

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL SARACHO

FACULTAD DE CIENCIAS Y TECNOLOGÍA

CARRERA DE INGENIERÍA QUÍMICA



**SIMULACIÓN DE LA PLANTA DE PRODUCCIÓN DE
AMONIACO-UREA DE BULO-BULO COCHABAMBA**

Por:

CARLOS ALEJANDRO VARGAS JIMÉNEZ

**Modalidad de graduación (Modelación y Simulación de Procesos) presentado a
consideración de la “UNIVERSIDAD AUTÓNOMA JUAN MISAEL
SARACHO”, como requisito para optar el grado académico de licenciatura en
Ingeniería Química.**

TARIJA-BOLIVIA

2024

Dedicatoria

Dedico este trabajo a mis docentes, quienes han sido faros de sabiduría, guiándome a través de las complejidades del conocimiento. A cada uno de ustedes, les agradezco sinceramente por su dedicación, paciencia y compromiso con mi aprendizaje.

Quiero dedicar estas páginas a los futuros alumnos que se aventurarán en este apasionante camino académico. Que encuentren en estas líneas no solo conocimiento, sino también inspiración para enfrentar sus propios desafíos y descubrimientos. Que este trabajo sirva como un faro que ilumine sus propios proyectos y que encuentren en cada página la motivación para explorar, aprender y contribuir al crecimiento del conocimiento.

ÍNDICE

	Paginas
Advertencia	i
Dedicatoria	ii
Agradecimiento	iii
Pensamiento	iv
RESUMEN.....	viii
Antecedentes	1
Objetivos : General y específicos.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos	3
Justificación.....	3

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1. Generalidades del amoniaco	6
1.1.1. Información general del Amoniaco	6
1.2. Descripción de la industria química de la Urea	12
1.2.1. Información general.....	12
1.2.2. Principales empresas productoras de Urea a nivel intercontinental y nacional.....	15
1.3. Procesos de obtención de Amoniaco y Urea.....	16
1.3.1. Procesos de obtención de amoniaco a nivel industrial	16
1.3.1.1. Proceso de obtención de amoniaco con reformado de vapor.....	19

1.3.1.2. Proceso de obtención de amoniaco por oxidación parcial	27
1.3.1.3. Resultado de la producción de amoniaco.....	27
1.3.1.4. Proceso de obtención con amoniaco verde	30
1.3.2. Proceso de producción de Urea a nivel industrial.....	34
1.3.2.1. Proceso de obtención de urea por el proceso thermo-urea.....	34
1.3.2.1.1. Obtención de CO ₂	36
1.3.2.1.2. Obtención de amoniaco.....	37
1.3.2.1.3. Formación de carbamato	38
1.3.2.1.4. Degradación del carbamato y reciclado	39
1.3.2.1.5. Síntesis de urea.....	40
1.3.2.1.6. Formación de Biuret.....	40
1.3.2.1.7. Deshidratación, concentración y granulación	41
1.4. Planta de Bulo-Bulo Cochabamba	42
1.4.1. Historia de la planta de Bulo-Bulo	42
1.4.2. Proceso de obtención de amoniaco en la planta de Bulo-Bulo.....	44
1.4.3. Equipos que intervienen en la producción de amoniaco.....	46
1.4.3.1. Reformado primario y secundario (reactor de lecho fijo multitubular)	46
1.4.3.2. Conversión shift y metanización.....	51
1.4.3.3. Eliminación del CO ₂	55
1.4.3.4. Metanización.....	57
1.4.3.5. Compresión del gas de síntesis	62
1.4.4. Proceso de obtención de urea en la planta de bulo-bulo.....	65

1.4.5. Equipos que intervienen en la producción de Urea	68
1.4.5.1. Reactor de síntesis de carbamato	68
1.4.5.2. Sección de síntesis condensador de carbamato-reactor y stripper ..	70
1.4.5.3. Sección de purificación: descomponedor de alta presión, descomponedor de baja presión, separador flash, tanque de sol urea	73
1.4.5.4. Sección de concentración: evaporador y separador final	75
1.4.5.5. Sección de granulación	76
1.5. Simuladores de procesos químicos	78
1.5.1. Aplicaciones de la simulación de procesos	80
1.5.1.1. Diseños asistidos por ordenador	80
1.5.1.2. Optimización de procesos	81
1.5.1.3. Solución de problemas de funcionamiento	81
1.5.1.4. Otras aplicaciones	82
1.5.1.4.1. Análisis de convergencia	82
1.5.1.4.2. Análisis de sensibilidad	82
1.5.2. Tipos de simuladores de procesos	83
1.5.2.1. Simuladores de secuencia modular	85
1.5.2.2. Simuladores simultáneos u orientados a ecuaciones	87
1.5.2.3. Simuladores híbridos	88
1.5.3. Aspen Plus y Aspen Hysys	89
1.5.4. Paquetes termodinámicos	90
1.5.4.1. Ecuaciones de estado	90
1.5.4.2. Modelos de coeficiente de actividad	91

1.5.5. Selección del modelo termodinámico.....	91
1.5.6. Selección del Modelo de Propiedades	92
1.5.6.1. Validar las propiedades físicas.....	92
1.5.7. Componentes Hipotéticos	93
1.5.8. Selección del modelo de propiedad	93
1.5.9. Reacciones químicas.....	98
1.5.9.1. Estequiometria	98
1.5.9.2. Conversión	99
1.5.9.3. Selectividad.....	99
1.5.10. Ecuaciones para el diseño de reactores.....	100
1.5.10.1. Modelos disponibles en Aspen Plus	100
1.5.10.2. Módulos disponibles en Aspen Hysys	103

CAPÍTULO II

ANÁLISIS Y SELECCIÓN DE VARIABLES

2.1. Análisis de las variables del proceso.....	106
2.1.1. Variables del Proceso de obtención de amoníaco.....	107
2.1.2. Variables del proceso de obtención de Urea.....	108
2.2. Selección de variables independientes y de respuesta dependientes	109
2.2.1. Selección de variables independientes del proceso de obtención de amoníaco.....	109
2.2.1.1. Presión y temperatura.....	109
2.2.1.2. Dimensiones de los reactores flujo pistón	110

2.2.1.3. Caudal de alimentación de gas natural y vapor de agua al inicio del proceso	110
2.2.2. Variables de respuesta dependientes del proceso de obtención de amoniaco.....	110
2.2.2.1. Porcentaje de conversión de los reactores flujo pistón	110
2.2.2.2. Rendimiento del proceso de obtención de amoniaco.....	110
2.2.3. Selección de variables independientes del proceso de obtención de urea	111
2.2.3.1. Presión y temperatura.....	111
2.2.3.2. Caudal de alimentación de gas natural y de vapor de agua	111
2.2.3.3. Relación de alimentación de CO ₂ : NH ₃	112
2.2.3.4. Presión de vacío en el concentrador de urea.....	112
2.2.4. Selección de variable de respuesta dependientes del proceso de obtención de urea.....	112
2.2.4.1. Rendimiento del proceso de obtención de urea	113
2.2.4.2. Temperatura de vacío en el concentrador de urea.....	113
2.3. Selección del programa de simulación de procesos (Aspen Hysys-Aspen Plus)	113

CAPÍTULO III

IDENTIFICACIÓN Y SELECCIÓN DEL MODELO

3.1. Identificación de modelos termodinámicos	115
3.1.1. Ecuaciones de estado	116
3.1.1.1. Redlich–Kwong	116
3.1.1.2. Soave–Redlich–Kwong.....	116

3.1.1.3. Peng–Robinson	117
3.1.2. Modelos de coeficiente de actividad.....	119
3.1.2.1. Modelo Van Laar	119
3.1.2.2. Modelo de Wilson.....	120
3.1.2.3. NTRL (Nonrandom Two Liquids).....	121
3.1.2.4. UNIQUAC	121
3.1.2.4. UNIFAC.....	123
3.2. Selección del modelo termodinámico	124
3.2.1. Selección del modelo termodinámico para la producción de Amoniacó	126
3.2.1. Selección del modelo termodinámico para el uso de la amina en el proceso de obtención de amoniacó.....	127
3.2.2. Construcción del componente hipotético carbamato de amonio	127
3.2.3. Selección del modelo termodinámico para el proceso de obtención de Urea.....	128

CAPÍTULO IV

DESARROLLO DEL MODELO DE SIMULACIÓN

4.1. Desarrollo del modelo	130
4.1.1. Desarrollo del modelo de producción de amoniacó.....	132
4.1.1.1. Componentes para la simulación de producción de amoniacó (I) 132	
4.1.1.2. Paquetes termodinámicos en la simulación de producción de amoniacó	133
4.1.1.3. Reacciones químicas en la simulación de obtención de amoniacó	134

4.1.1.4. Construcción del proceso de obtención de amoniaco en Aspen Hysys	136
4.1.1.5. Base de diseño de la simulación de producción de amoniaco	140
4.1.1.6. Balance de materia del modelo de producción de amoniaco	143
4.1.2. Desarrollo del modelo de producción de urea	154
4.1.2.1. Componentes para la simulación de producción de amoniaco	154
4.1.2.2. Paquete termodinámico para la simulación de obtención de Urea	155
4.1.2.3. Reacciones químicas en la simulación de obtención de Urea.....	156
4.1.2.4. Construcción del proceso de obtención de urea en Aspen Hysys.	157
4.1.2.5. Base de diseño de la simulación de producción de urea	161
4.1.2.6. Balance de materia del modelo de producción de urea.....	164

CAPÍTULO V

EVALUACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1. Validación del modelo de simulación	174
5.1.1. Validación del modelo de simulación de obtención de amoniaco.....	174
5.1.1.1. Validación del reformador primario	174
5.1.1.2. Validación del Reformador secundario.....	176
5.1.1.3. Validación del Reactor Shift alta temperatura	177
5.1.1.3. Validación del reactor shift baja temperatura	179
5.1.1.4. Validación del reactor flujo pistón.....	180
5.2.2. Validación del modelo de producción de urea.....	181
5.2.2.1. Validación reactor de síntesis de carbamato	182
5.2.2.2. Validación reactor de obtención de urea.....	183

5.2.2.3. Validación reactor de degradación de carbamato	184
5.2.2.4. Validación del evaporador de vacío.....	185
5.3. Análisis de sensibilidad.....	186
5.3.1. Análisis de sensibilidad en el modelo de producción de amoniaco.....	187
5.3.1.1. Reactor shift de alta temperatura y baja temperatura.....	187
5.3.1.2. Reactor flujo pistón cama 1	189
5.3.1.3. Reactor flujo pistón cama 2	193
5.3.1.4. Reactor flujo pistón cama 3	197
5.3.1.5. Producción de amoniaco en función de la relación de H ₂ /N ₂	101
5.3.1.6. Producción de amoniaco en función de la relación vapor de agua/Alimentación	103
5.3.2. Análisis de sensibilidad en el modelo de producción de urea	206
5.3.2.1. Producción de carbamato y urea en función del porcentaje del total de dióxido de carbono que entra al reactor.	206
5.3.2.2. Producción de urea final en función del porcentaje del total de dióxido de carbono que entra al sistema	208
5.3.2.3. Temperatura de la urea en función de la presión de vacío del evaporador.....	210
5.3.3. Análisis de sensibilidad global.....	211
5.4. Análisis y discusión de los resultados.....	212
5.4.1. Análisis y discusión reactor shift de alta y baja temperatura.....	212
5.4.2. Análisis y discusión reactor flujo pistón (cama1-cama2-cama3).....	213
5.4.3. Análisis y discusión de la producción de amoniaco en función de la relación H ₂ /N ₂	213

5.4.4. Análisis y discusión de la producción de amoniaco en función de la relación H ₂ O/Alimentación.....	214
5.4.5. Análisis y discusión relación de alimentación optima.....	214
5.4.6. Producción de carbamato y urea en función del porcentaje del total de dióxido de carbono que entra al reactor.....	214
5.4.7. Análisis de la producción de urea final en función del porcentaje del total de dióxido de carbono que entra al sistema	214
5.4.8. Análisis y discusión temperatura en función de la presión de vacío del separador flash de urea	215
5.5.9. Análisis de sensibilidad global	215

CAPÍTULO VI

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones	216
Recomendaciones.....	219
Bibliografía	220

ÍNDICE DE TABLAS

	Paginas
Tabla I-1. Propiedades del amoniaco como combustible	6
Tabla I-2. Especificaciones típicas del amoniaco anhidro de grado comercial	7
Tabla I-3. Instalaciones de producción de amoniaco en la Unión Europea 2017	9
Tabla I-4. Ficha técnica de la urea	13
Tabla I-5. Procesos y materias primas aplicados en la producción de amoniaco	18
Tabla I-6. Diferencias de costos y demandas de energía total en la producción de amoniaco.....	19
Tabla I-7. Composiciones del gas de proceso en la entrada y salida del reformador primario.....	49
Tabla I-8. Composición del gas de proceso en la entrada y salida del reformador secundario.....	51
Tabla I-9. Composición en la entrada y salida de la conversión shift a alta temperatura.....	53
Tabla I-10. Composición en la entrada y salida de la conversión shift a baja temperatura.....	55
Tabla I-11. Valores de temperatura máxima y mínima para la Metanacion.....	59
Tabla I-12. Tabla de composición del gas antes y después de la Metanación.....	61
Tabla I-13. Cambio de temperatura en cada cama, contenido de amoniaco por cada cama.....	64
Tabla I-14. Algunos modelos integrados disponibles en Aspen Plus.....	91
Tabla I-15. Resumen de módulos disponibles en Aspen Plus	101
Tabla I-16. Resumen de módulos disponibles en Aspen Hysys	104

Tabla II-1.	Compuestos involucrados en el proceso de obtención de Amoniaco.....	106
Tabla II-2.	Compuestos involucrados en el proceso de obtención de Urea	107
Tabla II-3.	Matriz comparativa de los simuladores de procesos químicos	114
Tabla III-1.	Valores sugeridos para el parámetro α en el modelo NRTL	122
Tabla III-2.	Compuestos polares y no polares en el proceso de obtención de amoniaco.....	126
Tabla III-3.	Comparación de las estructuras del carbamato de amonio	128
Tabla III-4.	Información requerida para crear el componente hipotético.....	128
Tabla III-5.	Compuestos polares y no polares en el proceso de obtención de urea.....	129
Tabla IV-1.	Equipos involucrados en la simulación de la sección de obtención de gas de síntesis de amoniaco	137
Tabla IV-2.	Equipos involucrados en la simulación de la sección de purificación y metanización.....	138
Tabla IV-3.	Equipos involucrados en la simulación de la sección circuito de producción de amoniaco y almacenaje	139
Tabla IV-4.	Condiciones de trabajo del flujo masico de gas natural, vapor de agua y aire natural.....	140
Tabla IV-5.	Condiciones de trabajo del reformador primario y secundario	141
Tabla IV-6.	Condiciones de trabajo de los reactores shift.....	141
Tabla IV-7.	Condiciones de trabajo del separador flash.....	142
Tabla IV-8.	Condiciones de trabajo de los absorbedores y desorbedores de dióxido de carbono.....	142
Tabla IV-9.	Condiciones de trabajo de la sección de metanización	142

Tabla IV-10.	Condiciones de trabajo de la sección circuito de producción de amoniaco y almacenaje	143
Tabla IV-11.	Balance de materia global del proceso de obtención de amoniaco.....	145
Tabla IV-12.	Balance de materia sección de obtención de gas de síntesis de amoniaco.....	146
Tabla IV-13.	Balance de materia sección de purificación del gas de síntesis de amoniaco.....	148
Tabla IV-14.	Balance de materia sección de metanización	150
Tabla IV-15.	Balance de materia sección circuito de producción de amoniaco.....	152
Tabla IV-16.	Balance de materia sección de almacenaje de amoniaco	153
Tabla IV-17.	Equipos involucrados en la simulación de la sección de compresión de CO ₂ y bombeo de amoniaco.....	159
Tabla IV-18.	Equipos involucrados en la simulación de la sección Reactor de carbamato, reactor de urea y reactor de descomposición de carbamato	160
Tabla IV-19.	Equipos involucrados en la simulación de la sección absorbedor de carbamato, descomponedor de carbamato de alta-baja presión y condensador de carbamato-recirculación.....	160
Tabla IV-20.	Equipos involucrados en la simulación de la sección concentrador y evaporador de vacío	161
Tabla IV-21.	Condiciones de trabajo del flujo másico del amoniaco y amoniaco.....	162
Tabla IV-22.	Condiciones de trabajo de los reactores de obtención de urea.....	162
Tabla IV-23.	Condiciones de trabajo del absorbedor de carbamato.....	163

Tabla IV-24.	Condiciones de trabajo del reactor de condensación de carbamato.....	163
Tabla IV-25.	Condiciones de trabajo del descomponedor de carbamato de alta y baja presión.....	163
Tabla IV-26.	Condiciones de trabajo del concentrador de urea y evaporador de vacío.....	164
Tabla IV-27.	Balance de materia global del proceso de obtención de urea.....	166
Tabla IV-28.	Balance de materia sección de reactores de carbamato y urea.....	167
Tabla IV-29.	Balance de materia sección de absorbedor de carbamato	168
Tabla IV-30.	Balance de materia sección condensador de carbamato	170
Tabla IV-31.	Balance de materia sección descomponedor de carbamato de alta y baja presión.....	172
Tabla IV-32.	Balance de materia sección de concentrador y evaporador al vacío de urea.....	173
Tabla V-1.	Validación reformador primario	174
Tabla V-2.	Validación reformador secundario.....	176
Tabla V-3.	Validación del reactor shift alta temperatura	177
Tabla V-4.	Validación del reactor shift baja temperatura	179
Tabla V-5.	Validación del reactor flujo pistón.....	180
Tabla V-6.	Datos de validación del modelo de simulación de obtención de urea.....	182
Tabla V-7.	Validación del reactor de síntesis de carbamato	182
Tabla V-8.	Validación reactor de obtención de urea.....	183
Tabla V-9.	Validación reactor de degradación de carbamato	184

Tabla V-10.	Validación del evaporador de vacío.....	185
Tabla V-11.	Sensibilidad de los reactores shift de alta y baja temperatura.....	187
Tabla V-12.	Sensibilidad de la CAMA 1 en función de su geometría	189
Tabla V-13.	Sensibilidad de la CAMA 1 en función de las condiciones de trabajo.....	191
Tabla V-14.	Sensibilidad de la CAMA 2 en función de su geometría	193
Tabla V-15.	Sensibilidad de la CAMA 2 en función de las condiciones de trabajo.....	195
Tabla V-16.	Sensibilidad de la CAMA 3 en función de su geometría	197
Tabla V-17.	Sensibilidad de la cama 3 en función de la temperatura a presiones constantes.....	199
Tabla V-18.	Producción de amoniaco en función de la relación de alimentación de airea H_2/N_2	201
Tabla V-19.	Producción de amoniaco en función de la relación vapor de agua/Alimentación	203
Tabla V-20.	Producción de carbamato y urea en función del porcentaje del total de dióxido de carbono que entra al reactor	206
Tabla V-21.	Producción de urea final en función del porcentaje del total de dióxido de carbono que entra al reactor	208
Tabla V-22.	Temperatura de la urea en función de la presión de vacío del evaporador.....	210
Tabla V-23.	Sensibilidad de la producción de urea y amoniaco en función del gas de alimentación.....	211

ÍNDICE DE FIGURAS

	Paginas
Fig. 1-1. Principales productores de amoniaco en el mundo (2023)	8
Fig. 1-2. Capacidad y producción de amoníaco y urea entre 2016 y 2020.....	12
Fig. 1-3. Diagrama de equilibrio entre fases del sistema NH ₃ -CO ₂ y H ₂ O	14
Fig. 1-4. Métodos de producción de amoniaco.....	17
Fig. 1-5. Métodos de producción de amoniaco en 2020	17
Fig. 1-6. Producción de amoniaco mediante reformado con vapor	20
Fig. 1-7. Ejemplo de una sección radiante de un reformador y un reformador secundario.....	22
Fig. 1-8. Diagrama de bloques para la producción de amoniaco por oxidación parcial.....	29
Fig. 1-9. Métodos de producción de amoniaco verde.....	32
Fig. 1-10. Planta de producción de amoniaco verde de pequeña escala de Thyssenkrupp.	33
Fig. 1-11. Diagrama del proceso completo de producción de urea.	35
Fig. 1-12. Diagrama de obtención de CO ₂	36
Fig. 1-13. Diagrama de obtención de amoniaco	38
Fig. 1-14. Diagrama de síntesis de Urea.....	41
Fig. 1-15. Empresas pre-seleccionadas.....	43
Fig. 1-16 Cronograma de implementación de amoniaco-urea de Bulo-Bulo.....	43
Fig. 1-17. Producción de amoniaco mediante el proceso KBR	45
Fig. 1-18. Reactor lecho fijo multitubular	46
Fig. 1-19. Proceso de reformado primario y secundario.....	48

Fig. 1-20.	Reformador secundario	50
Fig. 1-21.	Proceso de conversión shift y metanización	52
Fig. 1-22.	Proceso de eliminación de CO ₂	56
Fig. 1-23.	Torre de absorción Bulo-Bulo.....	57
Fig. 1-24.	Proceso de Metanación	59
Fig. 1-25.	Proceso de general de Shift, eliminación de CO, CO ₂ y metanador	60
Fig. 1-26.	Proceso de secado del gas de síntesis.....	62
Fig. 1-27.	Proceso de obtención de amoníaco	63
Fig. 1-28.	Diagrama del reactor donde ocurre la reacción entre el N ₂ y H ₂	64
Fig. 1-29.	Proceso de obtención de Urea en la planta de amoníaco-urea	66
Fig. 1-30.	Diagrama de flujo del proceso de obtención de urea	66
Fig. 1-31.	Diagrama de producción de urea dividido por secciones.....	67
Fig. 1-32.	Diagrama de flujo del bombeo de amoníaco.....	69
Fig. 1-33.	Diagrama de flujo de compresión de CO ₂	70
Fig. 1-34.	Diagrama de la sección de síntesis de la planta de urea.....	71
Fig. 1-35.	Diagrama de la sección de síntesis de urea	73
Fig. 1-36.	Diagrama del proceso de la sección de purificación	74
Fig. 1-37.	Diagrama de proceso de concentración.....	75
Fig. 1-38.	Diagrama del proceso de granulación de urea en la planta de amoníaco urea.....	77
Fig. 1-39.	Esquema de cálculo de un diagrama de flujo.....	85
Fig. 1-40.	Primeros pasos para la sección del modelo de propiedad	95
Fig. 1-41.	Procedimiento para compuestos polares no electrolíticos.	96

Fig. 3-1.	Modelos termodinámicos más comunes empleados en Aspen Hysys ..	115
Fig. 3-2.	Primeros pasos para la sección de modelo de propiedad.	125
Fig. 4-1.	Diagrama de bloques para la construcción de la simulación de obtención de amoniaco	130
Fig. 4-2.	Diagrama de bloques para la construcción de la simulación de obtención de urea.....	131
Fig. 4-3.	Lista de componentes uno para la producción de amoniaco.....	132
Fig. 4-4.	Lista de componentes para el uso de la amina	133
Fig. 4-5.	Selección del modelo termodinámico numero 1	134
Fig. 4-6.	Selección del modelo para el uso de la amina.....	134
Fig. 4-7.	Reacciones de la simulación de producción de amoniaco	135
Fig. 4-8.	Simulación de la producción de amoniaco en Aspen Hysys.....	136
Fig. 4-9.	Diagrama de bloques del balance de materia del proceso de obtención de amoniaco.....	144
Fig. 4-10.	Sección de obtención de los reactores de gas de síntesis de amoniaco en Aspen Hysys.....	145
Fig. 4-11.	Sección de purificación del gas de síntesis de amoniaco en Aspen Hysys.....	148
Fig. 4-12.	Sección de metanización en Aspen Hysys	150
Fig. 4-13.	Sección de circuito de producción de amoniaco en Aspen Hysys	151
Fig. 4-14.	Sección de almacenaje de amoniaco en Aspen Hysys	152
Fig. 4-15.	Lista de componentes tres para la producción de urea.....	154
Fig. 4-16.	Construcción de la molécula carbamato de amonio con la estructura UNIFAC.....	155

Fig. 4-17.	Selección del modelo termodinámico numero 3	156
Fig. 4-18.	Reacciones de la simulación de producción de urea	156
Fig. 4-19.	Simulación de la producción de urea en Aspen Hysys	158
Fig. 4-20.	Sub-Flowsheet.....	159
Fig. 4-21.	Diagrama de bloques del balance de materia del proceso de obtención de urea.....	165
Fig. 4-22.	Sección de reactores de carbamato y urea en Aspen Hysys.....	166
Fig. 4-23.	Sección de absorbedor de carbamato en Aspen Hysys	168
Fig. 4-24.	Sección condensador de carbamato en Aspen Hysys	170
Fig. 4-25.	Sección descomponedor de carbamato de alta y baja presión en Aspen Hysys.....	171
Fig. 4-26.	Sección de concentrador y evaporador al vacío de urea en Aspen Hysys.....	173
Fig. 5-1.	Reformador primario simulado en Aspen Hysys	175
Fig. 5-2.	Reformador secundario Hysys	176
Fig. 5-3.	Reactor shift de alta temperatura simulado en Aspen Hysys	178
Fig. 5-4.	Reactor shift de baja temperatura simulado en Aspen Hysys	179
Fig. 5-5.	Reactor flujo pistón simulado en Aspen Hysys	180
Fig. 5-6.	Validación reactor de carbamato.....	183
Fig. 5-7.	Validación reactor de obtención de urea.....	184
Fig. 5-8.	Validación del reactor de degradación de carbamato	185
Fig. 5-9.	Validación separador de vacío flash	186
Fig. 5-10.	Evaluación de la Cama 1 en función de la longitud del reactor.....	190
Fig. 5-11.	Evaluación de la cama 1 en función del volumen del reactor.....	190

Fig. 5-12. Sensibilidad de la cama 1 en función de la temperatura a presiones constantes.....	192
Fig. 5-13. Sensibilidad de la cama 1 en función de la presión a temperaturas constantes.....	192
Fig. 5-14. Evaluación de la CAMA 2 en función del volumen del reactor	194
Fig. 5-15. Evaluación de la CAMA 2 en función de la longitud del reactor	194
Fig. 5-16. Sensibilidad de la cama 1 en función de la temperatura a presiones constantes.....	196
Fig. 5-17. Sensibilidad de la cama 2 en función de la presión a temperaturas constantes.....	196
Fig. 5-18. Evaluación de la CAMA 3 en función del volumen del reactor	198
Fig. 5-19. Evaluación de la CAMA 3 en función del largo del reactor	198
Fig. 5-20. Sensibilidad de la cama 3 en función de la temperatura a presiones constantes.....	200
Fig. 5-21. Sensibilidad de la cama 3 en función de la presión a temperaturas constantes.....	200
Fig. 5-22. Producción de amoniaco en función de la relación de alimentación de airea H_2/N_2	202
Fig. 5-23. Producción de amoniaco en función de la relación de vapor de agua/Alimentación	204
Fig. 5-24. Relación optima de alimentación	205
Fig. 5-25. Producción de carbamato en función de la cantidad de dióxido de carbono que entra al reactor	206
Fig. 5-26. Producción de urea en función de la cantidad de dióxido de carbono que entra al reactor.....	207

Fig. 5-27. Producción de urea final en función del porcentaje del total de dióxido de carbono que entra al reactor	209
Fig. 5-28. Temperatura de la urea en función de la presión de vacío del evaporador.....	210
Fig. 5-29. Análisis de la producción de urea y amoníaco en función del gas de alimentación.....	212

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Simulación de los reactores de obtención del gas de síntesis de amoníaco

Anexo 2 Sección de purificación del gas de síntesis de amoníaco

Anexo 3 Sección de Metanación

Anexo 4 Circuito de producción de amoníaco

Anexo 5 Sección de almacenaje de amoníaco

Anexo 6 Sección de compresión de CO₂ y bombeo de amoníaco

Anexo 7 Reactor de carbamato

Anexo 8 Reactor de urea

Anexo 9 Reactor de descomposición de carbamato en amoníaco y dióxido de carbono

Anexo 10 Absorbedor de carbamato

Anexo 11 Descomponedor de carbamato de alta y baja presión

Anexo 12 Condensador de carbamato y recirculación

Anexo 13 Concentrador y evaporador de vacío

Anexo 14 Reporte de todas las corrientes de materia de la producción de amoníaco en Aspen Hysys

Anexo 15 Reporte de la composición de todas las corrientes de materia de la producción de amoníaco en Aspen Hysys

Anexo 16 reporte de la composición de todas las corrientes de energía de la producción de amoníaco en Aspen Hysys

Anexo 17 Reporte de todas las corrientes de materia de la producción de urea en Aspen Hysys

Anexo 18 Reporte de la composición de todas las corrientes de materia de la producción de urea en Aspen Hysys

Anexo 19 Reporte de la composición de todas las corrientes de energía de la producción de urea en Aspen Hysys

Anexo 20 Reporte de la reacción de reformador primario

Anexo 21 Reporte de la reacción del reformador secundario

Anexo 22 Reporte de la reacción de shift

Anexo 23 Reporte de la reacción del metanador

Anexo 24 Reporte de la reacción de amoniaco

Anexo 25 Reporte de la reacción de obtención de carbamato

Anexo 26 Reporte de la reacción de obtención de urea

Anexo 27 Reporte de la reacción degradación de carbamato