

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS ESPE-L

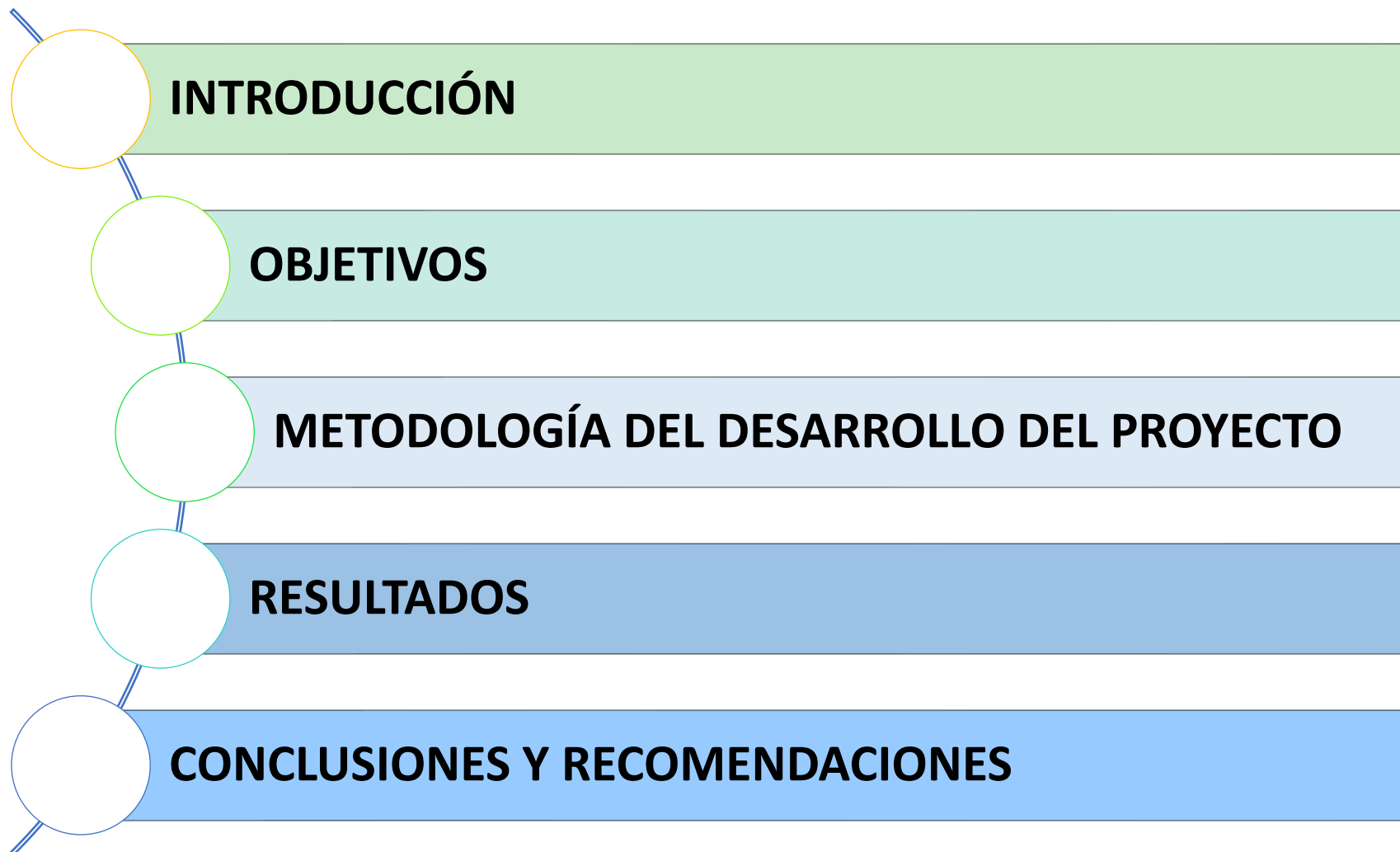
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA DE INGENIERÍA EN PETROQUÍMICA

“DESARROLLO DEL ENVOLVENTE DE OPERACIÓN DEL PROCESO HABER-BOSCH PARA LA SINTESIS DE AMONIACO”

AUTOR: ORELLANA MOYA, ANDRUWS STIVEN

DIRECTOR: DR. PHD. RODRÍGUEZ MAECKER, ROMÁN NICOLAY



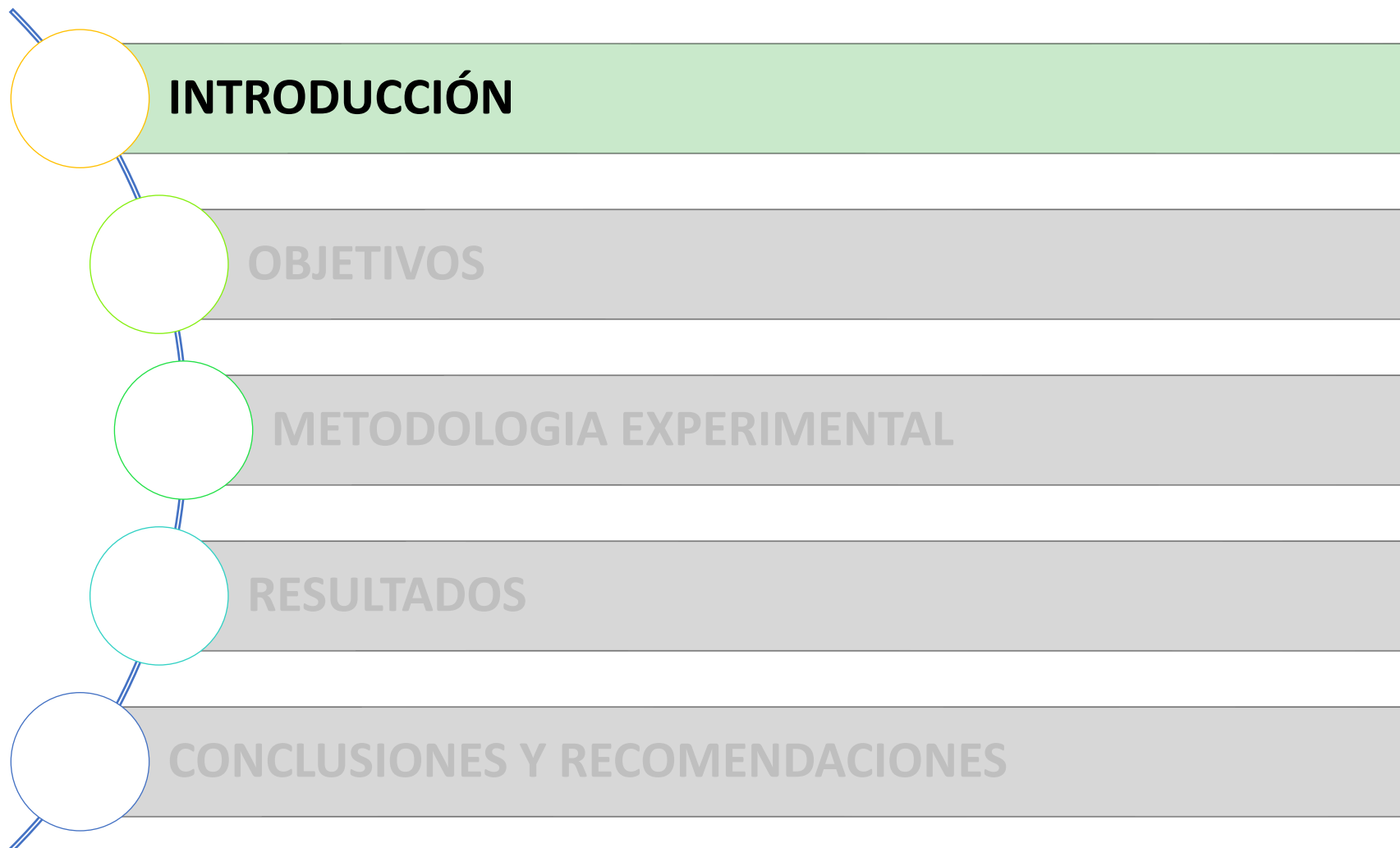


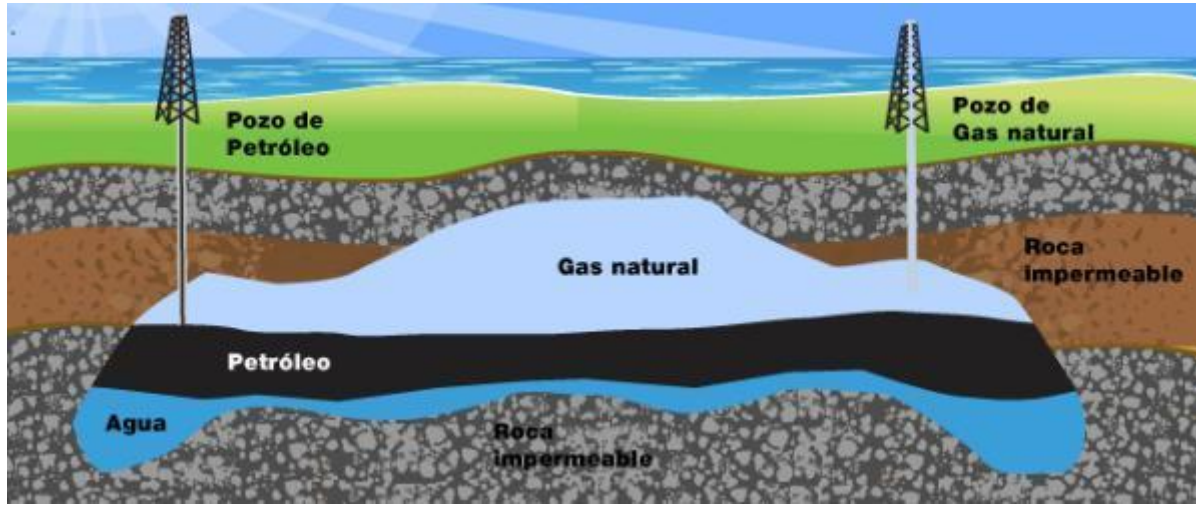


ESPE

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS

INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

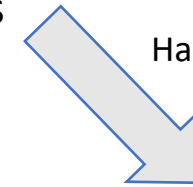




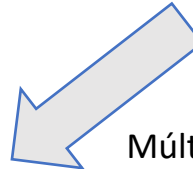
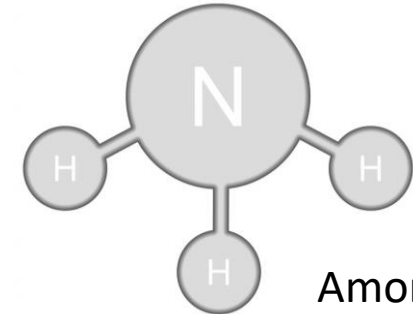
Gas Natural



Gas de síntesis



Haber-Bosch



Múltiples aplicaciones

- FARMACEUTICA
- QUIMICOS
- FERTILIZANTE
- EXPLOSIVOS
- LIMPIEZA

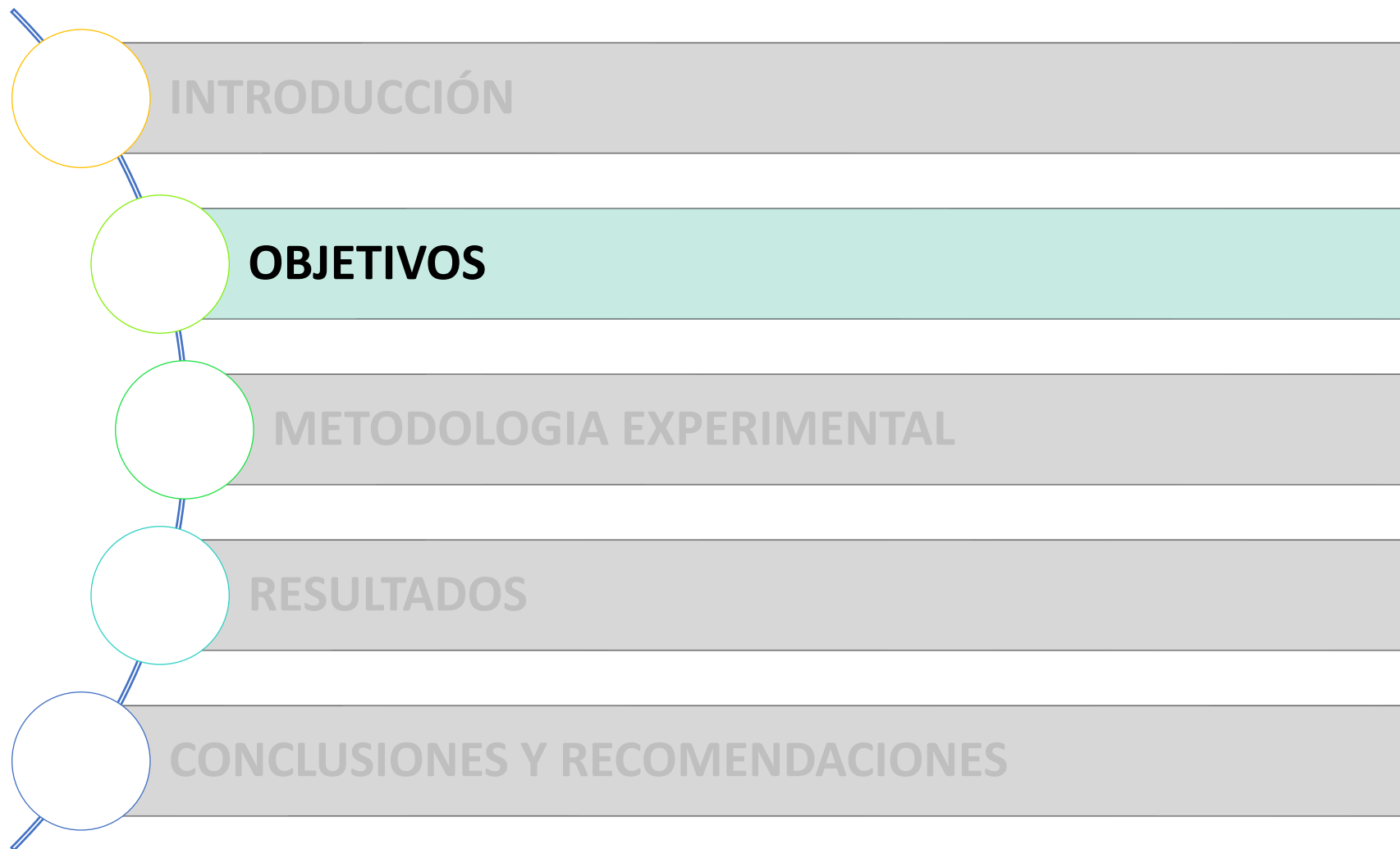
FERTILIZANTE



Sulfato de amonio, $(NH_4)_2SO_4$

Fosfato de amonio, $(NH_4)_3PO_4$

Urea, $(NH_2)_2CO_2$





Objetivo general

- ✓ Realizar un análisis comparativo entre tecnologías convencionales aplicadas para la síntesis de amoníaco empleando Simsci PRO/II como software de simulación.

Objetivos específicos

- ✓ Seleccionar las tecnologías más eficientes considerando el porcentaje de conversión en el reactor de síntesis a través de un análisis de investigación descriptivo y correlacional.



Objetivos específicos

- ✓ Simular los procesos tecnológicos seleccionados para la síntesis de amoníaco utilizando los softwares SimSci PRO/II.
- ✓ Valorar la corriente de residuos a fin de determinar la factibilidad de implementar un reciclaje en la simulación del proceso.
- ✓ Determinar entre las tecnologías elegidas cual es la óptima considerando las condiciones de operación del proceso (presión, temperatura, flujos molares) y de menor consumo energético para la síntesis de amoníaco basado en la simulación de proceso realizada en el software SimSci PRO/II.

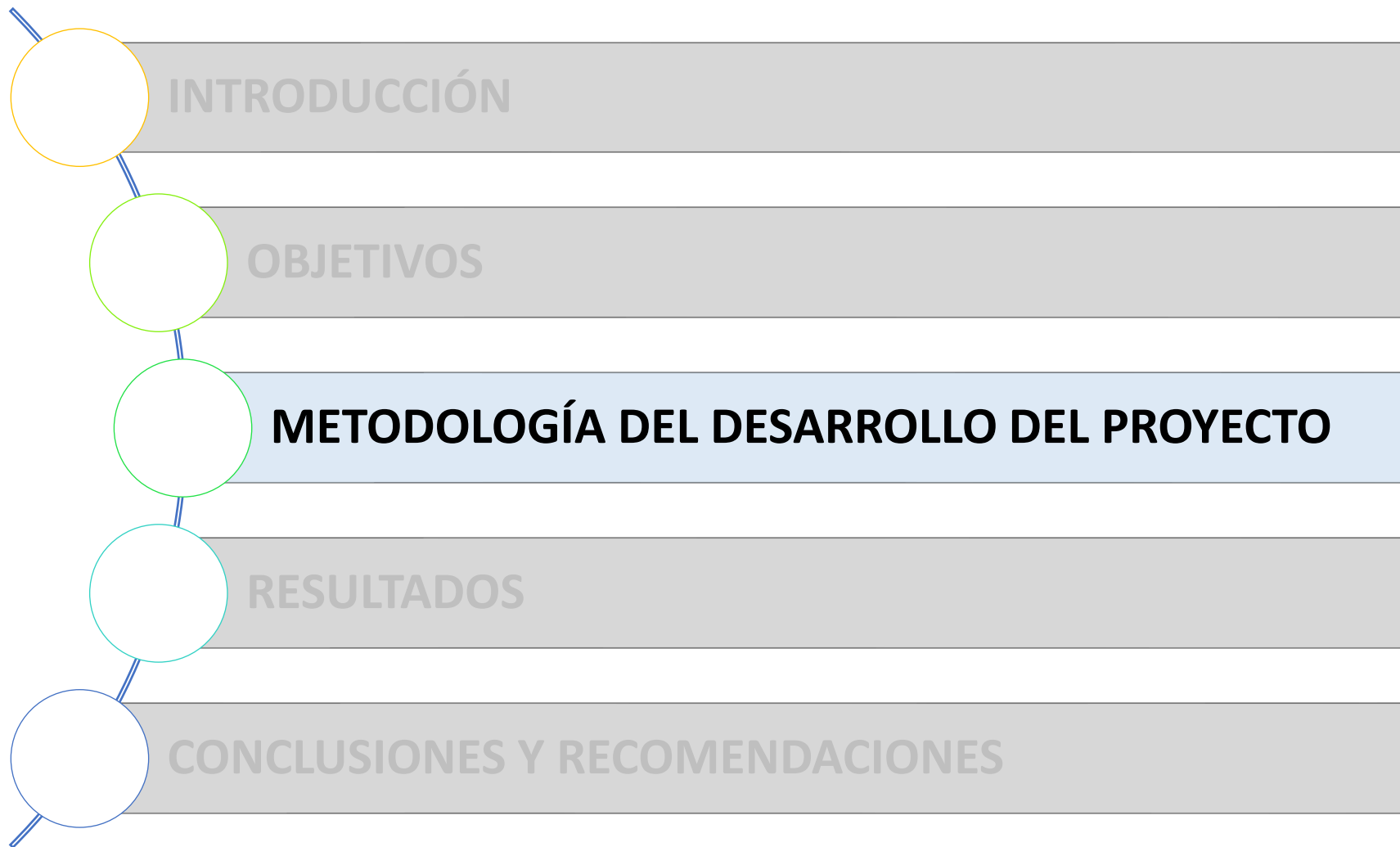
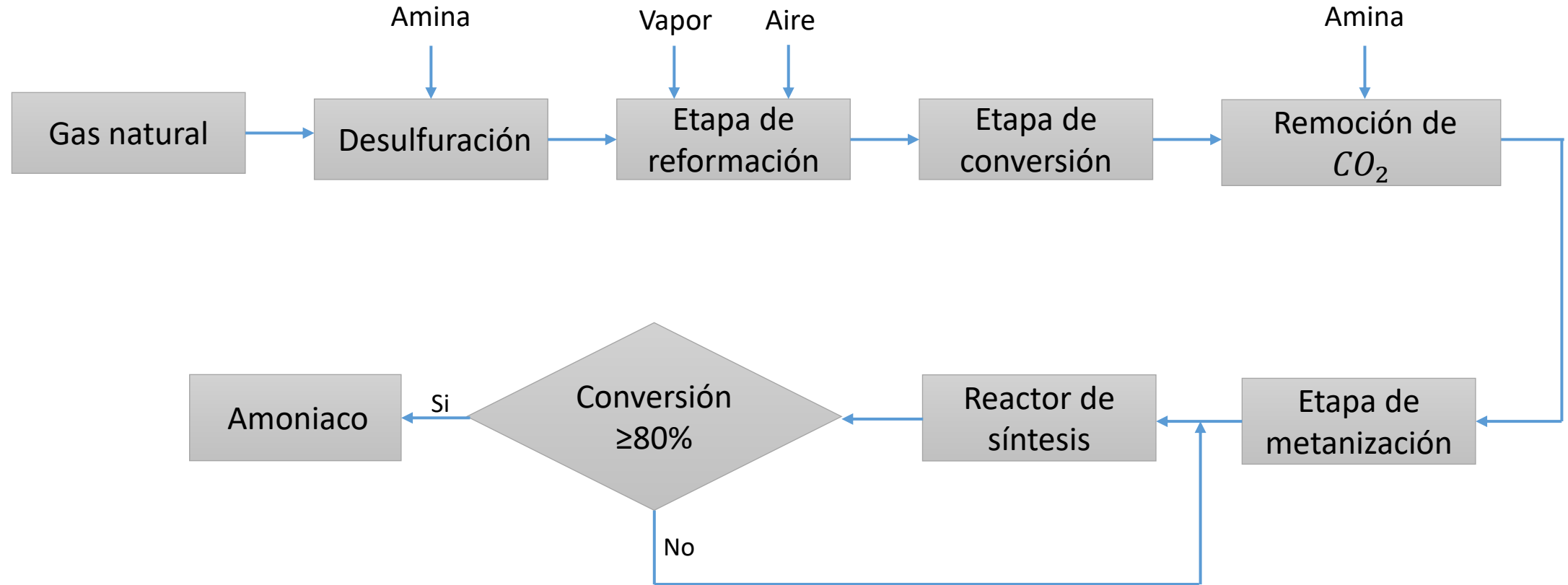
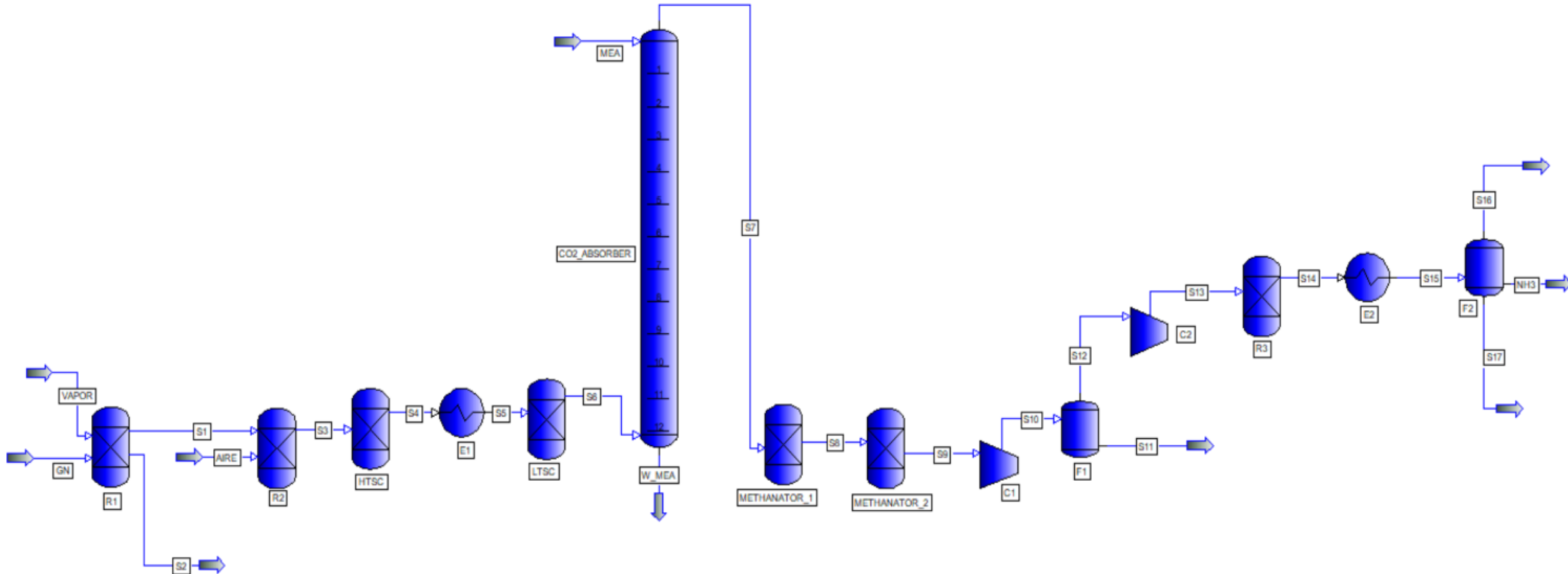


Figura 1. Diagrama de bloques de la metodología



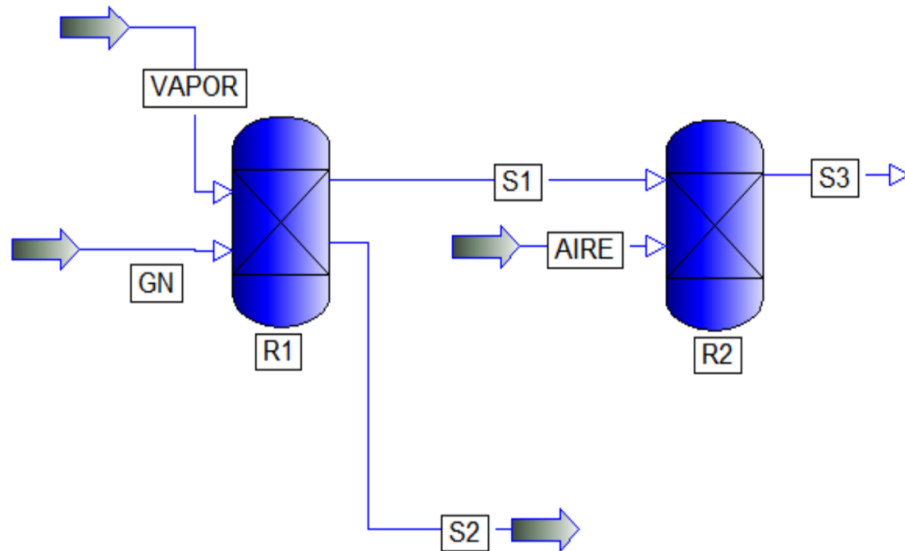
Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoníaco

Figura 2. Diagrama de flujo de proceso de la simulación 1



Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoníaco

Figura 3. Etapa de reformación de la simulación 1.



R1: Conversión de metano del 32.96%

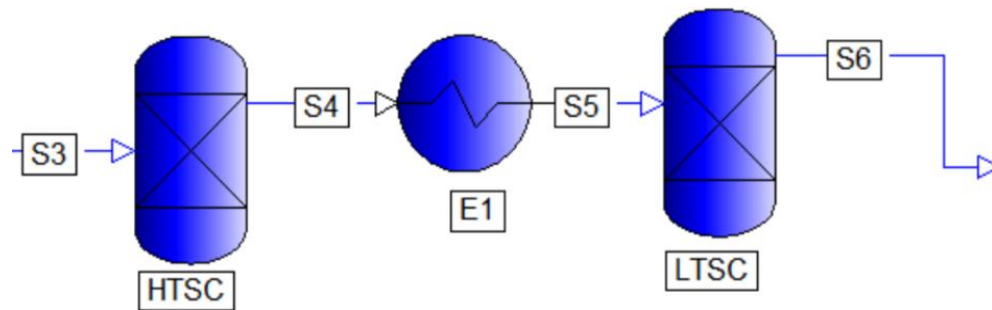
R2: Conversión de metano del 70%

Tabla 1. Lista de balance de materia de la etapa de reformación de la simulación 1.

| Nombre de la corriente | GN | VAPOR | AIRE | S1 | S2 | S3 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor | Vapor | Vapor | Liquido | Vapor |
| Temperatura (°F) | 699.800 | 474.800 | 86.000 | 349.356 | 349.356 | 1832.000 |
| Presión (psig) | 470.600 | 484.959 | 484.959 | 470.600 | 470.600 | 470.600 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 6.159 | 16.653 | 10.398 | 18.152 | 8.660 | 30.551 |
| Composición | | | | | | |
| Hidrogeno (H₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.386 | 0.000 | 0.360 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.014 | 0.000 | 0.790 | 0.005 | 0.000 | 0.272 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.055 | 0.000 | 0.033 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.210 | 0.000 | 0.000 | 0.006 |
| Metano (CH₄) | 0.985 | 0.000 | 0.000 | 0.224 | 0.000 | 0.068 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.001 | 0.000 | 0.000 | 0.055 | 0.000 | 0.098 |
| Agua (H ₂ O) | 0.000 | 1 | 0.000 | 0.275 | 1.000 | 0.163 |

Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoniaco

Figura 4. Etapa de conversión de alta y baja temperatura de la simulación 1.



HTSC: Conversión de (CO) del 31.53%

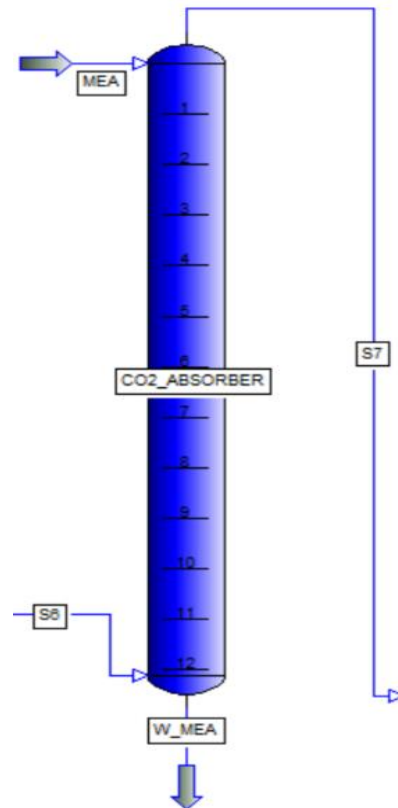
LTSC: Conversión de (CO) del 97.08 %

Tabla 2. Lista de balance de materia de la etapa de conversión de alta y baja temperatura de la simulación 1.

| Nombre de la corriente | S3 | S4 | S5 | S6 |
|--|--------------|----------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 1832.000 | 752.000 | 300.021 | 344.873 |
| Presión (psig) | 470.600 | 426.182 | 423.182 | 423.182 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 30.551 | 30.551 | 30.551 | 30.551 |
| Composición | | | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.360 | 0.370 | 0.370 | 0.392 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.272 | 0.272 | 0.272 | 0.272 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.033 | 0.022 | 0.022 | 0.001 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.006 | 0.006 | 0.006 | 0.006 |
| Metano (CH ₄) | 0.068 | 0.068 | 0.068 | 0.068 |
| Nombre de la corriente | S3 | S4 | S5 | S6 |
| Dióxido de carbono (CO₂) | 0.098 | 0.109 | 0.109 | 0.130 |
| Agua (H ₂ O) | 0.163 | 0.153 | 0.153 | 0.132 |

Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoniaco

Figura 5. Columna de absorción de CO₂ de la simulación 1.



% de recuperación de CO₂ del 92.22%

Tabla 3. Lista de balance de materia de la Columna de absorción de CO₂ de la simulación 1.

| Nombre de la corriente | S6 | MEA | S7 | W_MEA |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Liquido | Vapor | Liquido |
| Temperatura (°F) | 344.873 | 86.000 | 86.000 | 90.262 |
| Presión (psig) | 423.182 | 43.319 | 43.319 | 43.508 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 30.551 | 1000.000 | 22.251 | 1008.300 |
| Composición | | | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.392 | 0.000 | 0.533 | 0.000 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.272 | 0.000 | 0.368 | 0.000 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.001 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.006 | 0.000 | 0.008 | 0.000 |
| Metano (CH ₄) | 0.068 | 0.000 | 0.086 | 0.000 |
| Dióxido de carbono (CO₂) | 0.130 | 0.000 | 0.003 | 0.004 |
| Agua (H ₂ O) | 0.132 | 0.000 | 0.001 | 0.004 |
| Monoetanolamina (MEA) | 0.000 | 1 | 0.000 | 0.992 |

Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoniaco

Figura 6. Etapa de metanización de la simulación 1.

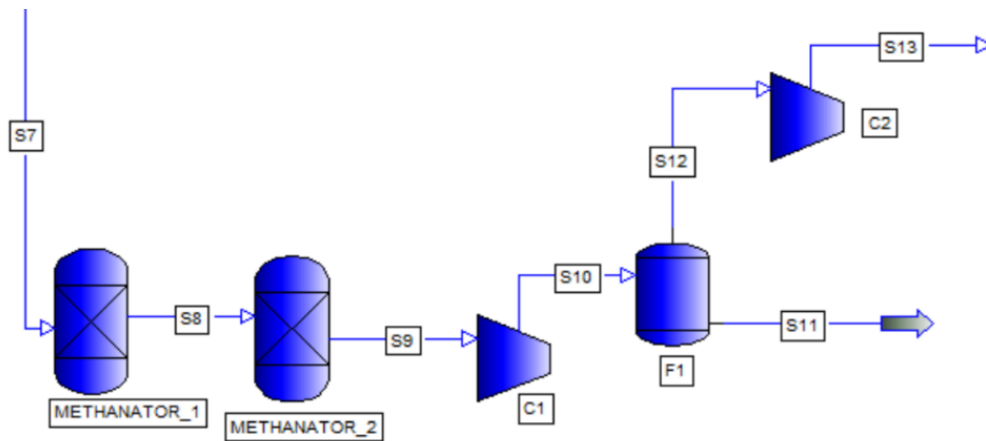
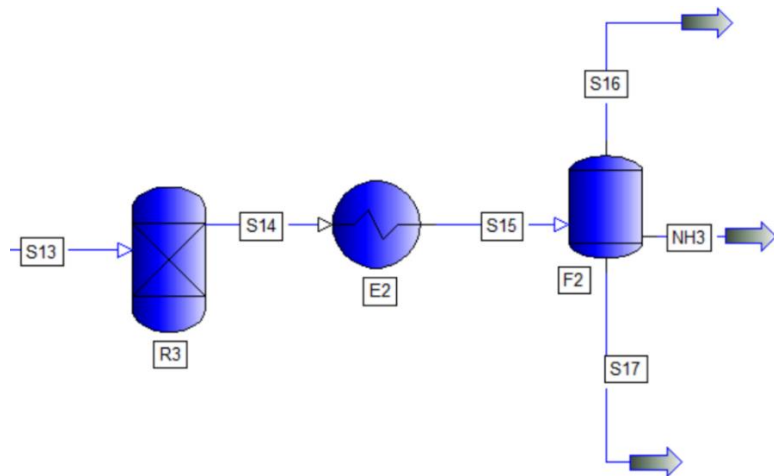


Tabla 4. Lista de balance de materia de la etapa de metanización de la simulación 1.

| Nombre de la corriente | S7 | S8 | S9 |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 86.000 | 102.155 | 572.000 |
| Presión (psig) | 43.319 | 43.319 | 43.319 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 22.251 | 22.194 | 22.054 |
| Composición | | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.533 | 0.531 | 0.521 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.368 | 0.369 | 0.371 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.008 | 0.008 | 0.008 |
| Nombre de la corriente | S7 | S8 | S9 |
| Metano (CH₄) | 0.086 | 0.087 | 0.091 |
| Dióxido de carbono (CO₂) | 0.003 | 0.003 | 0.000 |
| Agua (H ₂ O) | 0.001 | 0.002 | 0.008 |
| Monoetanolamina (MEA) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoníaco

Figura 7. Reactor de síntesis de amoníaco de la simulación 1.



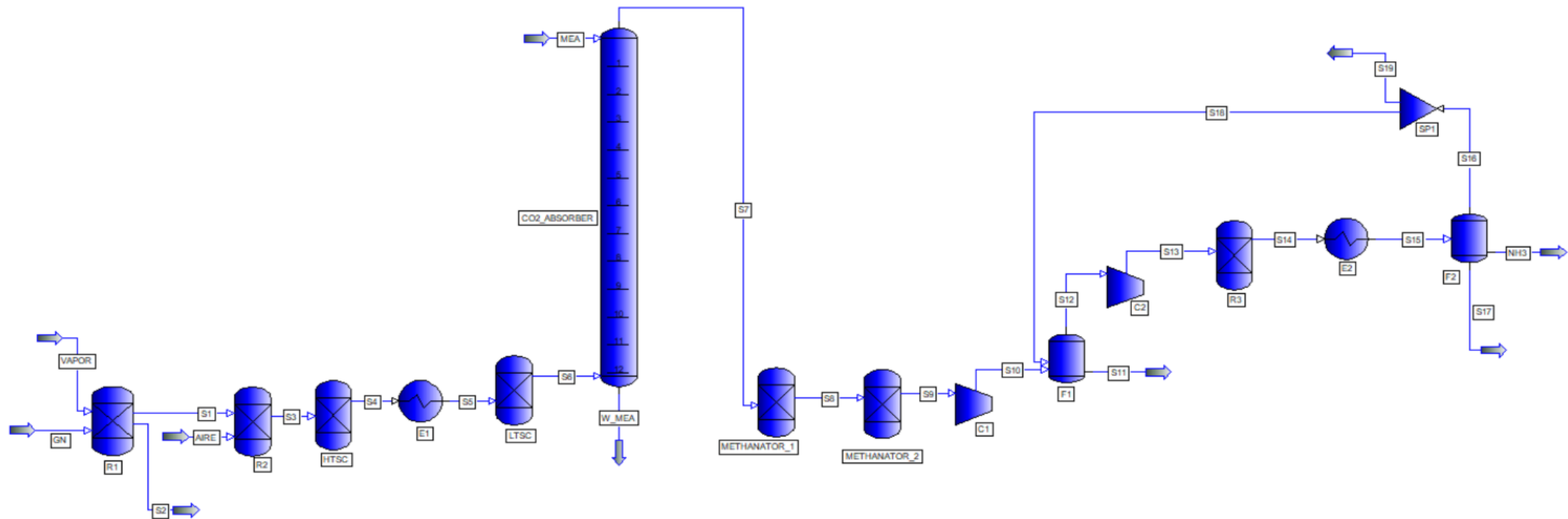
Conversión de hidrógeno en el reactor de síntesis del 37.24%

Tabla 5. Lista de balance de materia del reactor de síntesis de amoníaco de la simulación 1.

| Nombre de la corriente | S13 | S14 |
|---|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 363.745 | 752.546 |
| Presión (psig) | 1435.681 | 1405.681 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 21.885 | 19.030 |
| Composición | | |
| Hidrogeno (H₂) | 0.525 | 0.379 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.374 | 0.355 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.008 | 0.009 |
| Metano (CH ₄) | 0.092 | 0.105 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.000 | 0.000 |
| Amoníaco (NH₃) | 0.000 | 0.150 |
| Agua (H ₂ O) | 0.001 | 0.001 |
| Monoetanolamina (MEA) | 0.000 | 0.000 |

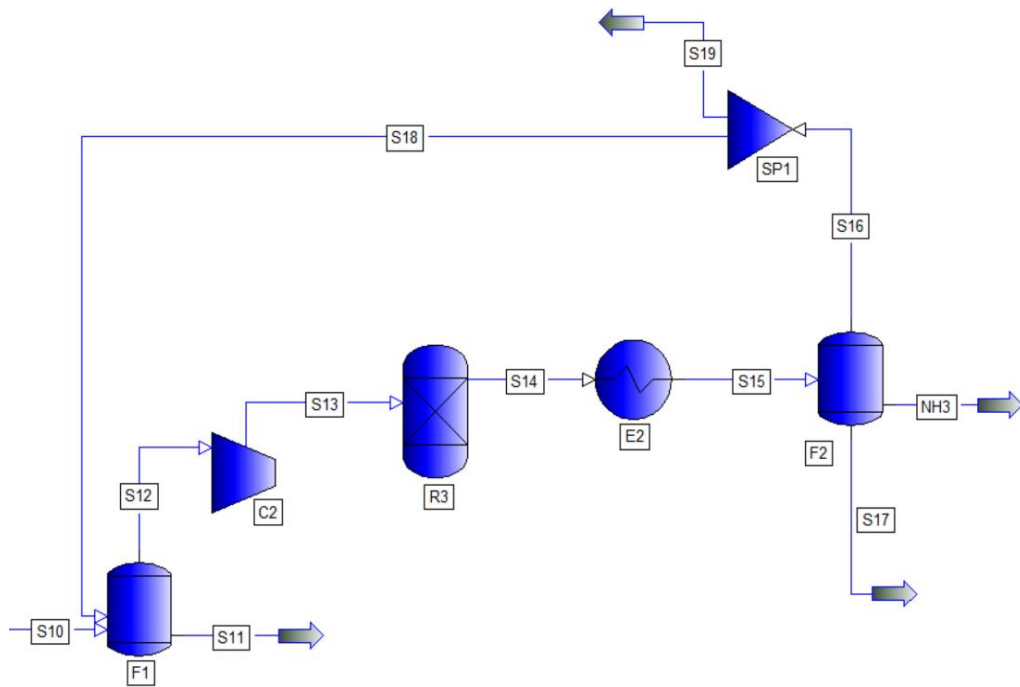
Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoniaco

Figura 8. diagrama de flujo de proceso de la simulación 1 con implementación del reciclo.



Simulación 1: Reformado de gas natural con vapor de agua para síntesis de amoniaco

Figura 9. Reactor de síntesis de amoniaco de la simulación 1.



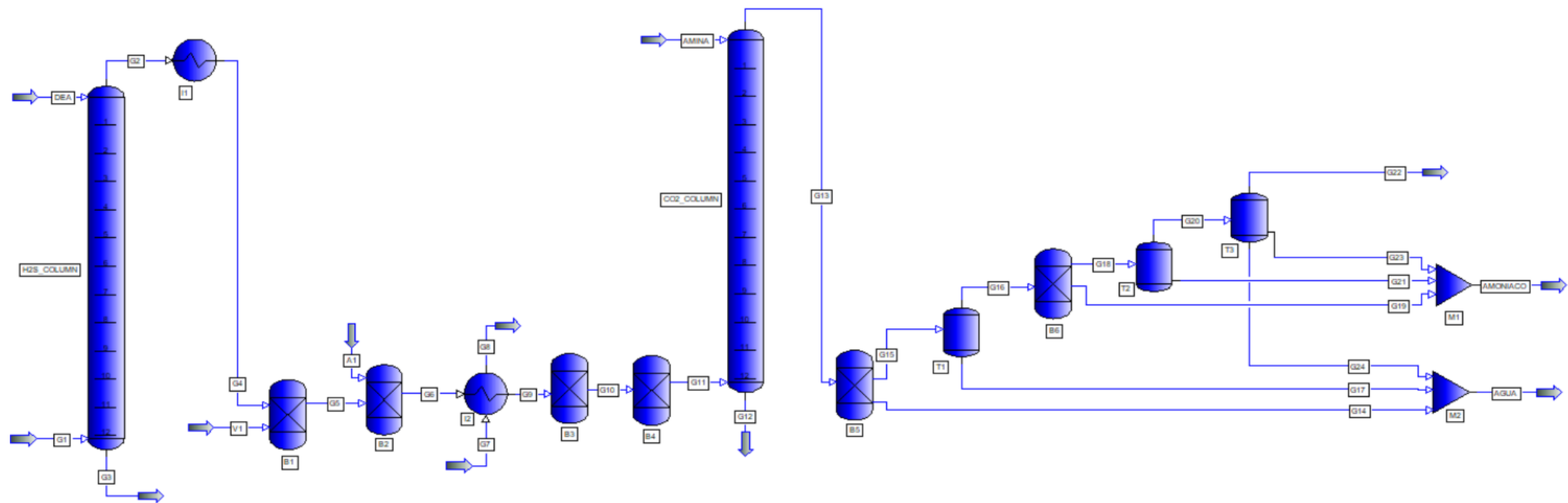
Conversión en el reactor de síntesis del 99.98%

Tabla 6. Lista de balance de materia del reactor de síntesis de amoniaco de la simulación 1.

| Nombre de la corriente | S13 | NH3 |
|---|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 355.370 | 30.000 |
| Presión (psig) | 1435.681 | 3000.00 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 303.371 | 7.265 |
| Composición | | |
| Hidrogeno (H₂) | 0.059 | 0.000 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.599 | 0.007 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.021 | 0.002 |
| Metano (CH ₄) | 0.261 | 0.010 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.000 | 0.000 |
| Amoniaco (NH₃) | 0.059 | 0.979 |
| Agua (H ₂ O) | 0.001 | 0.000 |
| Monoetanolamina (MEA) | 0.000 | 0.001 |

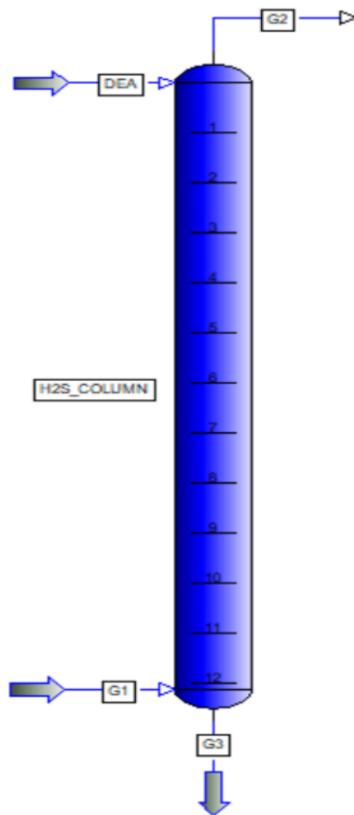
Simulación 2: Reformado de gas natural con vapor de agua para la síntesis de amoníaco, con contenido de ácido sulfhídrico en la corriente de gas natural.

Figura 10. Diagrama de flujo de proceso de la simulación 2.



Simulación 2: Reformado de gas natural con vapor de agua para la síntesis de amoníaco, con contenido de ácido sulfhídrico en la corriente de gas natural.

Figura 11. Columna de desulfuración de la simulación 2.



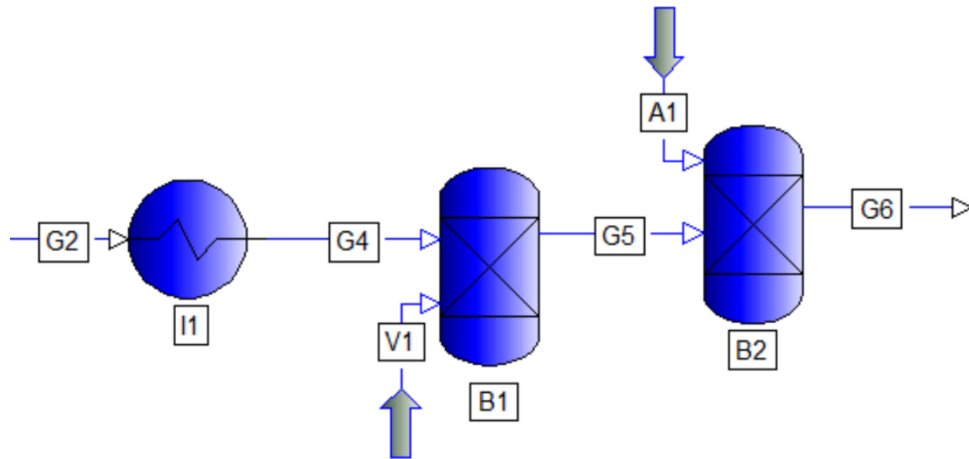
El porcentaje de recuperación del ácido sulfhídrico en la corriente de salida del líquido es del 100%.

Tabla 7. Lista de balance de materia de la columna de desulfuración de la simulación 2.

| Nombre de la corriente | G1 | DEA | G2 | G3 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Mezcla | Líquido | Vapor | Líquido |
| Temperatura (°F) | 86.000 | 95.000 | 95.000 | 136.812 |
| Presión (psig) | 985.304 | 980.304 | 885.304 | 885.484 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 5.424 | 13.000 | 4.319 | 14.105 |
| Composición | | | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.050 | 0.000 | 0.062 | 0.000 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.050 | 0.000 | 0.062 | 0.000 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Metano (CH ₄) | 0.700 | 0.000 | 0.875 | 0.001 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.050 | 0.000 | 0.000 | 0.019 |
| Ácido sulfhídrico (H₂S) | 0.050 | 0.000 | 0.000 | 0.019 |
| Agua (H₂O) | 0.100 | 0.800 | 0.001 | 0.776 |
| Dietanolamina (DEA) | 0.000 | 0.200 | 0.000 | 0.184 |

Simulación 2: Reformado de gas natural con vapor de agua para la síntesis de amoníaco con contenido de ácido sulfhídrico en la corriente de gas natural.

Figura 12. Etapa de reformación de la simulación 2.



B1: Conversión del 52.9%

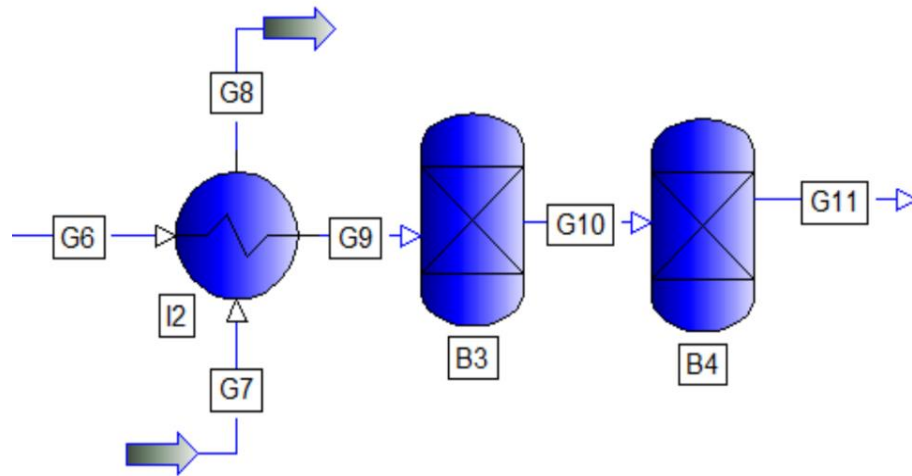
B2: Conversión del 99.9%

Tabla 8. Lista de balance de materia de la etapa de reformación de la simulación 2.

| Nombre de la corriente | G4 | V1 | A1 | G5 | G6 |
|---|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor | Vapor | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 470.000 | 470.000 | 80.000 | 1660.000 | 2434.522 |
| Presión (psig) | 882.304 | 485.000 | 499.000 | 460.000 | 435.000 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 4.319 | 7.561 | 10.398 | 15.880 | 27.650 |
| Composición | | | | | |
| Hidrogeno (H₂) | 0.062 | 0.000 | 0.000 | 0.458 | 0.362 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.062 | 0.000 | 0.790 | 0.017 | 0.307 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.063 | 0.036 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.210 | 0.000 | 0.000 |
| Metano (CH₄) | 0.875 | 0.000 | 0.000 | 0.112 | 0.000 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.063 | 0.100 |
| Agua (H ₂ O) | 0.001 | 1 | 0.000 | 0.287 | 0.194 |

Simulación 2: Reformado de gas natural con vapor de agua para la síntesis de amoníaco, con contenido de ácido sulfhídrico en la corriente de gas natural.

Figura 13. Etapa de conversión de alta y baja temperatura de la simulación 2.



B3: conversión de 78.43%

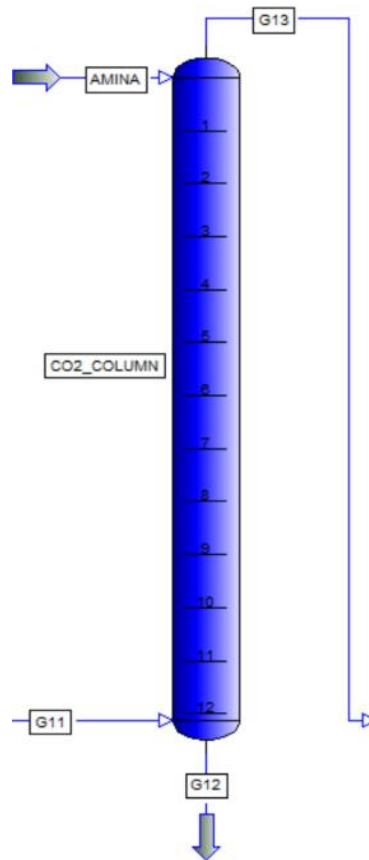
B4: conversión de 98.75%

Tabla 9. Lista de balance de materia de la etapa de conversión de alta y baja temperatura de la simulación 2.

| Nombre de la corriente | G9 | G10 | G11 |
|--|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 752.000 | 572.000 | 302.000 |
| Presión (psig) | 432.00 | 407.000 | 407.000 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 27.650 | 27.650 | 27.650 |
| Composición | | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.362 | 0.390 | 0.398 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.307 | 0.307 | 0.307 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.036 | 0.008 | 0.000 |
| Nombre de la corriente | G9 | G10 | G11 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Metano (CH ₄) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Dióxido de carbono (CO₂) | 0.100 | 0.129 | 0.136 |
| Ácido sulfhídrico (H ₂ S) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Agua (H ₂ O) | 0.194 | 0.166 | 0.159 |

Simulación 2: Reformado de gas natural con vapor de agua para la síntesis de amoníaco, con contenido de ácido sulfhídrico en la corriente de gas natural.

Figura 14. Columna de absorción de (CO₂) de la simulación 2.



El porcentaje de recuperación del (CO₂) es del 100%.

Tabla 10. Lista de balance de materia de la columna de absorción de (CO₂) de la simulación 2.

| Nombre de la corriente | G11 | AMINA | G13 | G12 |
|--|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Líquido | Vapor | Líquido |
| Temperatura (°F) | 302.000 | 122 | 122.901 | 90.262 |
| Presión (psig) | 407.000 | 565.304 | 330.000 | 43.508 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 27.650 | 1000.000 | 18.779 | 1008.300 |
| Composición | | | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.398 | 0.000 | 0.566 | 0.000 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.307 | 0.000 | 0.428 | 0.000 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Metano (CH ₄) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Dióxido de carbono (CO₂) | 0.136 | 0.000 | 0.000 | 0.004 |
| Ácido sulfhídrico (H ₂ S) | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Agua (H₂O) | 0.159 | 0.700 | 0.005 | 0.698 |
| Dietanolamina (DEA) | 0.000 | 0.300 | 0.000 | 0.297 |

Simulación 2: Reformado de gas natural con vapor de agua para la síntesis de amoníaco, con contenido de ácido sulfhídrico en la corriente de gas natural.

Figura 15. Reactor de metanización de la simulación 2.

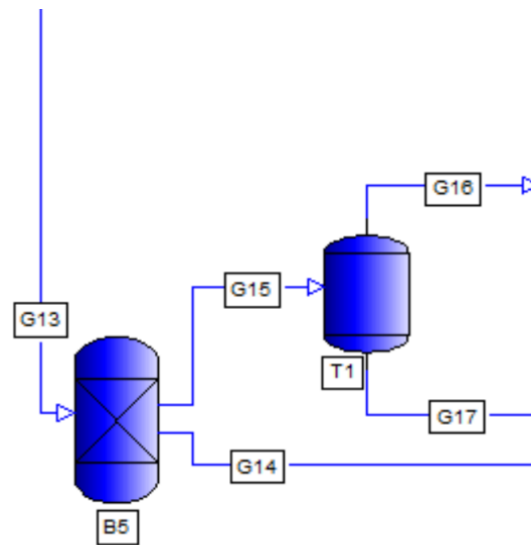
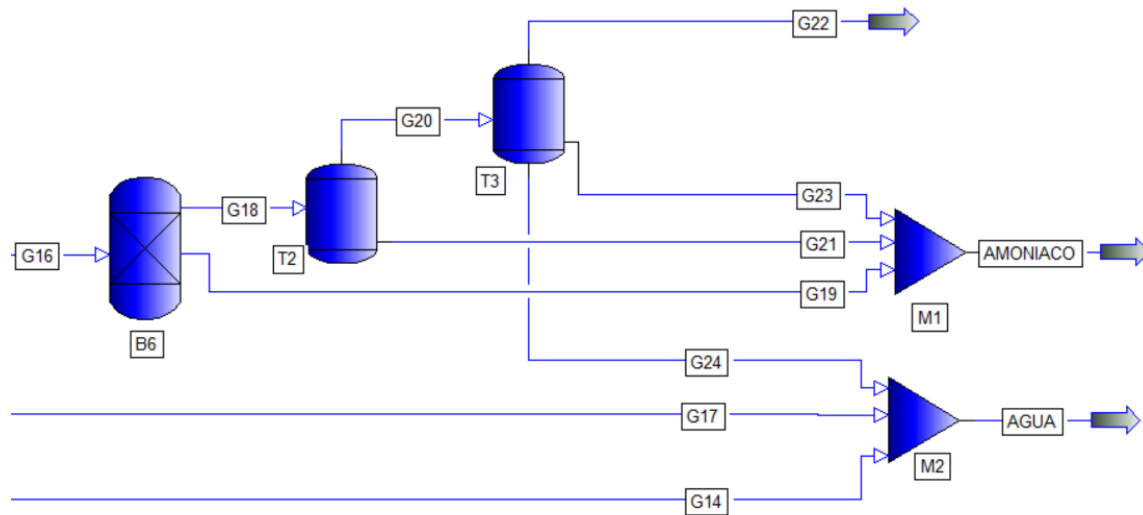


Tabla 11. Lista de balance de materia del reactor de metanización de la simulación 2.

| Nombre de la corriente | G13 | G14 | G15 |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Líquida | Vapor |
| Temperatura (°F) | 122.901 | 124.152 | 124.152 |
| Presión (psig) | 330.000 | 330.000 | 330.000 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 18.779 | 0.008 | 18.747 |
| Composición | | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.566 | 0.000 | 0.565 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.428 | 0.000 | 0.429 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Metano (CH₄) | 0.000 | 0.000 | 0.001 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Agua (H ₂ O) | 0.005 | 1.00 | 0.006 |
| Dietanolamina (DEA) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Simulación 2: Reformado de gas natural con vapor de agua para la síntesis de amoníaco, con contenido de ácido sulfhídrico en la corriente de gas natural.

Figura 16. Reactor de síntesis de la simulación 2.



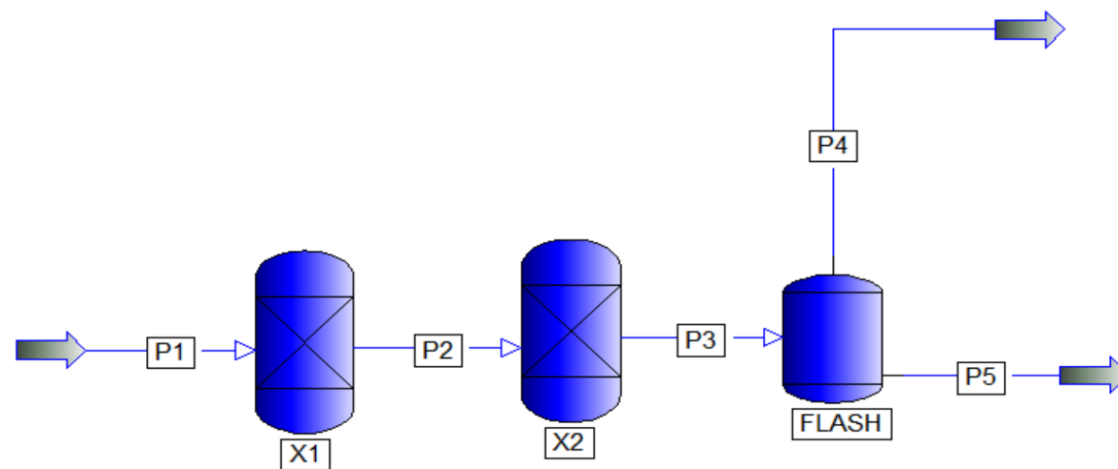
El porcentaje de conversión en reactor es del 99.86%.

Tabla 12. Lista de balance de materia del reactor de síntesis de la simulación 2.

| Nombre de la corriente | G16 | G18 | G19 |
|---|--------------|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor | Líquido |
| Temperatura (°F) | 20.000 | 93.571 | 93.571 |
| Presión (psig) | 330.000 | 330.000 | 330.000 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 18.647 | 11.392 | 0.206 |
| Composición | | | |
| Hidrogeno (H₂) | 0.568 | 0.001 | 0.000 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.431 | 0.397 | 0.001 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Oxígeno (O ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Metano (CH ₄) | 0.001 | 0.001 | 0.000 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Amoniaco (NH₃) | 0.000 | 0.601 | 0.998 |
| Agua (H ₂ O) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| Dietanolamina (DEA) | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Simulación 3: Obtención de amoníaco a partir de gas de síntesis.

Figura 17. Diagrama de flujo de proceso de la simulación 3.



Simulación 3: Obtención de amoníaco a partir de gas de síntesis.

Figura 18. Reactor de metanización (X1) de la simulación 3.

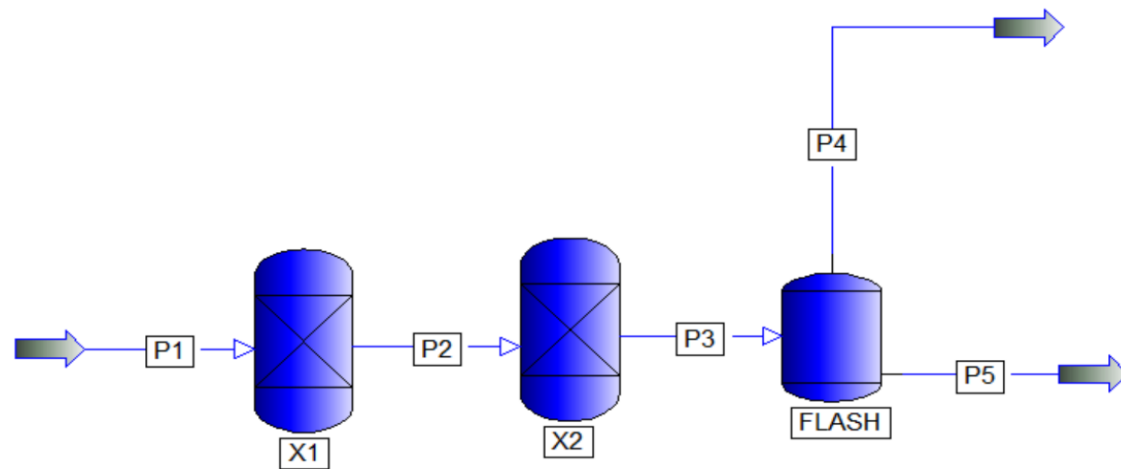
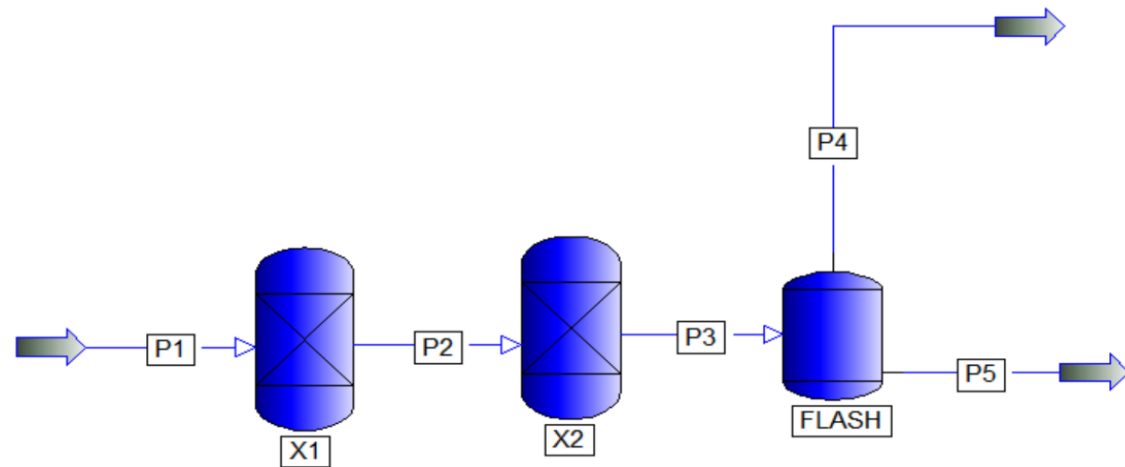


Tabla 13. Lista de balance de materia del reactor de metanización (X1) de la simulación 3.

| Nombre de la corriente | P1 | P2 |
|---|--------------|--------------|
| Fase | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 122.900 | 129.682 |
| Presión (psig) | 330.000 | 300.000 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 18.780 | 18.760 |
| Composición | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.744 | 0.744 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.248 | 0.0248 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.001 | 0.000 |
| Metano (CH₄) | 0.007 | 0.008 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.000 | 0.000 |
| Agua (H ₂ O) | 0.000 | 0.001 |

Simulación 3: Obtención de amoníaco a partir de gas de síntesis.

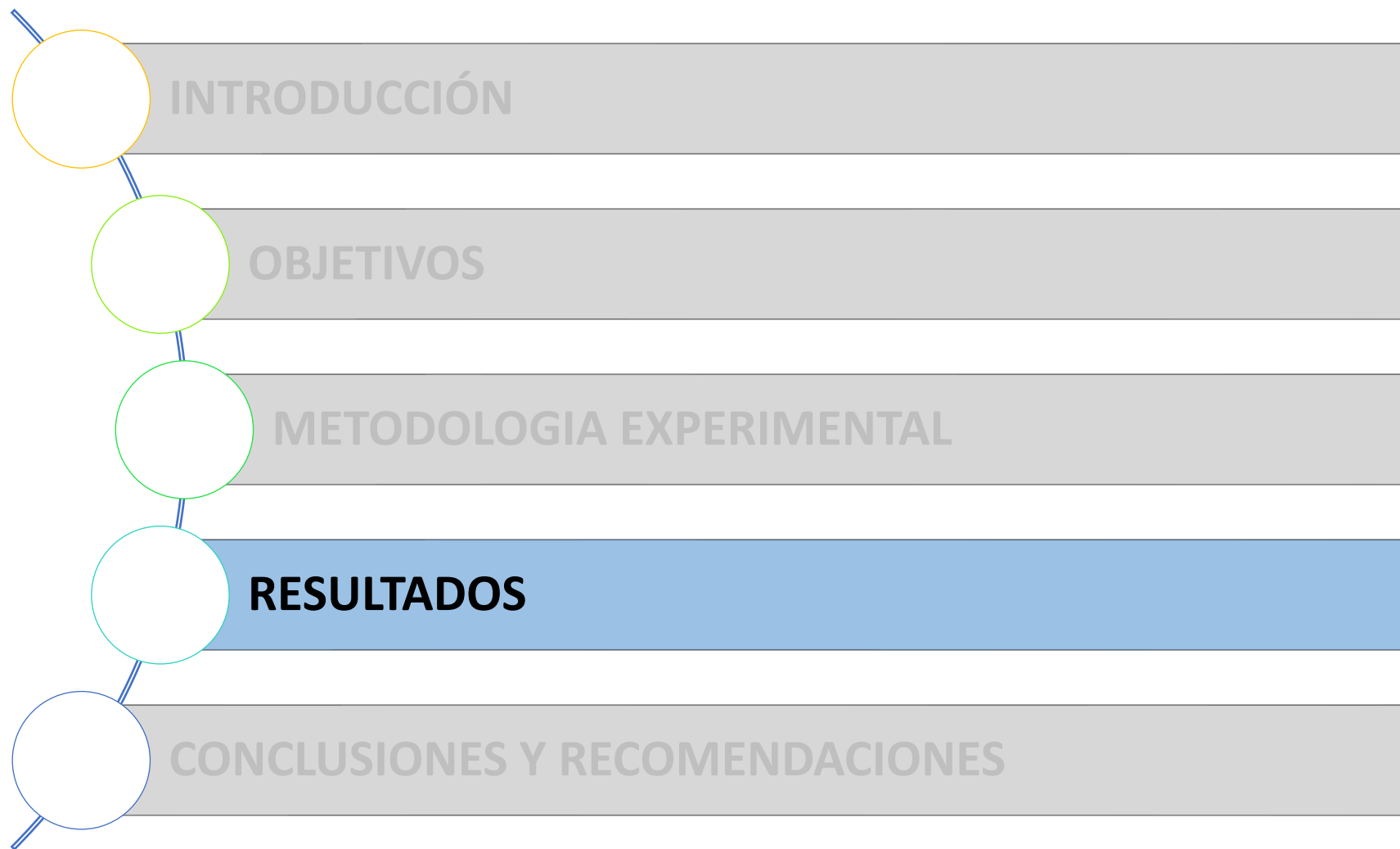
Figura 19. Reactor de síntesis (X2) de la simulación 3.



El porcentaje de conversión en reactor es del 94.29%

Tabla 14. Lista de balance de materia del reactor de síntesis (X2) de la simulación 3.

| Nombre de la corriente | P2 | P3 |
|---|---------|-------|
| Fase | Vapor | Vapor |
| Temperatura (°F) | 129.682 | 247 |
| Presión (psig) | 300.000 | 300 |
| Flujo ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 18.760 | 9.991 |
| Composición | | |
| Hidrogeno (H ₂) | 0.744 | 0.080 |
| Nitrógeno (N ₂) | 0.0248 | 0.027 |
| Monóxido de carbono (CO) | 0.000 | 0.000 |
| Metano (CH ₄) | 0.008 | 0.015 |
| Nombre de la corriente | P2 | P3 |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | 0.000 | 0.000 |
| Agua (H ₂ O) | 0.001 | 0.000 |
| Amoníaco (NH ₃) | 0.000 | 0.878 |

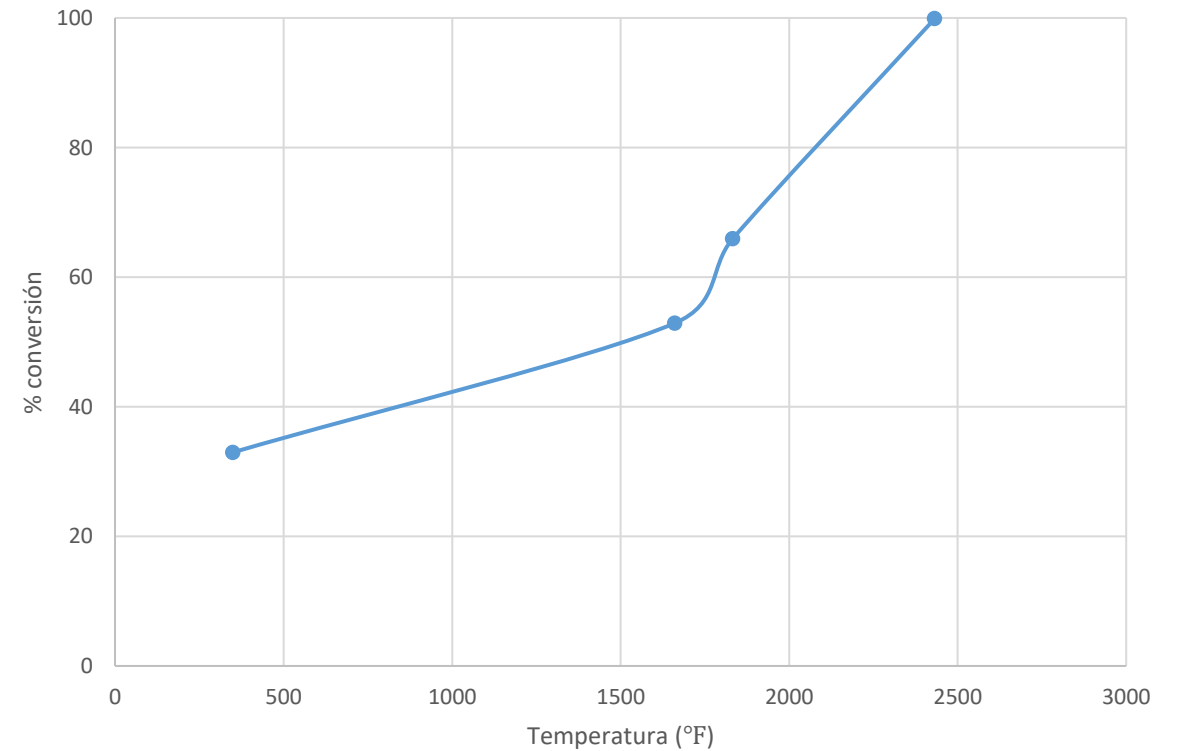


Etapa de reformación

Tabla 15. Porcentaje de conversión en la etapa de reformación.

| Etapa de reformación | Conversión (%) | Conversión (%) |
|-----------------------|----------------|----------------|
| | Simulación 1 | Simulación 2 |
| Reformador primario | 32.96 | 52.90 |
| Reformador secundario | 65.92 | 99.91 |

Figura 20. Temperatura vs % conversión en la etapa de reformación.

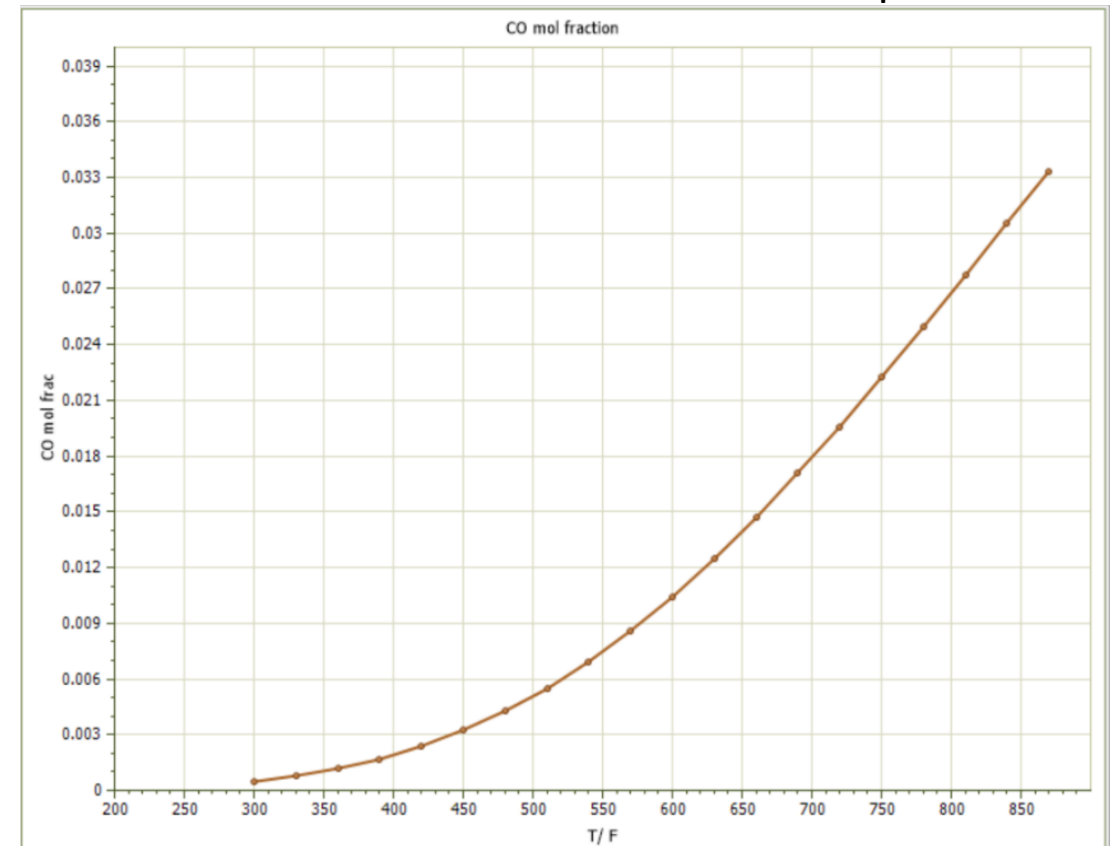


Etapa de conversión de alta y baja temperatura.

Tabla 16. Porcentaje de conversión en los reactores de alta y baja temperatura.

| Etapa de conversión de alta y baja temperatura | Conversión (%) | Conversión (%) |
|--|----------------|----------------|
| | Simulación 1 | Simulación 2 |
| Reactor de alta temperatura | 31.53 | 78.43 |
| Reactor de baja temperatura | 97.08 | 98.75 |

Figura 21. Temperatura vs la fracción molar de CO en la corriente de salida de esta etapa.



Columna de absorción de dióxido de carbono.

Tabla 17. Porcentaje de recuperación de dióxido de carbono en la corriente líquida.

| Columna de absorción de (CO ₂) | (%) de recuperación de (CO ₂) | Agente removedor | Fracción molar de (CO ₂) en la corriente de vapor |
|--|---|------------------|---|
| Simulación 1 | 92.22 | MEA | 0.003 |
| Simulación 2 | 99.99 | DEA | 0.000 |

Reactor de síntesis de amoníaco.

Tabla 18. Porcentaje de conversión en un paso.

| Reactor de síntesis de amoníaco (NH ₃) | Conversión en un paso (%) |
|--|---------------------------|
| Simulación 1 | 37.24 |
| Simulación 1 con reciclo | 99.98 |
| Simulación 2 | 99.86 |
| Simulación 3 | 94.29 |

Tabla 19. Composición de amoniaco en la corriente de salida del proceso y flujo molar de amoniaco producido .

| | Composición de amoniaco | Amoniaco producido (NH ₃) ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) |
|--------------------------|-------------------------|---|
| Simulación 1 | 0.983 | 2.0054 |
| Simulación 1 con reciclo | 0.979 | 7.1112 |
| Simulación 2 | 0.999 | 7.0470 |
| Simulación 3 | 0.997 | 8.5811 |

Figura 22. Temperatura dentro del reactor vs flujo molar de amoniaco producido .

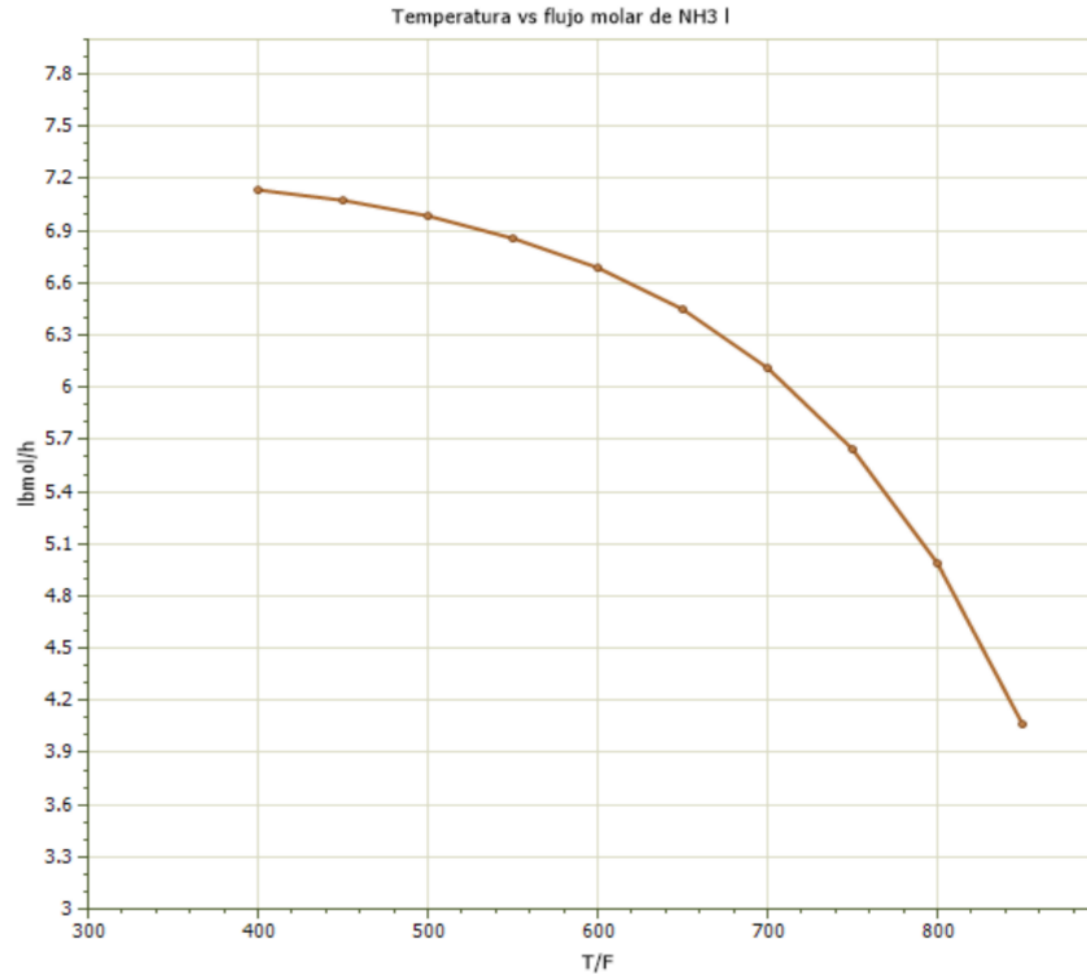


Figura 23. Presión de salida del reactor vs flujo molar de amoniaco producido.

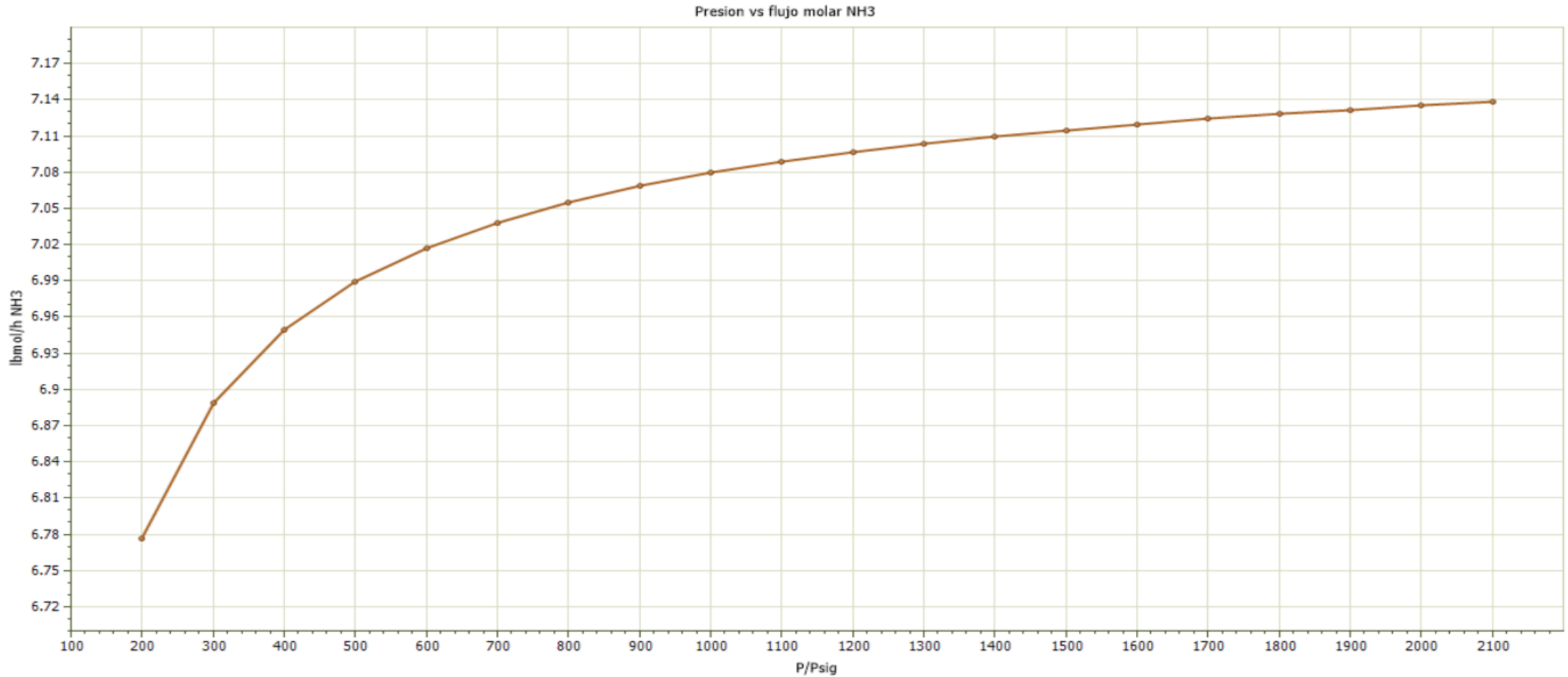


Figura 24. Materia prima vs flujo molar de amoníaco producido.

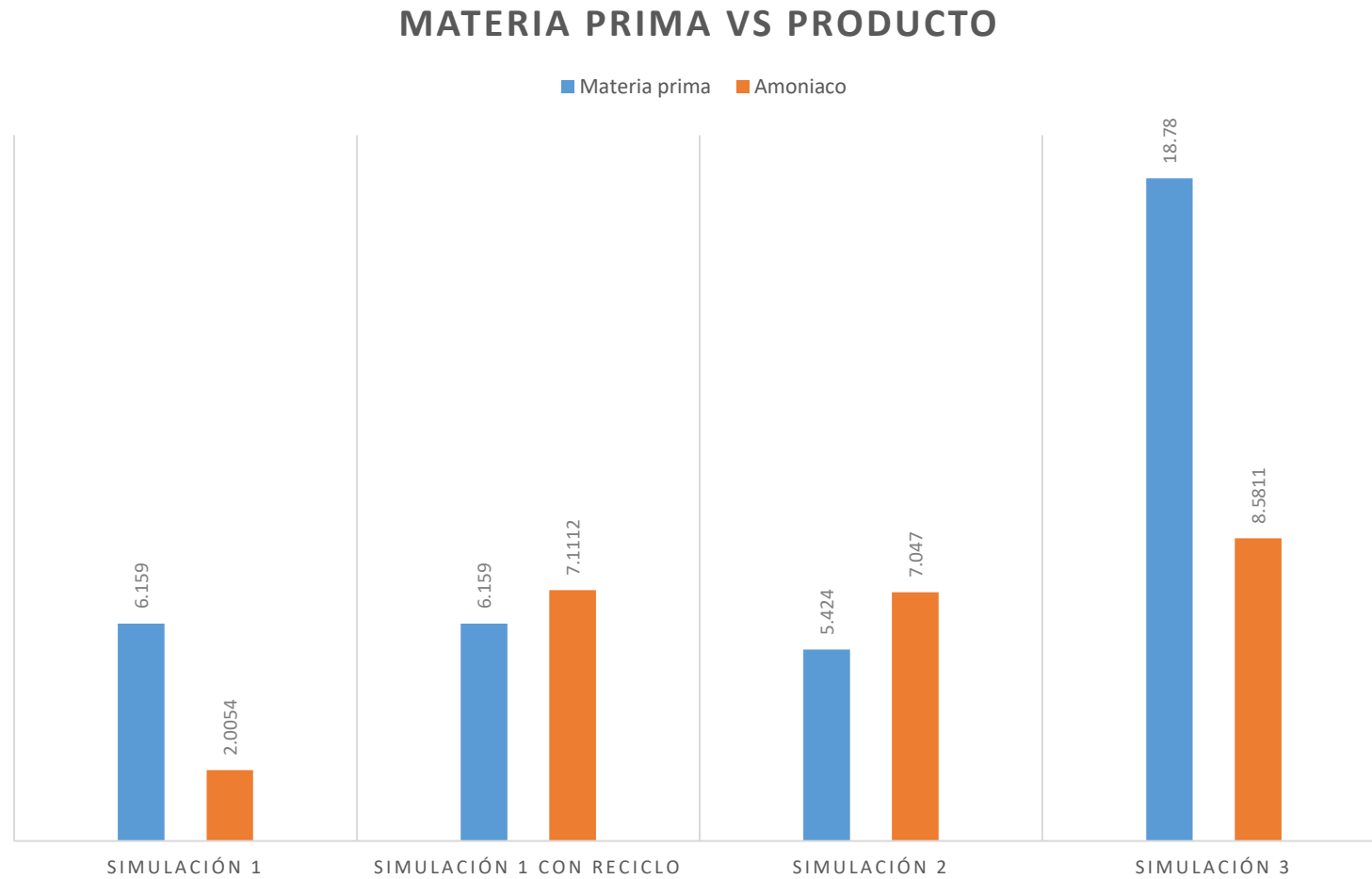
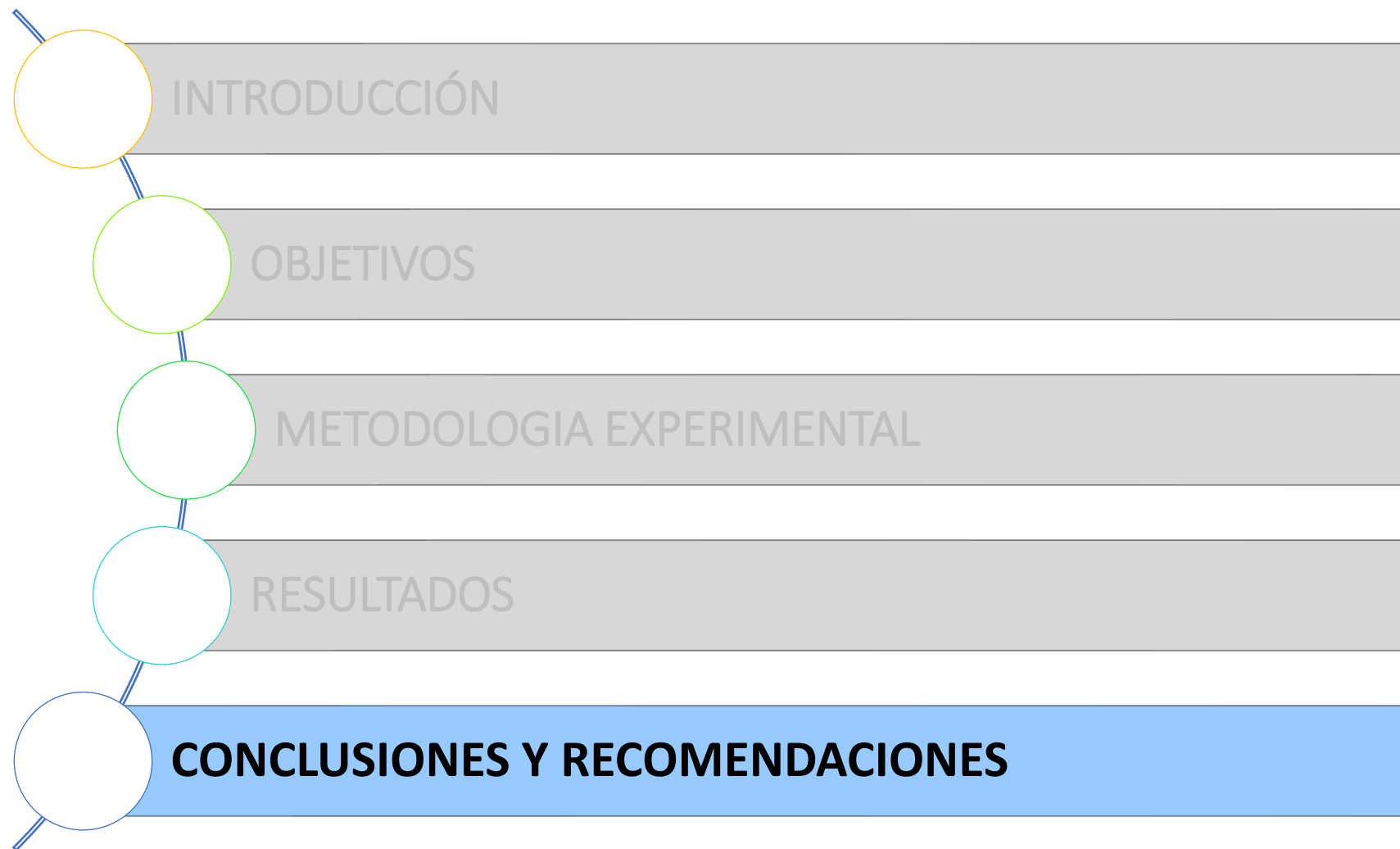


Tabla 20. Consumo energético de las simulaciones del proceso de síntesis de amoníaco.

| | Simulación 1 | Simulación 1 con reciclo | Simulación 2 | Simulación 3 |
|--|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| Consumo energético del proceso en KWh | 296.915 | 670.981 | 287.810 | 30.234 |

Tabla 21. Resumen de los resultados obtenidos en la síntesis de amoníaco.

| | Simulación 1 | Simulación 1 con reciclo | Simulación 2 | Simulación 3 |
|--|--------------|-----------------------------|--------------|--------------|
| Flujo molar de materia prima ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 6.1590 | 6.1590 | 5.4240 | 18.780 |
| Flujo molar de Amoníaco en la corriente de producto ($\frac{\text{lbmol}}{\text{h}}$) | 2.0054 | 7.1112 | 7.0470 | 8.5811 |
| Composición de amoníaco en la corriente de producto | 0.9830 | 0.9790 | 0.999 | 0.997 |
| % conversión | 37.24 | 99.98 | 99.86 | 94.29 |
| Consumo energético del proceso en KWh | 296.915 | 670.981 | 287.810 | 30.234 |





- ✓ El porcentaje de conversión de la simulación 1 que se obtuvo a partir de reformado de gas natural con vapor resultó ser de apenas el 37.24%, por lo que se implementó un reciclo a la corriente de residuos hacia el separador antes del reactor de síntesis dando como resultado 99.98% de conversión del hidrogeno molecular.
- ✓ El flujo molar de amoniaco en la corriente de salida en la simulación 1 con la implementación del reciclo resultó ser de 7.1112 lbmol/h con una composición de 0.979.
- ✓ Se determinó que la Dietanolamina (DEA) es el agente removedor con mayor porcentaje de recuperación de ácido sulfhídrico y dióxido de carbono en la corriente de salida liquida con 100% y 99.9% respectivamente.



- ✓ El porcentaje de conversión en la simulación 2 resultó ser del 99.86% con un flujo molar de 7.1112 lbmol/h y alcanzó una composición de 0.999 de amoníaco en la corriente de salida.
- ✓ En la simulación 3 se obtuvo una conversión del 94.29%, se produjo un flujo molar de amoníaco de 8.5811 lbmol/h a y alcanzó una composición de 0.997 en la corriente de salida del proceso.
- ✓ Se comparó las simulaciones en cuanto a consumo energético, conversión y composición del producto. La simulación óptima es la numero 2 con un consumo energético total de 287.810 KWh, conversión de 99.86 y composición de amoníaco de 0.999 en la corriente de salida del proceso.

- ✓ A pesar que la simulación 3 tiene un menor valor en el consumo energético del proceso, la simulación no se acerca a la realidad, ya que en la industria ecuatoriana de procesamiento de gases aun no existen plantas de síntesis de hidrogeno y nitrógeno, por lo que es difícil obtener materia prima con alto contenido de estos gases para la producción de amoniaco.
- ✓ En base a las tres simulaciones realizadas se concluye que para obtener un flujo óptimo de producto es necesario trabajar dentro del reactor con un intervalo de temperaturas de (350 a 550)°F al igual que con presiones de salida del reactor de síntesis en un intervalo de (300 a 600) Psig.

- ✓ Utilizar en el reactor de síntesis de la simulación 1 el intervalo óptimo de temperatura y presión de salida e identificar los cambios existentes en el flujo molar de amoníaco producido.
- ✓ Los “Case Study” para la presentación de gráficos mediante el software de simulación Pro/II deben ser hechos de manera individual y no de manera simultánea, ya que el simulador presenta errores y no muestra todas las ilustraciones al mismo tiempo.
- ✓ El amoníaco es un producto intermedio en el árbol petroquímico, por lo que se recomienda utilizarlo en posteriores simulaciones como materia prima para la producción de fertilizantes.

GRACIAS