pm </div>	MIÉRCOLES 20 	JUEVES 21 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> SESIÓN 6: GRUPO A: 7:00-8:30 pm GRUPO B: 8:30-10:00 pm </div>	VIERNES 22
LUNES 23 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> PRESENTACIÓN DE PROYECTOS DE SIMULACIÓN </div>	MARTES 19	MIÉRCOLES 20 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> ANUNCIO DEL GANADOR DEL CONCURSO! </div>		



EJES TEMÁTICOS A TRATAR

Ahora se presentan los ejes temáticos a tratar en cada sesión, incluyendo el componente de herramientas de simulación y el componente de ingeniería de las reacciones químicas:

N° Sesión	Título de Sesión	Comsol Multiphysics	Ingeniería de las reacciones químicas
1	Introducción a Comsol Multiphysics	Exploración de la interfaz, desarrollo de un modelo estacionario en 3D importando geometría, aplicación de condiciones de superficie, visualización de resultados en 3D, selección de físicas de trabajo	Esta sesión es de introducción al programa, se abarca un ejercicio clásico que no compete al tema de ingeniería de las reacciones químicas. Se estudian las tensiones generadas sobre una pieza tridimensional al aplicar un esfuerzo constante
2	Introducción a la Ingeniería de las reacciones químicas: Reducción de NO _x en un SRT.	Exploración del módulo de ingeniería de las reacciones químicas, estudios en estado no estacionario, introducción de parámetros de proceso a la interfaz, exploración de resultados en gráficas 1D	Desarrollo de un modelo para la reducción de NO _x con amoníaco en un reactor de mezcla perfecta isotérmico. Concepto de selectividad, análisis del efecto de un exceso de amoníaco en el reactor. Este es el modelo más sencillo de reactor que se trabajará durante el curso
3	Conceptos básicos de cinética química: Determinación de los parámetros de Arrhenius para la descomposición a cloruro de benceno	Exploración del módulo de optimización de parámetros e integración con el módulo de ingeniería de las reacciones químicas	Planteamiento de leyes de velocidad, definición de los parámetros cinéticos y caracterización de la constante de velocidad específica como función de la temperatura. Explicación de los parámetro de Arrhenius y su determinación
4	Diseño de reactores ideales isotérmicos: Producción de Ibuprofeno	Exploración del módulo e ingeniería de la reacciones químicas, visualización de múltiples resultados en 1D y 2D, análisis en estado dinámico	Diseño de reactor isotérmico en estado dinámico para la producción de ibuprofeno, se contemplan múltiples reacciones en la ruta química y se desarrollan las correspondientes expresiones



5	Diseño de reactores ideales no isotérmicos: Arranque de un CSTR	Integración y resolución de balances de masa y energía a través del módulo de ingeniería de las reacciones químicas	Ocurre la descomposición a cloruro de benceno en un reactor CSTR. Se hace un análisis de cómo operará el reactor de acuerdo a la temperatura inicial de la mezcla reaccionante. Se explican las curvas de calor generado del diseño de reactores ideales no isotérmicos
6	Diseño de reactores reales: Modelo real para la reducción de NO _x	Integración de los módulos de transferencia de masa, transferencia de calor y flujo de fluidos para desarrollar modelo real del reactor involucrando geometría tridimensional	Se explican los fenómenos de transferencia de masa, calor y transporte, y cómo estos afectan en la velocidad de reacción y en la temperatura.

REQUISITOS TÉCNICOS

1. Para participar del curso se requiere una cuenta gratuita en Anymeeting®:

<https://www.anymeeting.com/>

2. Tener acceso a los archivos de Dropbox, ya sea con el link de la carpeta compartida o teniendo una cuenta:

<https://www.dropbox.com/home/COMSOL%20FOR%20DUMMIES#>

3. Conexión a Internet de alta velocidad

4. Espacio en el disco para la instalación del simulador

CONCURSO

El concurso es la herramienta de evaluación para determinar si hubo desarrollo en el pensamiento creativo de los asistentes en temas concernientes a la simulación de reactores químicos en Comsol Multiphysics®.

El concurso consiste en realizar una simulación de un sistema reactivo en Comsol Comsol Multiphysics® involucrando los conceptos trabajados y presentando una posible solución a un problema de ingeniería de reacciones químicas. Pueden integrarse los módulos de Comsol que decidan los participantes. La inscripción al concurso se realizará el día martes 19 de mayo del 2015.

Los grupos pueden ser de máximo tres personas, y el premio al grupo ganador será una jornada de deporte extremo (Parapente, rapel o kayak) en una zona cercana a su ciudad



2. FORMULARIO DE INSCRIPCIÓN:

Una vez tomada la decisión de participar del curso, deben llenar el formulario de inscripción que se presenta en este link:

https://docs.google.com/a/unal.edu.co/forms/d/1nh_2UYOvNowrRqqgraOyLut2HZhqu6EbZXewu66SAxE/viewform

Inmediatamente lo hagan, se les indican las instrucciones para la instalación del simulador y las condiciones de licencia bajo las cuales se trabaja el curso.

3. INFORMACIÓN VÍA E-MAIL:

La dirección de correo electrónico recibirá las invitaciones a las sesiones del curso con 24 horas de anticipación para cada sesión. Los participantes pueden decidir si asistir en el grupo A o en grupo B de acuerdo a su disponibilidad horaria. Información detallada de la metodología de los webinarios también se les enviará vía e-mail.

¡Los esperamos!

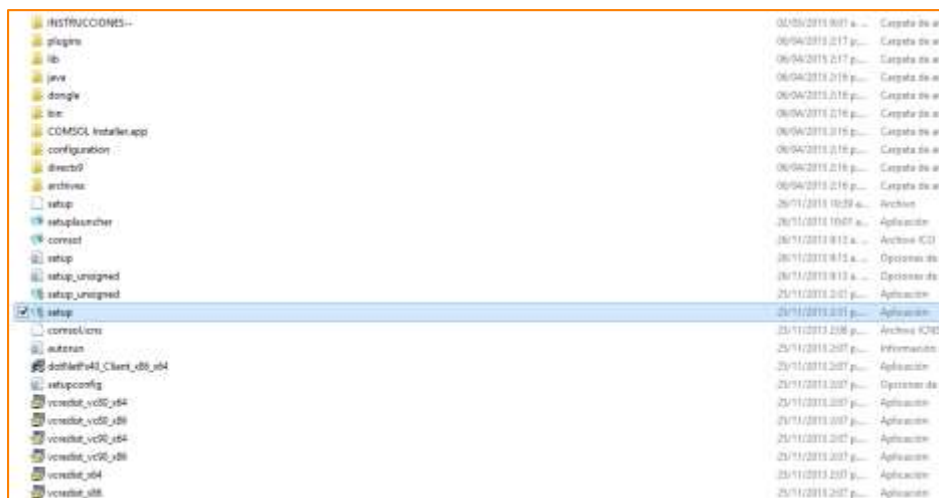


ANEXO C: Instrucciones de Instalación Comsol Multiphysics V4.4.



INSTRUCCIONES DE INSTALACIÓN DE COMSOL 4.4

1. EN LA CARPETA DE ARCHIVOS QUE SE LES COMPARTIÓ, DAR CLICK DERECHO-EJECUTAR COMO ADMINISTRADOS AL ARCHIVO **setup.exe**.



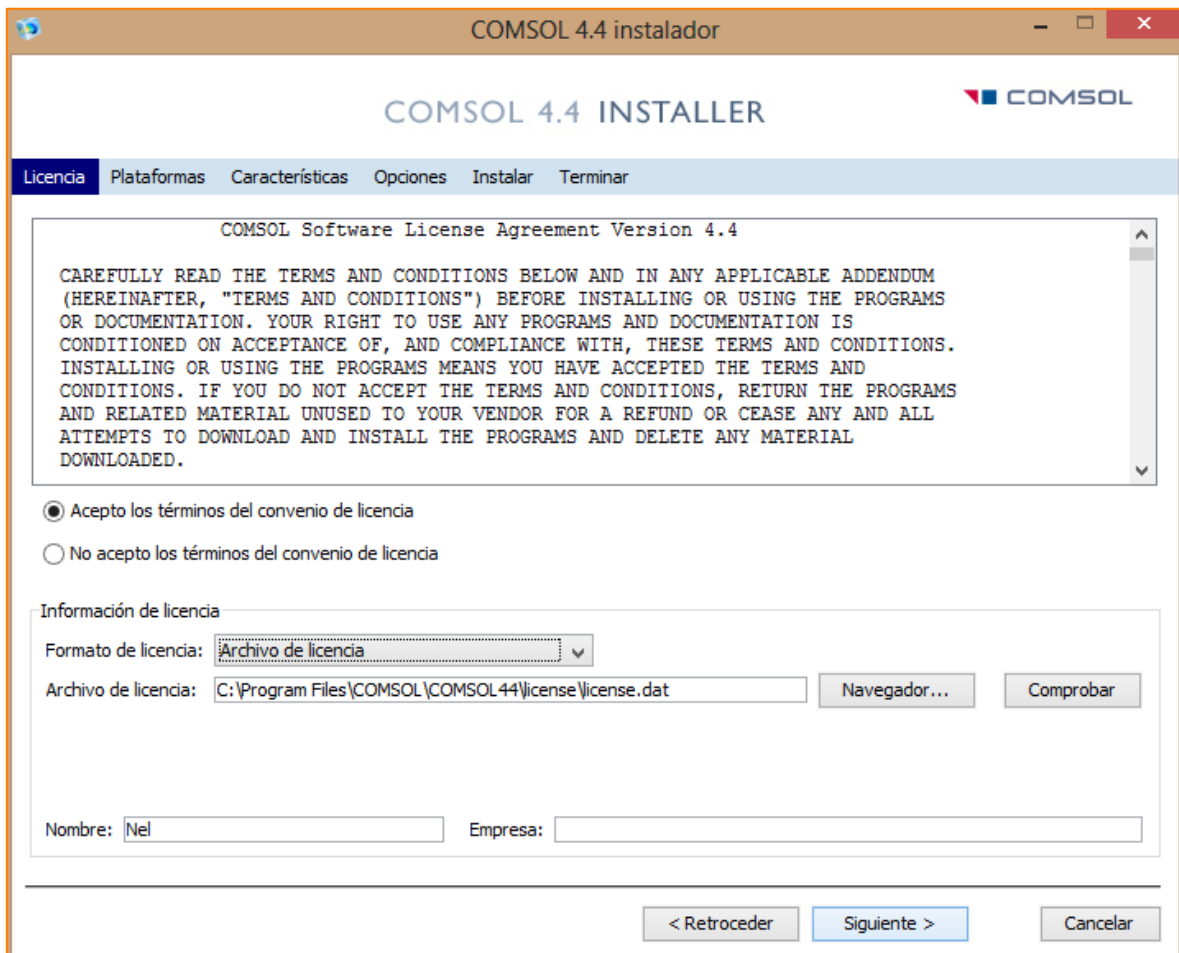
2. SE PUEDE INSTALAR EL PROGRAMA EN VARIOS IDIOMAS, PARA PROPÓSITOS DEL CURSO, TODO SE HARÁ CON LA INTERFAZ EN ESPAÑOL, POR LO QUE SE RECOMIENDA ESTA INSTALACIÓN.



3. INICIAR LA INSTALACIÓN



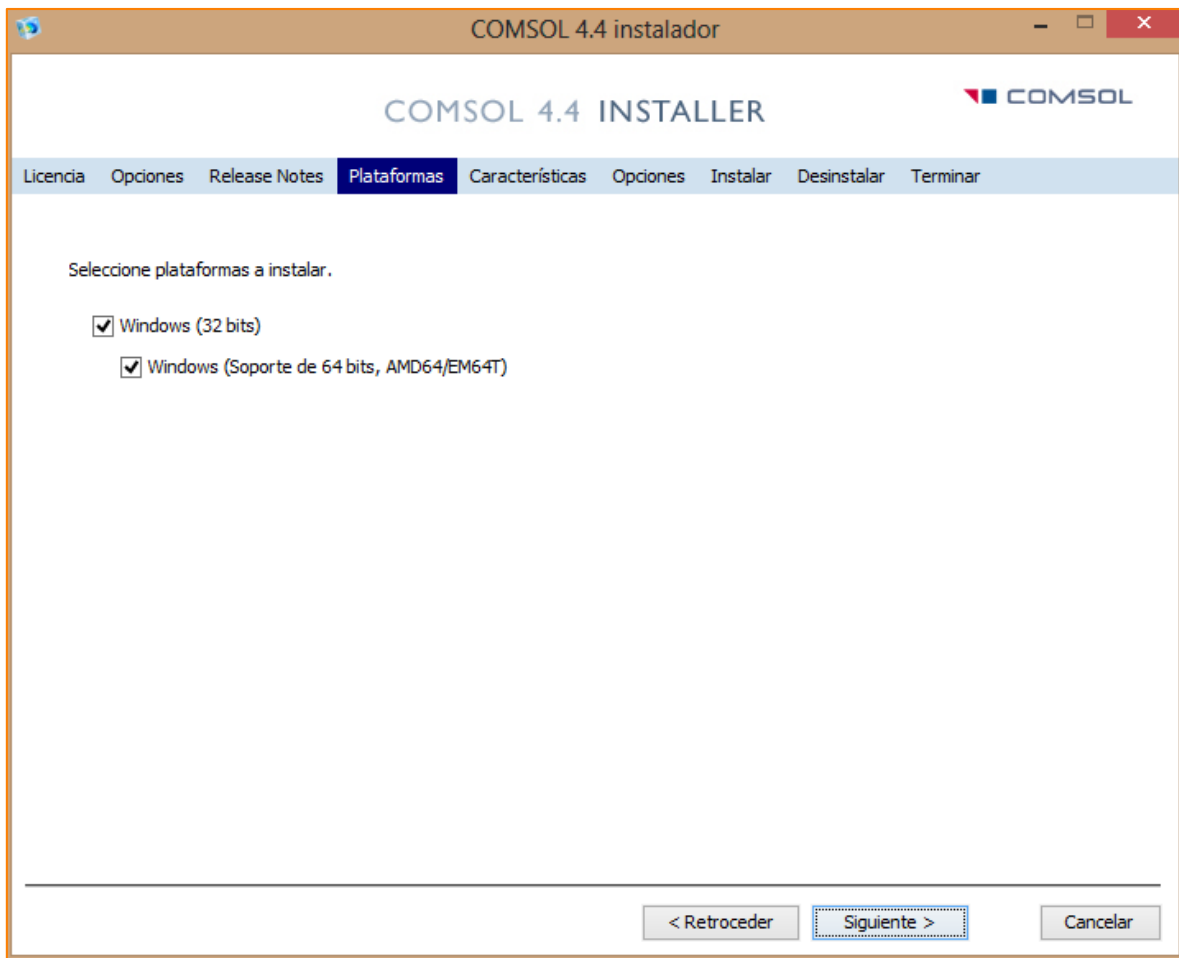
4. ACEPTAR LOS TÉRMINOS DE LA LICENCIA, EN LA CASILLA LICENSE FORMAT, BUSCAR LA OPCIÓN LICENSE FILE. SELECCIONAR EL ARCHIVO **License.lic** QUE SE ENCUENTRA EN LA CARPETA INSTRUCCIONES. PARA ESTO DAR CLICK EN “Navegador” Y SELECCIONAR LA UBICACIÓN DEL ARCHIVO.



LA LICENCIA QUE SE OTORGA ES POR 6 MESES Y CUBRE EL MANEJO DEL SOFTWARE ÚNICAMENTE PARA PROPÓSITOS ACADÉMICOS. DAR CLICK EN “Siguiete”.

5. LUEGO DE ESTO SE SELECCIONA LA PLATAFORMA DEPENDIENDO DE SU EQUIPO (32 Ó 64 BITS); EN CASO DE SER DE 64 SEÑALAR AMBAS CASILLAS.

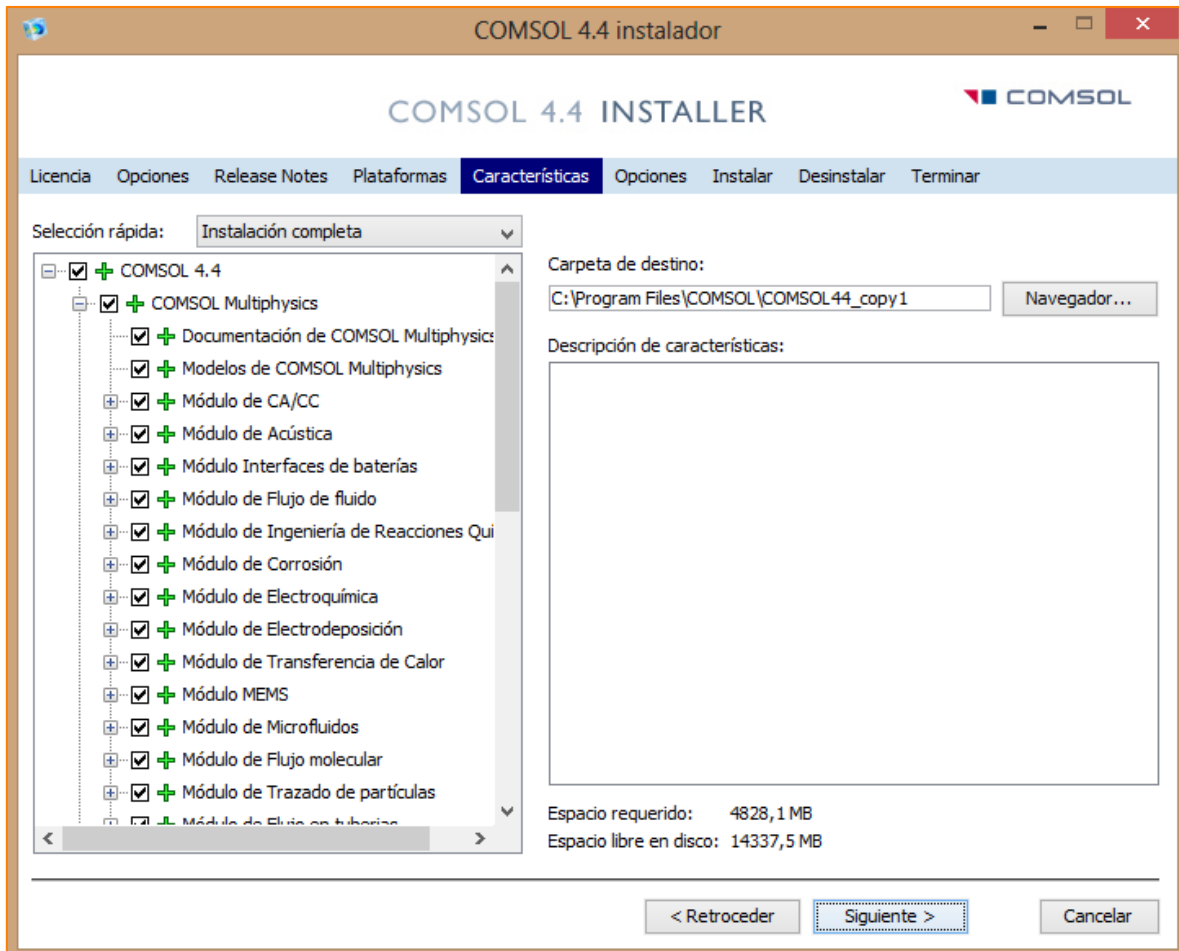




DAR CLICK EN "Siguiete".

6. EN LA SELECCIÓN DE LOS MÓDULOS A INSTALAR, LA RECOMENDACIÓN ES INSTALARLOS TODOS.

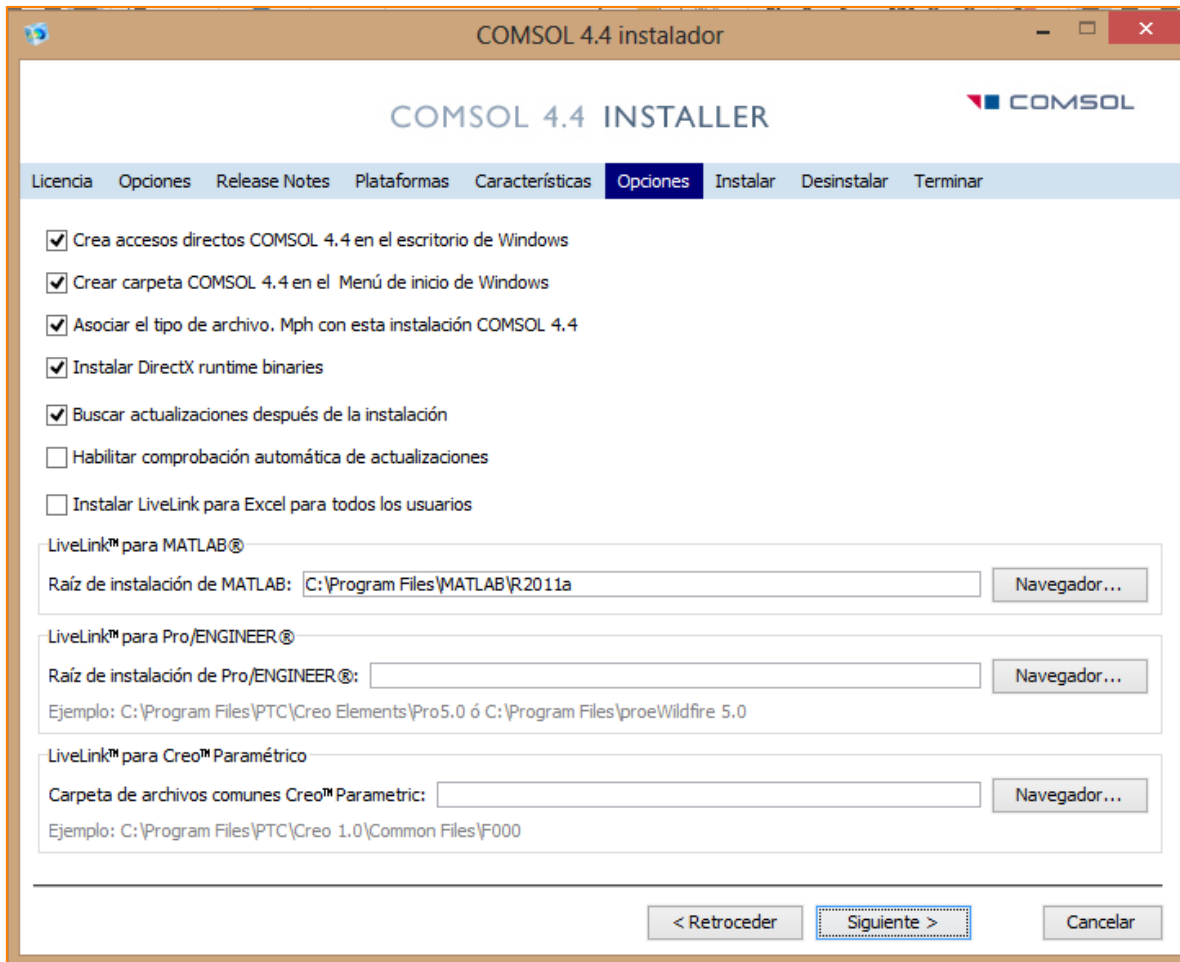




DAR CLICK EN “Siguiete”.

7. EN LA PESTAÑA DE OPCIONES, SELECCIONAR LAS CINCO PRIMERAS. IMPORTANTE DESABILITAR LAS ACTUALIZACIONES AUTOMÁTICAS. EN CASO DE TENER INSTALADO **MATLAB®**, SE PUEDE VINCULAR SI SE COLOCA LA UBICACIÓN DEL EJECUTABLE, DE IGUAL MANERA CON **Pro/ENGINEER®** Y **Creo™Parametric**.

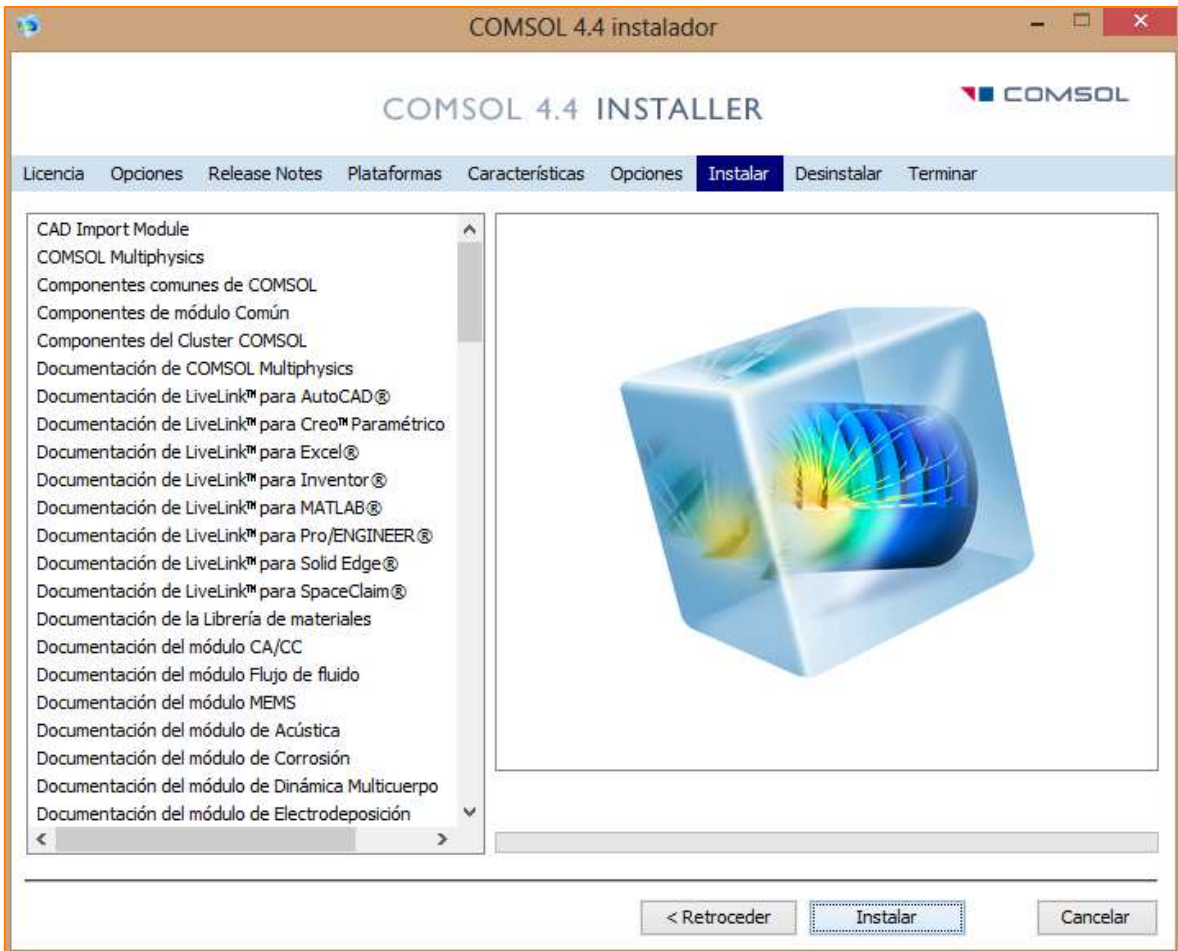




DAR CLICK EN “Siguiete”.

8. INSTALAR EL PROGRAMA CON EL BOTÓN “Instalar”.





FINALIZAR LA INSTALACIÓN. EN ALGUNOS EQUIPOS ES NECESARIO REINICIO DEL SISTEMA

