

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería Química

# DISEÑO BÁSICO DE UNA PLANTA PARA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO DE 100 TPD

Autor: Pablo Miguel Palma Rivilla

Tutor: Ángel L. Villanueva Perales

Dpto. Ingeniería Química y Ambiental  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024





Trabajo Fin de Grado  
Ingeniería Química

# **DISEÑO BÁSICO DE UNA PLANTA PARA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO FOSFÓRICO DE 100 TPD**

Pablo Miguel Palma Rivilla

Tutor:

Ángel L. Villanueva Perales

Profesor Titular

Dpto. de Ingeniería Química y Ambiental

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2024



Trabajo Fin de Grado: DISEÑO BÁSICO DE UNA PLANTA PARA PRODUCCIÓN DE ÁCIDO  
FOSFÓRICO DE 100 TPD

Autor: Pablo Miguel Palma Rivilla

Tutor: Ángel L Villanueva Perales

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El secretario del Tribunal



*A mi familia*

*A mis maestros*



# Agradecimientos

---

Quiero comenzar expresando mi profundo agradecimiento a las personas y entidades que han sido pilares fundamentales en mi trayecto académico y en la realización de mi Trabajo de Fin de Grado.

En primer lugar, mi familia, cuyo apoyo inquebrantable ha sido un faro en los momentos más desafiantes. Mis padres, los cuales han estado a mi lado en cada paso de esta travesía, brindándome fuerza y aliento incondicional. A mi querida hermana le agradezco su constante respaldo, ánimo y actitud positiva en los momentos cruciales.

Mi tutor académico, Ángel Luis Villanueva Perales, merece un reconocimiento especial. Su sabiduría y dedicación han sido esenciales para el desarrollo de este TFG. La paciencia que ha demostrado al aclarar mis dudas y su disposición constante han sido invaluable.

No puedo pasar por alto la contribución de todo el cuerpo docente de la carrera de ingeniería química. Cada uno de mis profesores ha sido un guía en mi formación académica, compartiendo conocimiento y orientación que ha enriquecido mi aprendizaje.

También deseo agradecer a otros colaboradores y fuentes de apoyo que, de diversas maneras, han contribuido a este logro. Amigos, compañeros de clase y, posiblemente, instituciones han dejado su huella en este camino y les estoy sinceramente agradecido.

En resumen, este TFG ha sido posible gracias al esfuerzo y la colaboración de todos ustedes. Vuestra influencia ha sido determinante en mi crecimiento académico, y por eso, quiero expresar mi gratitud profunda y sincera.



# Resumen

---

Este Trabajo de Fin de Grado (TFG) se enfoca en el diseño básica de una planta de producción de ácido fosfórico. El proceso se desarrolló de manera metódica, comenzando con una investigación para recopilar la información esencial como punto de partida.

A partir de esta recopilación, se delinearon las diferentes etapas del proceso, considerando diversas configuraciones para alcanzar un diseño conceptual sólido. Luego, se avanzó al diseño detallado de los subsistemas clave del proceso, que incluyen el preprocesamiento de las materias primas, la conversión de materias primas en ácido fosfórico crudo y su posterior tratamiento para obtener un producto final de alta calidad. Este proceso de diseño abarcó molinos, reactores, equipos de separación, sistemas de impulsión y evaporadores entre otros.

Para respaldar y justificar cada cálculo y ecuación utilizados en el diseño de los equipos, se emplearon herramientas de cálculo como el EES y Excel. Estos procedimientos están detallados en la memoria de cálculo.

El TFG también presenta anexos que incluyen el código utilizado en el software EES y tablas de resultados.

Es importante señalar que este proyecto se centra en el diseño básico de la planta de producción de ácido fosfórico, excluyendo etapas posteriores de tratamiento de la fase acuosa, la fase gaseosa y los residuos sólidos. Además, se destaca la relevancia de este trabajo como punto de partida para futuros desarrollos y optimizaciones en la producción de ácido fosfórico.



# Abstract

---

This Final Degree Project (TFG) focuses on the basic engineering of a phosphoric acid production plant. The process was developed in a methodical manner, starting with an investigation to gather essential information as a starting point.

From this collection, the different stages of the process were outlined, considering various configurations to reach a solid conceptual design. Then, the detailed design of the key subsystems of the process was developed, including the pre-processing of raw materials, the conversion of raw materials into crude phosphoric acid and its subsequent treatment to obtain a high quality final product. This design process involved mills, reactors, separation equipment, drive systems and evaporators, among others.

Calculation tools such as EES and Excel were used to support and justify each calculation and equation used in the design of the equipment. These procedures are detailed in the calculation report.

The TFG also presents annexes that include the code used in the EES software and tables of results.

It is important to note that this project concentrates on the basic engineering of the phosphoric acid production plant, excluding subsequent stages of treatment of the aqueous phase, gas phase and solid waste. Furthermore, the relevance of this work as a starting point for future developments and optimizations in the production of phosphoric acid is emphasized.



# Índice

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
Índice de Tablas	xviii
Índice de Figuras	xx
<b>Notación</b>	<b>xxii</b>
<b>1 Objetivos y alcances</b>	<b>25</b>
<b>2 Introducción</b>	<b>27</b>
2.1 <i>Usos del ácido fosfórico.</i>	27
2.2 <i>Procesos de producción del ácido fosfórico.</i>	27
2.2.1 <i>Vía térmica</i>	28
2.2.2 <i>Vía húmeda</i>	32
2.3 <i>Impacto Ambiental de la Producción de Ácido Fosfórico</i>	37
2.3.1 <i>Riesgos Medioambientales Asociados a Emisiones y Residuos</i>	37
2.3.2 <i>Emisión de Fluoruros en el Entorno</i>	37
2.3.3 <i>Emisión de Polvo en el Aire</i>	37
2.3.4 <i>Contaminación del Agua</i>	37
<b>3 Memoria descriptiva</b>	<b>40</b>
3.1 <i>Pureza de las materias primas y escala de producción.</i>	40
3.2 <i>Descripción del proceso.</i>	40
3.2.1 <i>Líneas de entrada y salida</i>	41
3.2.2 <i>Proceso detallado</i>	41
3.3 <i>Descripción de los equipos.</i>	43
3.3.1 <i>Molino de bolas (M-101)</i>	43
3.3.2 <i>Tamiz (T-101)</i>	43
3.3.3 <i>Reactor (R-101)</i>	44
3.3.4 <i>Bombas (P-101 a P-105)</i>	45
3.3.5 <i>Filtro (F-101)</i>	45
3.3.6 <i>Evaporador (D-101)</i>	45
<b>4 Memoria de cálculo.</b>	<b>48</b>
4.1 <i>Cálculo de las propiedades de las sustancias</i>	48
4.1.1 <i>Peso molecular</i>	48

4.1.2	Densidad	48
4.1.3	Entalpía	49
4.2	<i>Balance de Materia.</i>	52
4.2.1	Balance global	52
4.2.2	Molino de bolas (M-101)	53
4.2.3	Tamiz (T-101)	54
4.2.4	Reactor (R-101)	55
4.2.5	Bombas (P-101 a P-105)	57
4.2.6	Filtro (F-101)	58
4.2.7	Decantador (D-101)	60
4.2.8	Evaporador (V-101)	62
4.2.9	Resultados del balance de materia	64
4.3	<i>Balance de Energía.</i>	69
4.3.1	Molino de bolas (M-101)	69
4.3.2	Tamiz (T-101)	69
4.3.3	Reactor (R-101)	70
4.3.4	Bombas (P-101 a P-105)	70
4.3.5	Filtro (F-101)	71
4.3.6	Decantador (D-101)	71
4.3.7	Evaporador (V-101)	72
4.4	<i>Dimensionamiento de los equipos principales.</i>	72
4.4.1	Molino de bolas (M-101)	72
4.4.2	Reactor (R-101)	73
4.4.3	Bombas (P-101 a P-105)	74
4.4.4	Evaporador (V-101)	76
<b>5</b>	<b>Conclusiones.</b>	<b>78</b>
	<b>Referencias</b>	<b>79</b>
	<b>Anexo 1. Código de EES.</b>	<b>81</b>
	<b>Anexo 2. Resultados de la simulación</b>	<b>93</b>
	<b>Anexo 3. Tablas Termoquímicas</b>	<b>104</b>
	<b>Anexo 4. Índices de trituración</b>	<b>105</b>



# Índice de Tablas

---

Tabla 1. Composición típica del ácido fosfórico húmedo crudo.....	33
Tabla 2. Pureza de las materias primas. ....	40
Tabla 3. Pesos moleculares.....	48
Tabla 4. Densidades de los compuestos puros (25°C, 1 atm).....	48
Tabla 5. Entalpías de formación estándar.....	49
Tabla 6. Coeficientes para el cálculo de entalpías. ....	51
Tabla 7. Índice de compuestos.....	53
Tabla 8. Caudales molares por componentes [mol/h].....	65
Tabla 9. Caudales máscicos por componentes. ....	67
Tabla 10. Dimensionamiento de las bombas P-101 a P-105. ....	75
Tabla 11. Caudales totales y temperaturas.....	93
Tabla 12. Caudales molares por componentes [mol/h].....	94
Tabla 13. Fracciones molares de cada corriente [m/m]. ....	95
Tabla 14. Fracciones molares de sólidos en la corriente [m/m].....	96
Tabla 15. Fracciones molares de líquidos en la corriente[m/m].....	98
Tabla 16. Caudales máscicos por componentes. ....	99
Tabla 17. Fracciones máscicas de cada corriente [p/p].....	100
Tabla 18. Fracciones máscicas de sólidos en la corriente [p/p]. ....	101
Tabla 19. Fracciones máscicas de líquidos en la corriente [p/p]. ....	102
Tabla 20. Entalpía por componentes [kJ/mol]. ....	103



# Índice de Figuras

---

Ilustración 1. Producción de ácido fosfórico térmico (Proceso IG).[2] .....	30
Ilustración 2. Producción de ácido fosfórico térmico (proceso TVA).[2] .....	31
Ilustración 3. Producción de ácido fosfórico térmico (proceso Hoechst).[2] .....	32
Ilustración 4. Estado de hidratación del sulfato de calcio en función de la temperatura y concentración de ácido fosfórico. [2] .....	34
Ilustración 5. Reactor circular. [2].....	35
Ilustración 6. Diagrama de flujo para un proceso DH. [2] .....	36
Ilustración 7. Diagrama de bloques. ....	41
Ilustración 8. PFD de la planta de ácido fosfórico. ....	42
Ilustración 9. Molino de bolas.....	43
Ilustración 10. Tamiz vibratorio. ....	44
Ilustración 11. Filtro de bandeja rotatorio.....	45
Ilustración 12. Evaporador de simple efecto.....	46
Ilustración 13. Diagrama del molino de bolas (M-101).....	53
Ilustración 14. Diagrama del tamiz (T-101).....	54
Ilustración 15. Diagrama bomba. ....	57
Ilustración 16. Diagrama del filtro (F-101).....	58
Ilustración 17. Diagrama del decantador (D-101).....	61
Ilustración 18. Diagrama del evaporador (V-101).....	62
Ilustración 19. Datos experimentales del equilibrio líquido-vapor de agua-ácido fosfórico a 100 kPa. [14].....	63
Ilustración 20. PFD de la planta de ácido fosfórico. ....	68
Ilustración 21. Diagrama de sistema de distribución de agua de lavado de un filtro pan .....	74
Ilustración 22. Filtro de bandeja operando. ....	75



# Notación

<	Menor o igual
>	Mayor o igual
%	Porcentaje
%p	Porcentaje másico.
%m	Porcentaje molar.
p/p	Fracción másica en tanto por uno.
m/m	Fracción molar en tanto por uno.
→	Flecha de reacción.
$F_i$	Caudal molar total en la corriente i, en mol/h.
$F_{j,i}$	Caudal molar del compuesto j en la corriente i, en mol/h.
$F_{x_i}$	Caudal molar total de la componente sólida en la corriente i, en mol/h.
$F_{y_i}$	Caudal molar total de la componente líquida en la corriente i, en mol/h.
$F_{m_i}$	Caudal másico total en la corriente i, en kg/h.
$F_{m_{j,i}}$	Caudal másico del compuesto j en la corriente i, en kg/h.
$F_{m_{y_i}}$	Caudal másico total de la componente sólida en la corriente i, en kg/h.
$F_{m_{x_i}}$	Caudal másico total de la componente líquida en la corriente i, en kg/h.
$D_i$	Caudal molar total a la salida de la bandeja "i", en mol/h
$D_{x_i}$	Caudal molar total de la componente sólida a salida de la bandeja "i", en mol/h
$D_{y_i}$	Caudal molar total de la componente líquida a salida de la bandeja "i", en mol/h
$Z_{j,i}$	Fracción molar del compuesto j en la corriente i, en mol/h.
$Z_{x_{j,i}}$	Fracción molar del compuesto j respecto de la componente sólida en la corriente i, en mol/h.
$Z_{y_{j,i}}$	Fracción molar del compuesto j respecto de la componente líquida en la corriente i, en mol/h.
$Z_{m_{j,i}}$	Fracción másica del compuesto j en la corriente i, en kg/h.
$Z_{m_{y_{j,i}}}$	Fracción másica del compuesto j respecto de la componente sólida en la corriente i, en kg /h.
$Z_{m_{x_{j,i}}}$	Fracción másica del compuesto j respecto de la componente líquida en la corriente i, en kg /h.
$T_i$	Temperatura de la corriente i, en K.
$T_{c_i}$	Temperatura de la corriente i, corregida según la ecuación (7), en K.
$H_{f,j}^o$	Entalpia de formación estándar de una sustancia j, en [kJ/mol].

$H_T^o - H_{298.15}^o$

Variación de entalpia de una sustancia entre 25 °C y una temperatura T arbitraria a presión atmosférica, en [kJ/mol].

$Q_{\text{REACTOR}}$

Cantidad de calor a aportar al reactor (R-101), en kW.

$Q_{\text{EVAPORADOR}}$

Cantidad de calor que el evaporador debe aportar al fluido, en kW.

P

Potencia eléctrica o mecánica, en kW



# 1 OBJETIVOS Y ALCANCES

---

El objetivo general del proyecto es diseñar una planta química para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfórica. Para lograr este objetivo, se plantean los siguientes objetivos específicos:

- **Analizar las diferentes tecnologías existentes** en el mercado para la producción de ácido fosfórico: Se realizará una revisión exhaustiva de las tecnologías disponibles para la producción de ácido fosfórico a partir de la roca fosfórica. Se evaluarán los diferentes procesos, sus ventajas, desventajas, eficiencia y aplicabilidad.
- **Seleccionar la tecnología más adecuada** con base en el análisis realizado y se elegirá la tecnología que mejor se adapte. Se considerarán factores como la complejidad del proceso, los costos de implementación y operación.
- **Diseño del proceso:** Se realizará un diseño detallado de los diferentes procesos involucrados en la producción de ácido fosfórico, incluyendo la preparación de la fosforita, la reacción química para la obtención del ácido, la separación y purificación del producto final.
- **Dimensionamiento de los equipos principales:** Una vez seleccionada la tecnología, se procederá al dimensionamiento de los equipos principales. Esto incluirá determinar la capacidad de producción deseada, el tamaño de los equipos y las instalaciones necesarias, así como los caudales de materia y energía requeridos.

Una vez completados estos objetivos, se habrá logrado el diseño de una planta química para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfórica.



# 2 INTRODUCCIÓN

## 2.1 Usos del ácido fosfórico.

El ácido fosfórico ( $\text{H}_3\text{PO}_4$ ) es un compuesto químico ampliamente utilizado en diversos campos.

- **Industria de fertilizantes:** El ácido fosfórico es la principal fuente de fósforo para la fabricación de fertilizantes. Se utiliza para producir fosfatos que son esenciales para el crecimiento de las plantas.
- **Fabricación de detergentes:** Se utiliza en la producción de detergentes líquidos y en polvo para ayudar en la eliminación de manchas y suciedad.
- **Industria alimentaria:** El ácido fosfórico se utiliza como aditivo alimentario para ajustar el pH de los alimentos y bebidas. También se utiliza en refrescos carbonatados para proporcionarles acidez y sabor característico.
- **Producción de fosfatos:** El ácido fosfórico se utiliza como materia prima en la producción de una variedad de fosfatos, incluyendo fosfato de calcio, fosfato de amonio y fosfato de sodio. Estos fosfatos se utilizan en la industria química y en la fabricación de productos como detergentes, alimentos para animales, fertilizantes y productos farmacéuticos.

Debido a que el ácido fosfórico es considerado una commodity, sus concentraciones están estandarizadas para su distribución comercial [2]. Las concentraciones disponibles en el mercado son las siguientes:

- **75 %p  $\text{H}_3\text{PO}_4$** , equivalente a **54.3 %p de  $\text{P}_2\text{O}_5$** .
- **80 %p  $\text{H}_3\text{PO}_4$** , correspondiente a **58.0 %p de  $\text{P}_2\text{O}_5$** .
- **85 %p  $\text{H}_3\text{PO}_4$** , que representa **61.6 %p de  $\text{P}_2\text{O}_5$** .

De igual manera, las concentraciones en el mercado se representan generalmente siguiendo dos estándares. La primera es mediante porcentaje en peso de ácido fosfórico y la segunda es su porcentaje en peso equivalente en  $\text{P}_2\text{O}_5$ .

Para convertir concentraciones máscas de  $\text{H}_2\text{P}_0_4$  a  $\text{P}_2\text{O}_5$  se multiplica la concentración de  $\text{H}_2\text{PO}_4$  por 0.724. Este factor refleja la relación de masas entre el ácido fosfórico y el pentóxido de fósforo basada en sus pesos moleculares y la estequiometría de la reacción química de deshidratación.

$$[\%p \text{ de } \text{P}_2\text{O}_5] = 0.724 \cdot [\%p \text{ H}_3\text{PO}_4] \quad (1)$$

## 2.2 Procesos de producción del ácido fosfórico.

Para la producción a nivel industrial de ácido fosfórico se utilizan dos métodos principales. El primero de ellos es la digestión húmeda de la roca fosfórica mediante ácidos, y es considerado el método más relevante en términos de volumen (80%) a nivel mundial [1]. Normalmente, la digestión se lleva a cabo con ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ), aunque en menor medida también se emplean ácido nítrico

(HNO<sub>3</sub>) o ácido clorhídrico (HCl). El ácido obtenido en este proceso se conoce como ácido fosfórico húmedo.

El segundo método (vía térmica) comienza con fósforo elemental, el cual se obtiene a partir de fosfato crudo, coque y sílice en un horno eléctrico. Posteriormente, este fósforo se oxida a P<sub>4</sub>O<sub>10</sub>. El ácido obtenido mediante la hidratación de este óxido se conoce generalmente como ácido fosfórico térmico.

Ambos métodos desempeñan un papel fundamental en la producción a gran escala de ácido fosfórico, siendo utilizados en diferentes proporciones según las necesidades y condiciones específicas de cada proceso

Entre los procesos de producción de ácido fosfórico tenemos:

### 2.2.1 Vía térmica

En este subapartado, nos enfocaremos en los procesos de formación del ácido fosfórico por vía térmica. Los tres principales procesos en la industria son el proceso **IG** (proceso de la IG Farbenindustrie), el proceso **TVA** (Tennessee Valley Authority) y el proceso **Hoechst**. Cada uno de ellos optan y tienen diferentes enfoques y características, pero comparten el objetivo común de convertir fósforo elemental en ácido fosfórico mediante reacciones controladas y etapas de absorción.[2]

Los procesos IG y Tennessee Valley Authority (TVA) para la producción de ácido fosfórico se diferencian por el método de absorción e hidratación del P<sub>4</sub>O<sub>10</sub>. El proceso Hoechst difiere de éstos en que utiliza el calor de la combustión del fósforo para generar vapor. [2]

Estos procesos se llevan a cabo en dos etapas principales: la oxidación del fósforo elemental en una atmósfera con exceso de oxígeno para dar lugar a P<sub>4</sub>O<sub>10</sub> y la posterior hidratación de este para dar lugar a ácido fosfórico mediante las siguientes reacciones químicas. [2]



A continuación, exploraremos en detalle cada uno de los procesos mencionados, describiendo sus principios operativos y características distintivas.

#### 2.2.1.1 Proceso IG (Ingram-Griffiths).

El proceso IG (Ingram-Griffiths) es un método de producción de ácido fosfórico que combina la combustión del fósforo y la absorción de P<sub>4</sub>O<sub>10</sub> en una sola etapa la cual tiene lugar en una torre común (Ilustración 1). Las paredes de la torre están ligeramente inclinadas de forma cónica para que el ácido reciclado, que desborda desde una taza ubicada en la parte superior de la torre, pueda cubrir completamente la pared con una capa de ácido. Esto protege la pared de la llama de fósforo que desciende desde la parte superior de la torre y la cual puede alcanzar una temperatura superior a 2000 °C.

El ácido fosfórico desborda desde la taza de la torre a aproximadamente 60 °C y se calienta en el camino a lo largo de las paredes de la torre hasta alcanzar los 85 °C. Aproximadamente el 80% del calor generado se disipa mediante agua de enfriamiento al caer por las paredes de la torre de combustión y entrar en contacto con los gases calientes, el 17% mediante los gases de escape y la evaporación del agua, y el 3% mediante el calor sensible del ácido.

El fósforo se rocía en la torre desde una boquilla binaria mediante aire o vapor a presión de hasta 1,5 MPa. Es expulsado de la boquilla a una velocidad tan alta que la llama de fósforo se mantiene alejada de la cabeza de la torre y no puede dañarla. Se mantiene un ligero vacío en la torre, generado por un ventilador que extrae el aire de combustión de una abertura anular alrededor de la boquilla en la parte superior de la torre. Los gases de escape se descargan en la etapa de lavado, donde se separa el  $P_4O_{10}$  que ha sido arrastrado en forma de aerosol o gotas de ácido. Esto representa aproximadamente el 30% de la conversión total, es decir, del total de producción de ácido fosfórico en la planta aproximadamente un 30% es capturado en la etapa de lavado de los gases de combustión. Se agrega el ácido de lavado al ácido de la torre. Se utilizan sistemas Venturi, torres de lavado operadas con o sin relleno, o elementos desempañadores empacados con fibras de vidrio como separadores.

Todas las partes del equipo que entran en contacto con los gases de escape que contienen  $P_4O_{10}$  están hechas de acero revestido de goma, acero inoxidable o plástico. Un acero inoxidable con un contenido de carbono muy bajo, estable frente al ácido fosfórico concentrado.

Además del ácido fosfórico que fluye en las paredes de la torre, se rocía ácido fosfórico en la torre a través de boquillas en la mitad inferior de la torre, debajo de la llama de fósforo y perpendicular al flujo de gases de escape. Esto reduce la temperatura de los gases de escape a unos 100 °C. El ácido fosfórico obtenido es prácticamente libre de óxidos de fósforo más bajos y su contenido de  $H_3PO_3$  es del 0,1 %p.

El ácido fosfórico térmico contiene solo trazas de impurezas debido al uso de fósforo puro para la combustión. Solo se debe eliminar el arsénico, un compañero natural del fósforo elemental que se encuentra en el ácido a una concentración de 5-30 ppm, en un paso adicional de purificación. Esto se logra mediante la precipitación del sulfuro de arsénico con sulfuro de hidrógeno seguida de filtración. El sulfuro de hidrógeno se genera mediante la inyección de una solución de  $Na_2S$  en el ácido fosfórico. Esto se realiza ya sea en una torre de precipitación con filtración posterior después de la adición de carbón activado y kieselgel, o de manera más directa y sencilla en una bomba centrífuga que transporta inmediatamente el ácido al filtro.

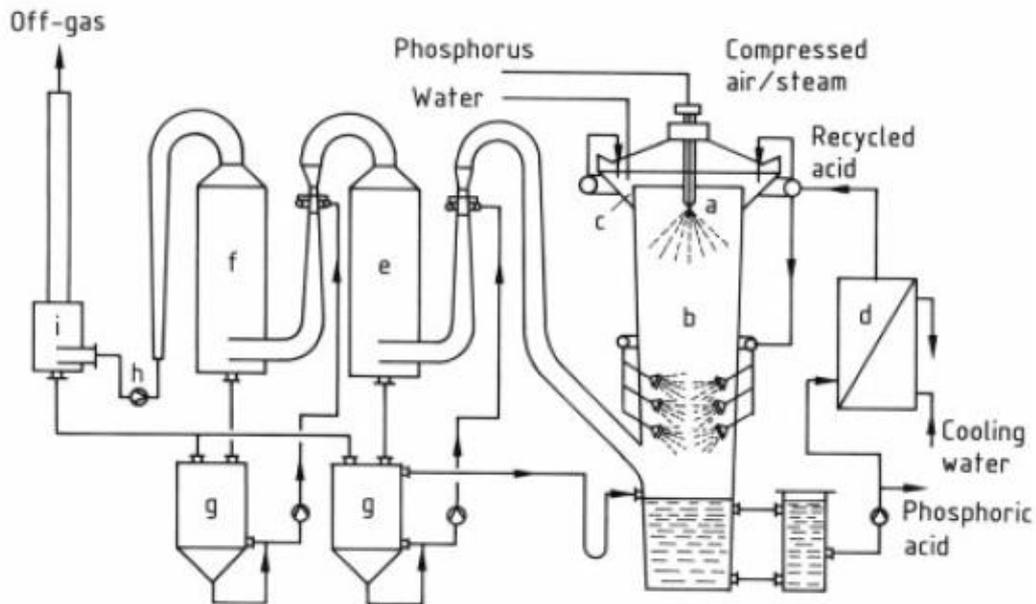


Ilustración 1. Producción de ácido fosfórico térmico (Proceso IG).[2]

a) Tobera; b) Torre de combustión; c) Vaso de rebose; d) Intercambiador de calor; e) y f) Depuradores Venturi; g) Receptor para ácido de lavado; h) Ventilador de gases de escape; i) Separador

### 2.2.1.2 PROCESO TVA (TENNESSEE VALLEY AUTHORITY).

El proceso TVA (Tennessee Valley Authority) es otro método de producción de ácido fosfórico que involucra la combustión del fósforo y la absorción de  $P_4O_{10}$ , pero en este caso, se llevan a cabo en etapas separadas, como se observa en la Ilustración 2

El proceso TVA consta de una cámara de combustión vertical y cilíndrica de acero inoxidable, enfriada externamente. El quemador de fósforo se instala lateralmente y está dirigido hacia el fondo de la cámara de combustión con un ángulo de aproximadamente  $40^\circ$ .

La descarga de gases y la conexión con la torre de absorción se encuentran en la parte superior de la cámara de combustión. Se forma una capa de ácido polifosfórico a partir del  $P_4O_{10}$  generado y la humedad atmosférica, la cual protege las paredes internas contra la corrosión. El ácido polifosfórico contiene aproximadamente un 92% en peso de  $P_2O_5$  y su punto de vaporización es de  $867^\circ C$ . El fósforo y el aire se introducen de manera similar al proceso IG.

La torre de absorción, también cilíndrica y de acero inoxidable, cuenta con una cabeza cónica y también está enfriada externamente. Las paredes internas de la torre se rocían con ácido fosfórico diluido proveniente de la etapa de purificación de los gases de escape, así como con ácido fosfórico concentrado reciclado, formando una película de ácido continua. El ácido fosfórico producido de esta manera contiene entre un 54% y un 83% de  $P_2O_5$ .

Una parte significativa del producto de  $P_4O_{10}$  se arrastra en el flujo de gas desde la torre de absorción. Por lo tanto, dependiendo de si el producto es ácido ortofosfórico (54% de  $P_4O_{10}$ ) o ácido superfosfórico (83%p de  $P_4O_{10}$ ), entre el 40% y el 70% del ácido producido se acumula en la etapa de purificación de los gases. Se utilizan lavadores Venturi, torres de

lavado y desempañadores con mallas de acero especial para la purificación de los gases de escape.

Es importante destacar que, a diferencia del proceso IG, el proceso TVA no aprovecha el calor generado por la combustión del fósforo, ya que se disipa mediante enfriamiento. Sin embargo, ambos procesos tienen como objetivo la producción de ácido fosfórico a partir de la reacción del fósforo y el  $P_4O_{10}$  con ácido sulfúrico.

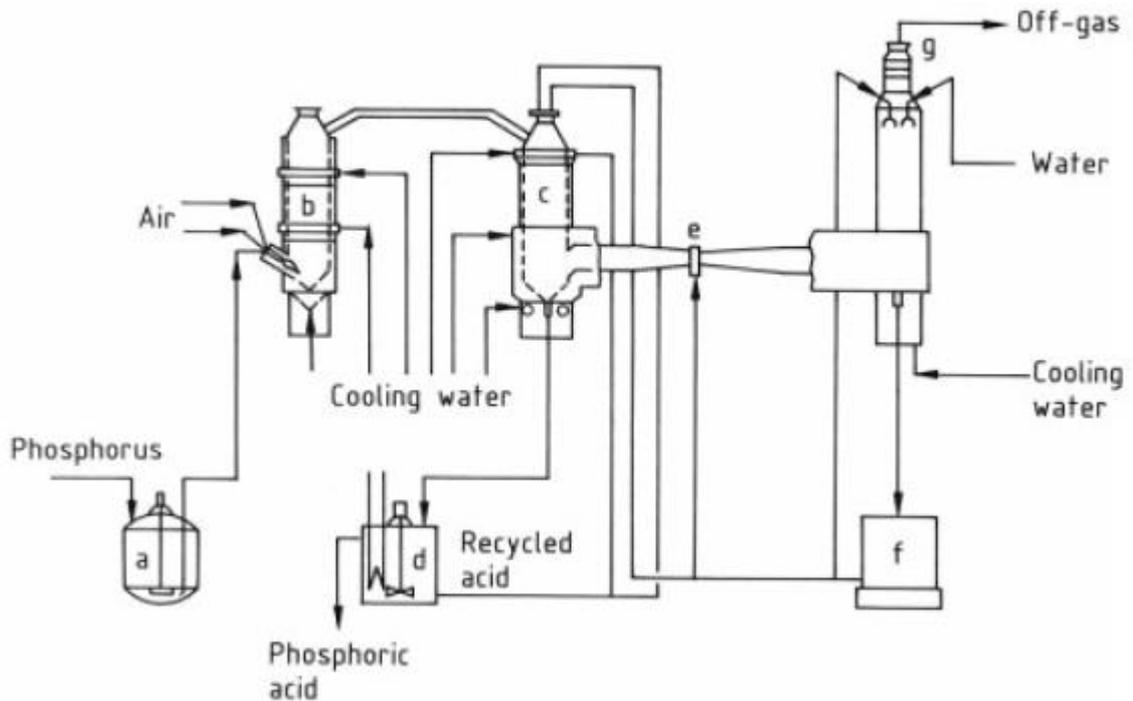


Ilustración 2. Producción de ácido fosfórico térmico (proceso TVA).[2]

a) Tanque de almacenamiento; b) Cámara de combustión; c) Torre de absorción; d) Receptor refrigerado; e) Depuradores Venturi; f) Tanque de ácido diluido; g) Separador

### 2.2.1.3 HOECHST PROCESS

El proceso Hoechst, presentado en la Ilustración 3, es otro método utilizado para la producción de ácido fosfórico y difiere de los procesos IG y TVA en la forma en que se aprovecha el calor generado durante la combustión del fósforo.[2]

En el proceso Hoechst, la energía generada por la combustión del fósforo se utiliza para la generación de vapor. La combustión del fósforo y la hidratación del  $P_2O_5$  (pentóxido de fósforo) se llevan a cabo de manera separada en etapas distintas.[2]

En este proceso, se inyecta fósforo líquido y aire seco en la parte inferior de una cámara de combustión vertical de acero inoxidable. El fósforo líquido se quema para producir  $P_4O_{10}$ . Las paredes de la cámara de combustión están hechas de bobinas de tuberías por las que circula agua desionizada. La mezcla de vapor y condensado que se forma en las bobinas debido a la disipación del calor de la combustión se mantiene a una presión de 15-18 MPa. La mezcla se separa en gas y líquido en un separador. El condensado restante se devuelve al tanque de almacenamiento de agua, y la porción evaporada se repone mediante la adición de agua

desionizada. El vapor de alta presión se transfiere desde el separador a la cámara de combustión, donde la temperatura del vapor se eleva a 400-500 °C a 15-18 MPa en un sobrecalentador. Luego, se libera la presión y el vapor se satura con agua y se utiliza como medio de transferencia de calor.[2]

En el proceso Hoechst, se controla la disipación de calor durante la combustión del fósforo para que la temperatura de los gases de escape que contienen  $P_4O_{10}$  sea lo suficientemente alta como para evitar la separación de  $P_4O_{10}$  en el camino hacia la torre de absorción, donde se lleva a cabo la hidratación del  $P_4O_{10}$ . Se forma una película de ácido en las paredes de la torre mediante el uso de ácido fosfórico concentrado reciclado, de manera similar al proceso IG y al proceso TVA.[2]

Es importante destacar que el proceso Hoechst permite la generación de vapor como un subproducto útil durante la producción de ácido fosfórico, lo que puede ser aprovechado para aplicaciones de generación de energía o para otros fines industriales.[2]

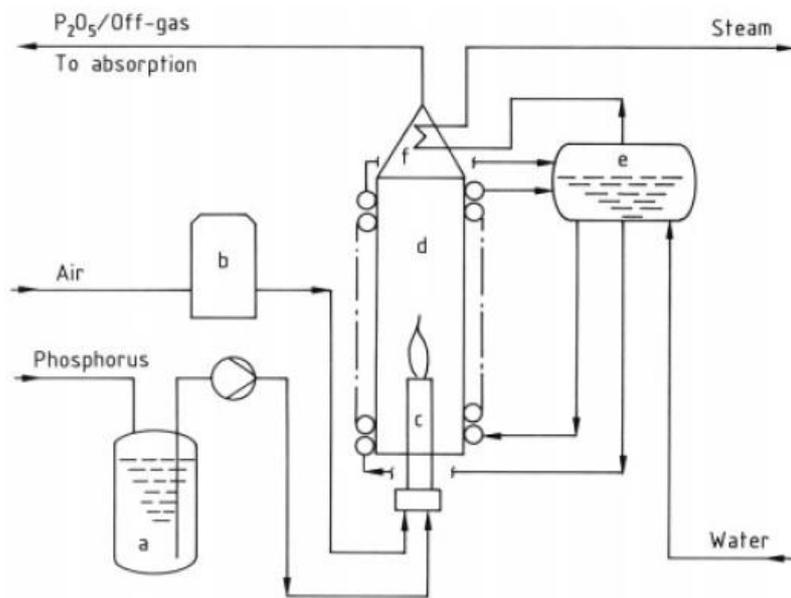


Ilustración 3. Producción de ácido fosfórico térmico (proceso Hoechst).[2]

a) Tanque de almacenamiento; b) Secador de aire; c) Quemador; d) Cámara de combustión; e) Separador; f) Sobrecalentador

### 2.2.2 Vía húmeda

Los procesos húmedos son utilizados para la digestión de roca fosfórica con ácido sulfúrico, el cual, en estado puro, es un líquido corrosivo, denso y viscoso, con una apariencia incolora o ligeramente amarillenta. Es altamente corrosivo y puede causar quemaduras graves en contacto con la piel. Además, desprende vapores tóxicos y tiene un olor fuerte y penetrante.

Estos procesos se desarrollaron principalmente después de la Segunda Guerra Mundial debido al aumento en el uso de fertilizantes minerales.

En el proceso de digestión de fluorapatita con ácido sulfúrico, se produce la reacción según la ecuación (4):



$$x = 0, \frac{1}{2}, 2$$

Sin embargo, también ocurren reacciones secundarias con otros componentes secundarios de la roca fosfórica cruda, la cual es una sustancia sólida compuesta principalmente por fosfato de calcio y otros minerales. Suele presentarse en forma de rocas o sedimentos de diferentes colores, como blanco, gris o marrón, dependiendo de su composición específica.

Los productos de reacción de estas reacciones secundarias se disuelven en gran medida en el ácido fosfórico húmedo. La composición típica del ácido fosfórico húmedo crudo (en % en peso) se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1. Composición típica del ácido fosfórico húmedo crudo.

Componente	Porcentaje másico (%)
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	30,0
SO <sub>3</sub>	2,1
F	2,17
Si (principalmente como SiF <sub>6</sub> <sup>2-</sup> )	0,41
Ca	0,45
Mg	0,13
Fe	0,08
Al	0,04
Cr	0,022
Zn	0,019
V	0,013
Ni	0,0034
Cu	0,0027
Mn	0,0009
As	0,0007
Pb	0,0002

En el proceso de digestión húmeda se forma sulfato de calcio, comúnmente conocido como yeso. Es un mineral blanco o incoloro que se presenta en forma de cristales o en masas compactas. Es soluble en agua y se utiliza en la construcción, la fabricación de yeso para paredes y techos, así como en la industria de la agricultura y la alimentación como aditivo. También es utilizado en la fabricación de cemento y como material de relleno en odontología.

Durante la producción de ácido fosfórico el sulfato de calcio puede precipitar en tres modificaciones diferentes, dependiendo de la temperatura y la concentración de ácido fosfórico (Ilustración 4). Las diferentes variantes de los procesos húmedos se derivan de las modificaciones formadas en la etapa de digestión. Por lo tanto, se distinguen los procesos de dihidrato (DH) y hemihidrato (HH). En otros procesos, se forman de forma secuencial dos formas cristalinas que se separan mediante recristalización (procesos HH/DH o DH/HH).[2]

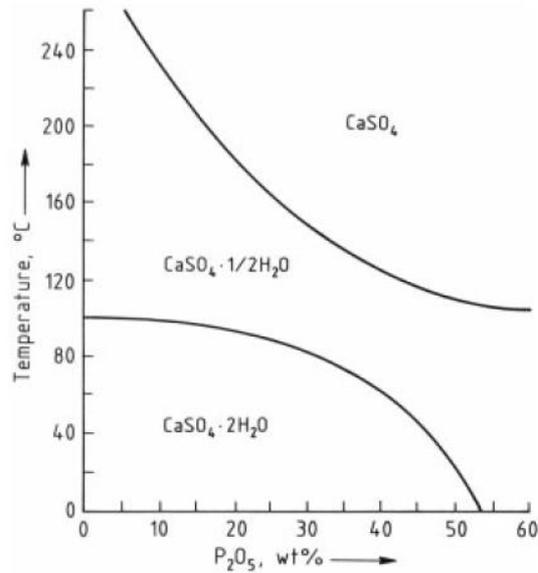
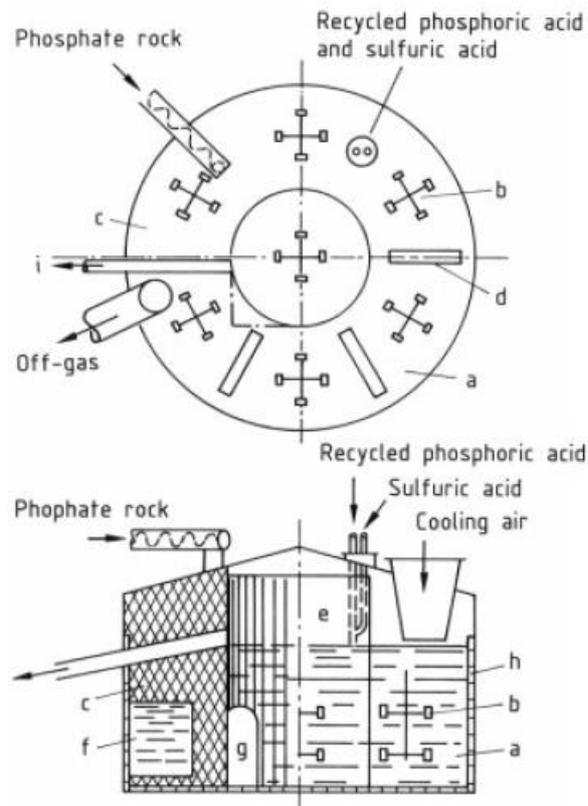


Ilustración 4. Estado de hidratación del sulfato de calcio en función de la temperatura y concentración de ácido fosfórico. [2]

Los reactores son comunes a todos los procesos de ácido fosfórico húmedo y consisten en la digestión en un reactor y la eliminación del sulfato de calcio (CaSO<sub>4</sub>) mediante filtración. Originalmente, la digestión se realizaba en grandes tanques agitados dispuestos en serie, con recirculación de la suspensión de digestión mediante bombas. La introducción de tanques individuales trajo una simplificación esencial y una mejora de la circulación para compensar las fluctuaciones de temperatura y concentración, y así optimizar las condiciones de cristalización. Se construyeron modelos redondos y rectangulares de tanques individuales. En el tanque individual redondo (Ilustración 5), los componentes de reacción se mueven lentamente en un círculo en el espacio exterior anular con agitación local vigorosa. Parte de la suspensión de digestión desborda hacia el espacio central y fluye hacia la filtración.[2]



Single tank round model

a) Outer annular section; b) Agitators; c) Partition; d) Cooling air nozzles; e) Center section; f) Outer passage; g) Passage to the center cylinder; h) Carbon bricks; i) Overflow channel

Ilustración 5. Reactor circular. [2]

En instalaciones de capacidad comprendida entre 200 y 400 toneladas diarias de pentóxido de fósforo ( $P_2O_5$ ), se implementa un proceso mediante el cual se insufla aire sobre la superficie del reactor con el propósito de facilitar la disipación de la energía térmica resultante de la reacción química.[2] En el caso de plantas de mayores dimensiones, se emplea un método alternativo que implica la utilización de evaporación al vacío con el fin de inducir la evaporación del agua contenida en una corriente extraída del propio reactor, la cual luego es reciclada, llevándose a cabo este proceso en un dispositivo denominado enfriador flash.

Para la filtración, aproximadamente se deben filtrar de 4 a 6 toneladas de  $CaSO_4$  por tonelada de  $P_2O_5$  producido. Después de utilizar inicialmente filtros de banda, los productores cambiaron al uso de filtros planos y de celda inclinada. El área efectiva del filtro puede alcanzar hasta 200 m<sup>2</sup>. Posteriormente, se desarrollaron filtros de banda con salidas más grandes y áreas de filtro que superan los 100 m<sup>2</sup>. Durante la filtración, el ácido fosfórico húmedo se extrae de los sólidos mediante vacío parcial. El ácido adherido se lava de los sólidos en dos o tres etapas en contracorriente. El ácido de lavado se descarga por separado y se recicla al reactor. La descarga de la torta de filtro se

realiza mediante inclinación de las bandejas del filtro, mediante un transportador de tornillo o mediante desprendimiento de la banda.[2]

Debido al progreso técnico en la construcción de reactores y filtros, las unidades de producción de ácido fosfórico húmedo ahora tienen capacidades de hasta 1000 t/d de  $P_2O_5$ . [2]

### 2.2.2.1 PROCESO DE DIHIDRATO (DH)

El proceso de dihidrato, mostrado en la Ilustración 6, es el método clásico para la producción de ácido fosfórico húmedo. Antes de la digestión, generalmente se debe moler la roca fosfórica hasta una finura de 75% <150  $\mu m$ . La roca fosfórica y el ácido sulfúrico concentrado se cargan espacialmente separados. De esta manera, se reduce la concentración de ácido sulfúrico para que la digestión que ocurre en el punto de carga de la roca fosfórica no se vea obstaculizada por la formación de una capa de yeso en las partículas de mineral. Además, se evita la formación de demasiados cristales de semilla de yeso debido a la sobresaturación de iones  $Ca^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$ . El sulfato de calcio está presente como dihidrato a una temperatura de reacción de 70-80  $^{\circ}C$  y una concentración de ácido fosfórico de 28-31%. Por lo general, el ácido filtrado se concentra aún más. [2]

Entre las ventajas del proceso de dihidrato se encuentran la baja temperatura de reacción y, por lo tanto, menos problemas de corrosión, su aplicabilidad a la mayoría de las calidades de roca fosfórica y su idoneidad para la producción a gran escala. Algunas desventajas son la producción de un ácido fosfórico relativamente diluido que debe concentrarse posteriormente, la necesidad de moler la roca fosfórica y las pérdidas relativamente altas de  $P_2O_5$  del 4 al 6% en el yeso. [2]

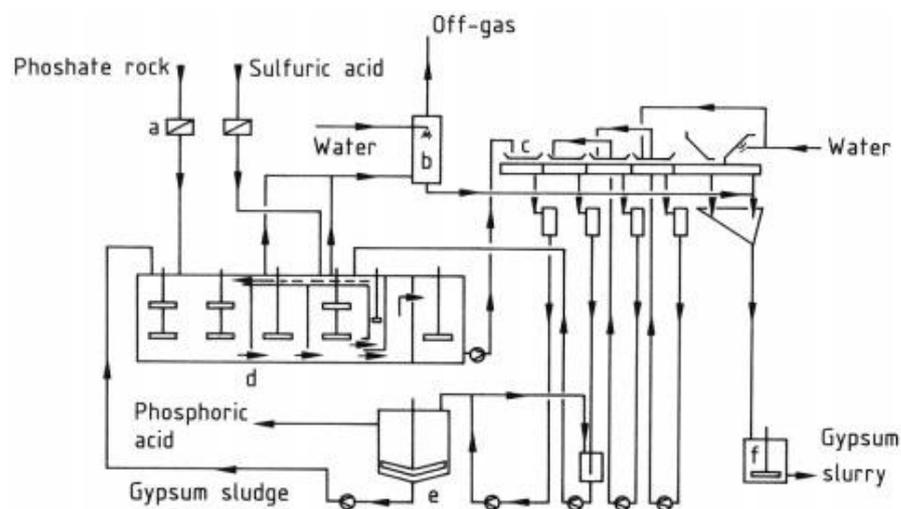


Ilustración 6. Diagrama de flujo para un proceso DH. [2]

a) Dosificador; b) Depurador; c) Filtros; d) Depósito único; e) Espesador; f) Tanque de descarga

### 2.2.2.2 PROCESO DE HEMIHDRATO (HH)

El proceso de hemihidrato se desarrolló para permitir la producción de ácido fosfórico con un contenido de  $P_2O_5$  del 40 al 50%p, sin utilizar etapas adicionales de concentración, para su

uso directo en la producción de fertilizantes. Estos procesos se llevan a cabo a una temperatura más alta en el rango de estabilidad del hemihidrato de sulfato de calcio. Por lo tanto, se desarrollaron procesos de una etapa (HH) y de dos etapas (HH/DH, DH/HH) en los que se forma el hemihidrato como producto final o intermedio. El primer proceso comercial HH/DH se introdujo en Japón. El principal interés en este proceso era la producción de yeso puro que se podría utilizar para la producción de cemento, ya que no hay depósitos de yeso natural en esta región. Se operaron alrededor de 60 plantas de hemihidrato en todo el mundo; más de la mitad de ellas utilizan un proceso HH/DH. El proceso HH de una sola etapa se ha utilizado rara vez debido al rendimiento desfavorable del proceso.[2]

## **2.3 Impacto Ambiental de la Producción de Ácido Fosfórico**

En el proceso de producción de ácido fosfórico, se generan diversos impactos ambientales que requieren atención y control. El impacto más destacado es la producción de un residuo sólido conocido como fosfoyeso, que tiene una composición química consistente en sulfato de calcio e impurezas presentes en la roca fosfórica. Este fosfoyeso, si bien es un residuo, posee valor comercial en la industria de la construcción. [3], [4]

Otro residuo sólido relevante es el polvo que se origina durante la etapa de molienda de la roca fosfatada. No obstante, se toman medidas para evitar que este polvo sea liberado al medio ambiente. Se emplean ciclones para recircular los polvos de molienda de nuevo al proceso en la planta de beneficio, con el objetivo de prevenir la dispersión en el entorno. Sin embargo, esta estrategia de control del polvo requiere el uso de equipos de protección para el personal debido al ruido generado durante la molienda. [3], [4]

### **2.3.1 Riesgos Medioambientales Asociados a Emisiones y Residuos**

La producción de ácido fosfórico mediante el proceso húmedo presenta riesgos medioambientales notables que afectan de diversas maneras al entorno natural.[3], [4]

### **2.3.2 Emisión de Fluoruros en el Entorno**

La emisión de compuestos de fluoruro, como el tetrafluoruro de silicio o el fluoruro de hidrógeno, tiene un impacto evidente en la vegetación debido a la acumulación de estos compuestos en las plantas. [3], [4]

### **2.3.3 Emisión de Polvo en el Aire**

El polvo generado durante la manipulación y molienda de la roca fosfórica contiene alrededor del 3-4% de fluoruro insoluble en agua. Aunque este polvo no plantea una preocupación significativa para las plantas y los seres humanos, sí puede causar molestias respiratorias y afectar a los animales. [3], [4]

### **2.3.4 Contaminación del Agua**

La gestión de los residuos de fosfoyeso y el agua asociada a este proceso, que incluye la acidez, la presencia de metales disueltos y radionúclidos, puede dar lugar a problemas cuando se deposita el fosfoyeso en el suelo. Para mitigar estos riesgos, es necesario implementar un sistema de revestimiento, la construcción de zanjas de recolección y un sistema de recirculación del agua utilizada para la disposición del fosfoyeso. Además, se requiere una supervisión rigurosa del transporte adecuado. Cualquier exceso de agua contaminada puede ser tratado con cal antes de su disposición. Un efecto grave de la descarga inadecuada de estos residuos en estanques es el rápido cambio en el pH del agua, lo cual puede afectar negativamente la vida acuática, incluyendo peces y vegetación. [3], [4]

La disposición de fosfoyeso en el agua no se considera la opción más favorable desde una perspectiva medioambiental. En el caso de instalaciones existentes que recurren a esta disposición, el impacto medioambiental depende en gran medida de factores como el tratamiento previo de los residuos, la cantidad depositada, la ubicación de la descarga y la condición del cuerpo receptor. Estos impactos son monitoreados de manera sistemática. Es importante mencionar que el efecto en el agua de mar es relativamente menor debido a que el fluoruro, una de las principales impurezas en el fosfoyeso, precipita como fluoruro de calcio debido al pH del agua de mar. [3], [4]



# 3 MEMORIA DESCRIPTIVA

## 3.1 Pureza de las materias primas y escala de producción.

En la tabla se recogen las materias primas y las composiciones de la que se han partido para la realización de este trabajo.

Tabla 2. Pureza de las materias primas.

Sustancia	Componentes	Pureza [p/p]
Roca fosfórica	Difosfato tricálcico	0,95
	Difluoruro de calcio	0,05
Ac sulfúrico	Ácido sulfúrico	0,96
	Agua	0,04
Agua	Agua	-

Estas materias primas se usarán para obtener 181 t/día de ácido fosfórico al 55% en peso, es decir 100 t/día de  $H_3PO_4$ .

## 3.2 Descripción del proceso.

El proceso seguirá de forma general el diagrama de bloque presentado en la Ilustración 7. La roca fosfórica, una vez molida y micronizada, es alimentada al reactor agitado junto con ácido sulfúrico y agua. El producto de las reacciones que suceden en el interior del reactor da lugar a ácido fosfórico crudo (líquido), yeso (sólido) y gases. Los gases son venteados del reactor y capturados en un scrubber, mientras que el yeso es retenido en un filtro de bandejas para separarlo del ácido fosfórico crudo. Por último, el ácido fosfórico pasa a una etapa de purificación donde se le eliminan las partículas en suspensión y se aumenta su concentración retirando agua mediante una evaporación.

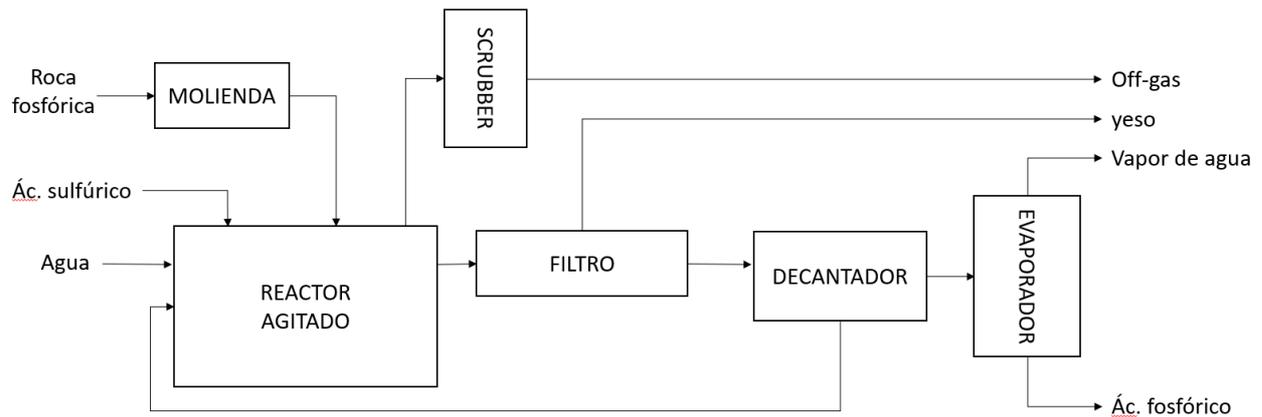


Ilustración 7. Diagrama de bloques.

A continuación, y entrando en más detalles en esta sección se explicará el proceso de forma más rigurosa junto a su PFD (Ilustración 8), desde las líneas de entrada y salida hasta el proceso detallado que ocurre en cada etapa.

### 3.2.1 Líneas de entrada y salida

La planta cuenta con múltiples líneas de entradas y salidas, entre ellas tenemos:

- El ácido sulfúrico entra a la planta a través de la línea 1.
- La roca fosfática ingresa por la línea 2.
- Entradas de agua a través de las líneas 25 y 26.
- Línea para extraer el slurry de yeso por la línea 30.
- Se extrae una mezcla de agua, ácido sulfúrico y ácido fosfórico por la línea 13.

### 3.2.2 Proceso detallado

La roca fosfática se muele en un molino de bolas (M-101) junto con un tamiz (T-101). La molienda se realiza hasta obtener una granulometría donde al menos el 75% de la roca es menor a 750 micras. La línea de piedra molida se mezcla con el ácido sulfúrico en el reactor (R-101), donde ocurre la reacción química. Esta reacción produce ácido fosfórico y yeso. En el reactor, se forma una mezcla líquida compuesta por agua, ácido sulfúrico y ácido fosfórico, así como una mezcla de sustancias sólidas compuesta por yeso y roca fosfática no digerida. La mezcla se bombea hacia un equipo de filtración tipo filtro pan, donde se separa la componente líquida de la sólida. A su vez en este equipo el yeso se lava con agua en contracorriente proveniente de la línea 25. El yeso y la roca no digerida se extraen por la línea 30 en forma de un slurry con un 70%p de agua. La componente líquida obtenida en el filtrado se bombea hacia un decantador, donde se separan dos corrientes: Una corriente formada por la componente líquida, que se extrae por la línea 13. Otra corriente compuesta por líquido y sólidos decantados, que se bombea de regreso al reactor para su reutilización.

Además de los equipos mencionados, se utilizan bombas (P-101 a P-105) para el transporte de los diferentes fluidos a través del proceso.

A continuación, se muestra un diagrama PFD del proceso descrito:

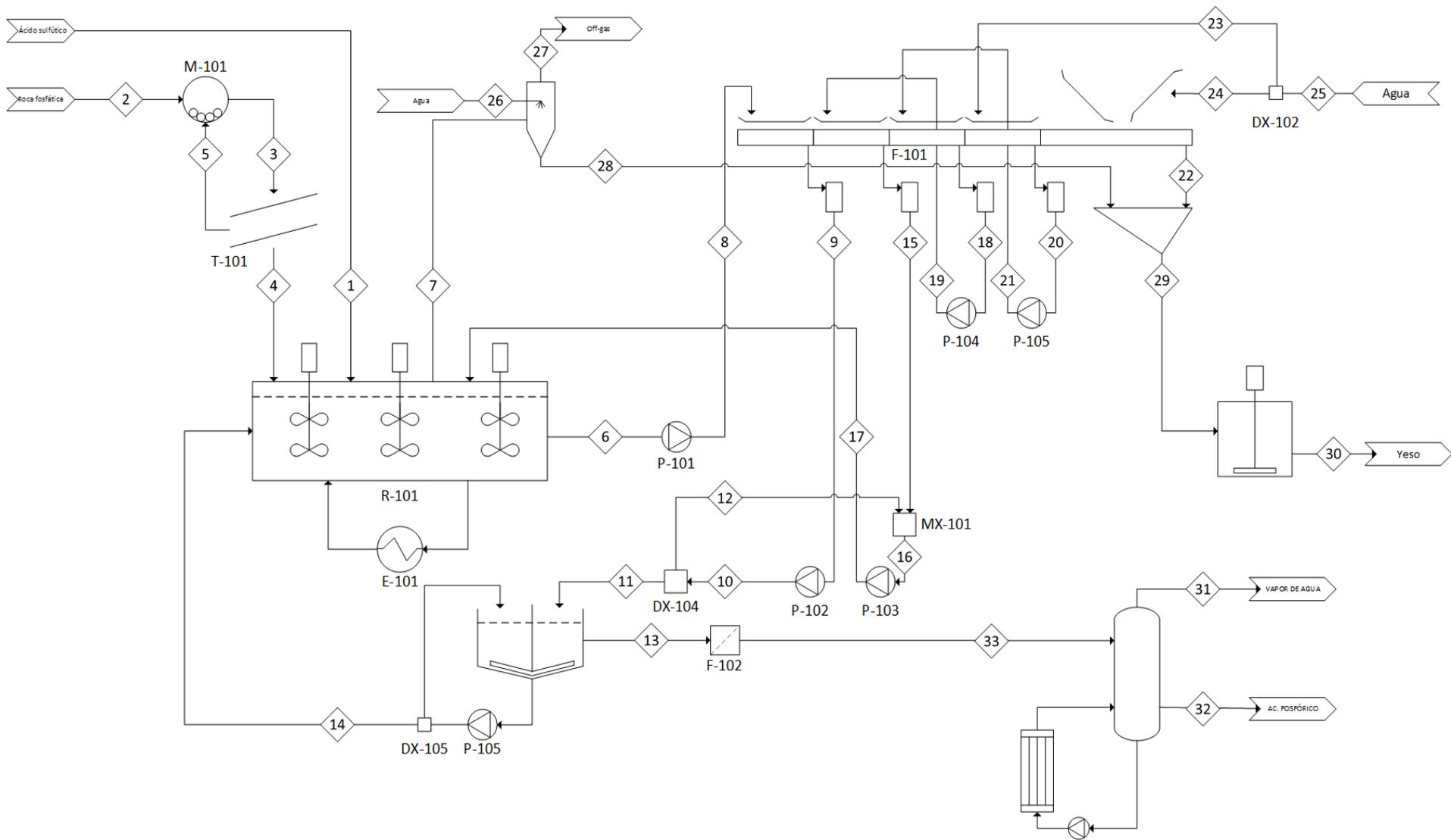


Ilustración 8.PFD de la planta de ácido fosfórico.

### 3.3 Descripción de los equipos.

#### 3.3.1 Molino de bolas (M-101)

El molino de bolas M-101 es un equipo fundamental en el proceso de producción de ácido fosfórico por vía húmeda. La función que desempeña este equipo es la reducción de tamaño de las materias primas sólidas, es decir, de las rocas fosfóricas.

El molino de bolas consta de un tambor giratorio que contiene bolas de acero u otro material resistente que impactan y trituran las materias primas. La rotación del tambor y las bolas genera fuerzas de impacto y compresión, lo que conduce a la reducción del tamaño de las partículas. En la Ilustración 9 se muestra un molino de bolas:

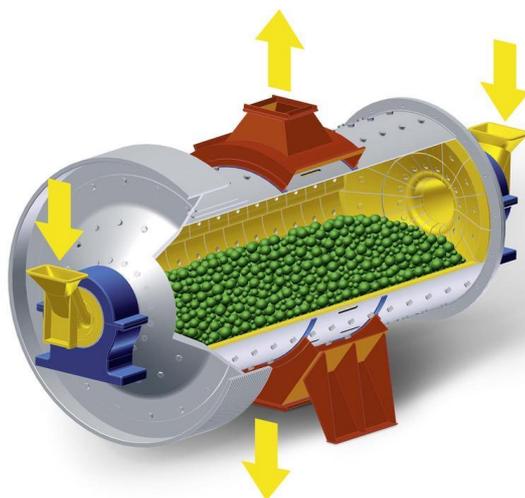


Ilustración 9. Molino de bolas.

El material molido resultante, en nuestro caso la roca fosfórica molido, es transferido al siguiente paso del proceso.

#### 3.3.2 Tamiz (T-101)

En el tamiz T-101 se lleva a cabo la clasificación y separación de partículas de roca fosfórica de diferente tamaño resultantes de la molienda.

El tamiz se encarga de separar estas partículas según su tamaño, garantizando que solo las partículas con un tamaño menor al deseado continúen en el proceso. Esto es crucial para asegurar la calidad del producto final, así como la correcta operación del reactor. El tamiz T-101 consta de una malla o superficie perforada a través de la cual pasa la roca fosfórica molido.

Las partículas más pequeñas atraviesan los agujeros, mientras que las partículas más grandes son retenidas y enviadas nuevamente al molino de bolas para su retritución. Para el caso que se está estudiando en este trabajo se ha supuesto una alimentación a la entrada del molino de bolas con un diámetro medio de partículas de 1 cm (10 mm) (Se ha supuesto que la alimentación son guijarros y no rocas de gran tamaño. En caso ser necesario se podría usar una tritución previa si se desea partir de rocas de mayor tamaño) y un diámetro medio de partícula a la salida del tamiz de 250 micras (0,25 mm), esto debido a que en procesos de producción de ácido fosfórico similares al presentado en este trabajo se opera con tamaño de partículas inferiores a 0,5 mm [13].

En la Ilustración 10 se muestra una imagen de un tamiz vibratorio:

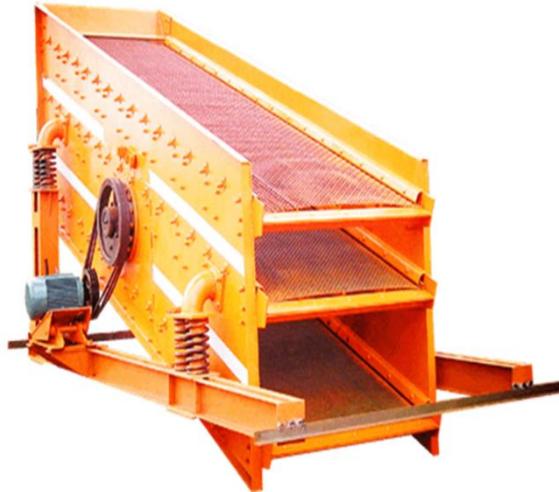


Ilustración 10. Tamiz vibratorio.

### 3.3.3 Reactor (R-101)

El reactor R-101 es el corazón de la planta y del proceso de producción de ácido fosfórico. En este equipo, tiene lugar la reacción química clave que convierte las materias primas en ácido fosfórico.

La reacción principal que se lleva a cabo en el reactor es:



Donde x puede ser 0, 1/2, o 2 dependiendo del grado de hidratación del yeso resultante como se aprecia en la Ilustración 4.

Las materias primas como fosfato tricálcico, ácido sulfúrico y agua se introducen en el reactor las cuales tras reaccionar darán lugar a sulfato de calcio, ácido fosfórico y ácido fluorhídrico. En el diseño del reactor se deben considerar varios aspectos clave para asegurar una alta conversión y una operación segura. Estos aspectos incluyen:

- Materiales de Construcción:

Dado que tanto el ácido fosfórico como el ácido sulfúrico son altamente corrosivos, es esencial que el interior del reactor esté construido con materiales que resistan la corrosión, como aleaciones metálicas resistentes a los ácidos, recubrimientos cerámicos o ladrillos anticorrosión de grafito.

- Control de la Temperatura:

La reacción es exotérmica, por lo que es crucial implementar un sistema de control de temperatura para evitar sobrecalentamientos que podrían dañar el equipo o comprometer la

seguridad del proceso, igualmente es necesario mantener un control preciso de la temperatura para gestionar la formación de yeso tal y como se muestra en la Ilustración 4.

- Sistema de Alimentación y Mezclado:

Es fundamental garantizar una mezcla homogénea de los reactivos para maximizar la eficiencia de la reacción. Esto puede lograrse mediante el diseño adecuado de los agitadores y sistemas de entrada de reactivos.

### 3.3.4 Bombas (P-101 a P-105)

Las bombas P-101 a P-105 desempeñan un papel crucial en el proceso de transporte de fluidos dentro de la planta. Estas bombas son responsables de impulsar los fluidos desde un punto a otro del proceso.

### 3.3.5 Filtro (F-101)

El filtro de bandeja, también conocido como filtro pan, es un equipo esencial en la planta de producción de ácido fosfórico. Su función principal es la separación de los componentes sólidos, en especial yeso, de los líquidos en la corriente de salida del reactor (R-101)

El filtro de bandeja (F-101) está diseñado con bandejas horizontales que poseen una superficie perforada. Estas bandejas permiten que la materia sólida, como yeso y otros sólidos provenientes del reactor (R-101), se deposite sobre ellas. En la Ilustración 11 se muestra una imagen de un filtro de bandeja rotatorio

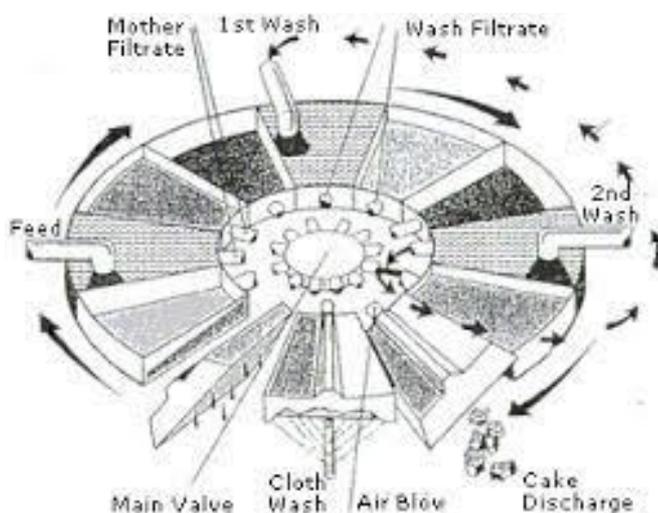


Ilustración 11. Filtro de bandeja rotatorio.

Una vez depositada la materia sólida sobre el filtro esta se lava a contracorriente usando agua. Obteniéndose dos corrientes de salida, una sólida conteniendo yeso lavado y otra líquida conteniendo agua, ácido fosfórico y ácido sulfúrico, la cual se recircula al reactor (R-101).

### 3.3.6 Evaporador (D-101)

El evaporador es una unidad crítica dentro del proceso de producción de ácido fosfórico, que desempeña un papel esencial en la concentración del ácido fosfórico obtenido después de la etapa de filtración.

El evaporador es un equipo diseñado para eliminar parte del contenido de agua presente en la solución de ácido fosfórico obtenida en la etapa de filtración. El objetivo principal es elevar la concentración de ácido fosfórico ( $H_3PO_5$ ) de aproximadamente un 39% en peso a un nivel deseado del 55% en peso de  $H_3PO_5$ .

El proceso de evaporación se lleva a cabo en el evaporador de simple efecto. En este equipo, la solución de ácido fosfórico se introduce y se somete a calentamiento. El calor se suministra a través de una fuente de energía, como vapor o electricidad, que provoca la evaporación del agua presente en la solución. A medida que la solución se calienta y hierve, el agua se convierte en vapor y se separa del ácido fosfórico.

El vapor de agua generado durante la evaporación se recoge y condensa en una unidad separada, generalmente un condensador, para su posterior tratamiento o eliminación. Mientras tanto, el ácido fosfórico concentrado, ahora con un mayor contenido de  $H_3PO_5$ , se recoge en la parte inferior del evaporador.



Ilustración 12. Evaporador de simple efecto.



# 4 MEMORIA DE CÁLCULO.

## 4.1 Cálculo de las propiedades de las sustancias

### 4.1.1 Peso molecular

En la Tabla 3 se recogen los pesos moleculares de las sustancias presentes en la planta:

Tabla 3. Pesos moleculares.

Índice	Nombre de la Sustancia	Fórmula de la sustancia	Peso molecular [kg/mol]
1	Difosfato tricálcico	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	0,310250
2	Difluoruro de calcio	$\text{CaF}_2$	0,078070
3	Ácido sulfúrico	$\text{H}_2\text{SO}_4$	0,098076
4	Ácido fosfórico	$\text{H}_3\text{PO}_4$	0,098044
5	Agua	$\text{H}_2\text{O}$	0,018016
6	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	0,172162
7	Fluoruro de hidrógeno	$\text{HF}$	0,020008

### 4.1.2 Densidad

Es importante tener en cuenta que la densidad de una sustancia pura varía según las condiciones de temperatura y presión a la que se encuentre sometida, pero el cambio de densidad experimentado no depende de igual medida de todas las variables. En nuestro caso al estar la mayoría de las sustancias en estado sólido o líquido a lo largo de la planta se ha supuesto que la densidad de todas las sustancias será constante.

En la Tabla 4 se recogen los valores de las densidades de las sustancias presentes en la planta:

Tabla 4. Densidades de los compuestos puros (25°C, 1 atm).

Índice	Nombre de la Sustancia	Fórmula de la sustancia	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Estado
1	Difosfato tricálcico	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	3180	Sólido
2	Difluoruro de calcio	$\text{CaF}_2$	3180	Sólido
3	Ácido sulfúrico	$\text{H}_2\text{SO}_4$	1830	Líquido

Índice	Nombre de la Sustancia	Fórmula de la sustancia	Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	Estado
4	Ácido fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	1880	Solido
5	Agua	H <sub>2</sub> O	1000	Liquido
6	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	2300	Solido
7	Fluoruro de hidrógeno	HF	-	-

#### 4.1.3 Entalpía

➤ Entalpia de formación

Para determinar la entalpia de formación de las sustancias presentes en la planta se ha recurrido a tomar sus valores a partir de las tablas termoquímicas presentes en el anexo 3.

En la Tabla 5 se recopilan los valores de las entalpías de formación estándar de las sustancias presentes en la planta.

Tabla 5. Entalpías de formación estándar.

Índice	Nombre de la Sustancia	Fórmula de la sustancia	Entalpía de formación estándar [kJ/mol]	Estado
1	Difosfato tricálcico	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	-4121	Solido
2	Difluoruro de calcio	CaF <sub>2</sub>	-1228	Solido
3	Ácido sulfúrico	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	-814	Líquido
4	Ácido fosfórico	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	-1272	Solido
5	Agua	H <sub>2</sub> O	-285,8	Liquido
6	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	-2006,6	Solido
7	Fluoruro de hidrógeno	HF	-273	-

➤ Salto entálpico

Para determinar la variación de entalpía entre una temperatura arbitraria y las condiciones estándares, hemos empleado la ecuación de Shomate (6).

$$H_T^o - H_{298,15}^o = A \cdot t + B \cdot \frac{t^2}{2} + C \cdot \frac{t^3}{3} + D \cdot \frac{t^4}{4} + \frac{E}{t} + F \quad (6)$$

Donde:

$-H_T^o - H_{298,15}^o$  Representa la variación de entalpía de una sustancia entre 25 °C y una temperatura T arbitraria a presión atmosférica, en [kJ/mol].

-A, B, C, D, E y F son coeficientes propios de cada sustancia.

-t es un parámetro que se calcula en función de la temperatura T, expresada en grados en Kelvin, según la ecuación(7):

$$t = \frac{T[K]}{1000} \quad (7)$$

La ecuación (6) es una herramienta poderosa que nos permite calcular la entalpía molar de varias sustancias mediante el uso de ecuaciones polinómicas usando los parámetros presentes en la Tabla 6. Debido a que los datos de partida que se han tomado para el cálculo de las entalpías únicamente permiten calcular la variación de entalpía de una sustancia entre 2 temperaturas a presión atmosférica se ha optado por moderar toda la planta a una atmósfera de presión incluyendo los equipos y las líneas que los conectan. Esta simplificación, aunque inexacta nos permitirá calcular los balances de energía toda la planta con un error relativamente pequeño debido a que la inmensa mayoría de las sustancias presentes en la planta se encuentran en estado líquido o sólido.

Es decir la variación de presión tiene un impacto pequeño en su variación de entalpía, esta simplificación no sería válida si en la planta hubiera un gran número de corrientes en estado gaseoso a las cuales la variación de presión puede afectar en gran medida a la entalpía de la corriente.

Tabla 6. Coeficientes para el cálculo de entalpías.

Índice	Estado	Nombre de la Sustancia	Fórmula de la sustancia	A	B	C	D	E	F
1	Sólido	Difosfato tricálcico	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	16,9847	510,2795	-345,4655	-0,4137	-0,0027	-41,2559
2	Sólido	Difluoruro de calcio	$\text{CaF}_2$	89,8840	-23,0601	21,7593	-4,4656	1,1394	-29,0960
3	Líquido	Ácido sulfúrico	$\text{H}_2\text{SO}_4$	47,2892	95,1657	-49,3766	10,9665	0,7400	-23,8189
4	Líquido	Ácido fosfórico	$\text{H}_3\text{PO}_4$	55,2095	150,6602	-0,0317	0,0105	-0,0005	-29,8510
5	-	Agua	$\text{H}_2\text{O}$	-	-	-	-	-	-
6	Sólido	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	10,4485	416,1466	-264,6916	-0,3845	0,0587	-33,2865
7	Gas	Fluoruro de hidrógeno	$\text{HF}$	30,1169	-1,6233	0,9560	0,1144	0,0248	-8,9447

Cabe destacar que para el calcula de la entalpia del agua durante este trabajo se ha usado la librería termodinámica del programa resolovedor de ecuaciones *Engineering Equation Solver* (EES).

Los parámetros de la ecuación de Shomate para el difluoruro de calcio [5], ácido sulfúrico [6], ácido fosfórico [7], sulfato de calcio dihidratado y el fluoruro de hidrógeno[8] se han tomado de la página web del *national institute of standards and technology* (NIST)

Por el contrario, para calcular la ecuación de Shomate del difosfato tricálcico se ha partido de datos experimentales de su calor especifico [9], tras lo cual se ha ajustado el siguiente polinomio (8) y se han variado sus parámetros minimizar el error.

$$C_p(t) = A + B \cdot t + C \cdot t^2 + D \cdot t^3 + \frac{E}{t^2} \quad (8)$$

Dado que el calor especifico de una sustancia y su entalpia se encuentran relacionadas mediante la siguiente ecuación (9):

$$\Delta H = \int_{T_1}^{T_2} C_p(t) dt \quad (9)$$

Aplicando la ecuación (9) es posible integrar con respecto a t y ajustar el termino independiente de la primitiva resultante para que el salto entálpico ( $\Delta H$ ) a 298.15 K sea nulo. Tras realizar este procedimiento se obtienen los coeficientes para el cálculo de entalpias del difosfato tricálcico presentes en la Tabla 6

## 4.2 Balance de Materia.

### 4.2.1 Balance global

El balance de materia del Sistema completo debe satisfacer las siguientes ecuaciones:

$$\sum_{j=1}^{n_{comp}} F_j = \sum_{j=1}^{n_{com}} S_j \quad (10)$$

Donde:

- $F_j$  es el caudal másico de entrada en el volumen de control de la planta completa, en [kg/h].
- $S_k$  es el caudal másico de salida en el volumen de control de la planta completa, en [kg/h].

De la misma forma, cuando no hay reacción química, se puede escribir el balance de materia molar global:

$$\sum_{j=1}^{n_{comp}} N_j = \sum_{j=1}^{n_{com}} M_j \quad (11)$$

Donde:

$N_j$  es el caudal molar de entrada en el volumen de control de la planta completa, en [mol/h].

$M_j$  es el caudal molar de salida en el volumen de control de la planta completa, en [mol/h].

A su vez a durante la realización de este trabajo se recurrirá al uso de coeficiente para representar los compuestos presentes en la planta. Los coeficientes que representa cada compuesto son:

Tabla 7. Índice de compuestos.

Índice	Nombre de la Sustancia	Fórmula de la sustancia
1	Difosfato tricálcico	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$
2	Difluoruro de calcio	$\text{CaF}_2$
3	Ácido sulfúrico	$\text{H}_2\text{SO}_4$
4	Ácido fosfórico	$\text{H}_3\text{PO}_4$
5	Agua	$\text{H}_2\text{O}$
6	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$
7	Fluoruro de hidrógeno	$\text{HF}$

#### 4.2.2 Molino de bolas (M-101)

El molino de bolas M-101 es un equipo que consta de dos entradas, (2) y (5), así como de una salida, (3), como se aprecia en la Ilustración 13:

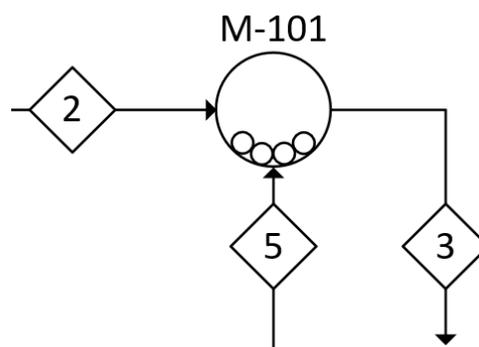


Ilustración 13. Diagrama del molino de bolas (M-101).

El balance de materia en el molino de bola (M-101) se modeliza por la ecuación (12):

$$F_{j;3} = F_{j;2} + F_{j;5} \quad (12)$$

Donde:

- $F_{j;3}$  Representa el caudal molar de entrada de cada componente  $j$  en la corriente 3, en [mol/h].

- $F_{j;2}$  y  $F_{j;5}$  Es el caudal molar de salida de cada componente  $j$  en la corriente 2 y 5 respectivamente, en [mol/h].

#### 4.2.3 Tamiz (T-101)

El tamiz T-101 es un equipo que consta de una entrada, (3), y dos salidas, (4) y (5), como se aprecia en la Ilustración 14:

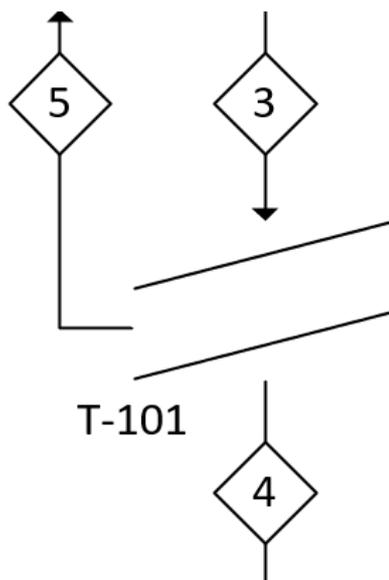


Ilustración 14. Diagrama del tamiz (T-101).

El balance de materia del tamiz (T-101) se rige por las ecuaciones (13):

$$F_{j;4} + F_{j;5} = F_{j;3} \quad (13)$$

Donde:

- $F_{j;3}$  Representa el caudal molar de entrada de cada componente  $j$  en la corriente 3, en [mol/h].

$-F_{j;4}$  y  $F_{j;5}$  Es el caudal molar de salida de cada componente j en la corriente 4 y 5 respectivamente, en [mol/h].

Además de las ecuaciones de balance de materia, es imprescindible contar con otras ecuaciones que nos faciliten la capacidad de regular la cantidad de materia que el tamiz rechaza(14).

$$F_{j;5} = F_{j;3} \cdot C_{rechazo} \quad (14)$$

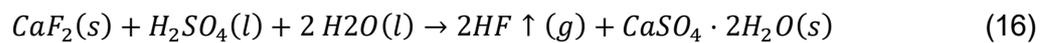
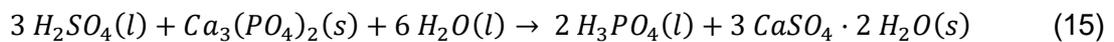
Donde:

$-C_{rechazo}$  representa el porcentaje de la corriente de entrada que es retenida por el tamiz y enviada al molino M-101. En la molienda de roca fosfórica durante este tipo de procesos el porcentaje de rechazo es aproximadamente el 70%[10]

$-F_{j;3}$  y  $F_{j;5}$  Es el caudal molar de salida de cada componente j en la corriente 3 y 5 respectivamente, en [mol/h].

#### 4.2.4 Reactor (R-101)

El reactor R-101 se ha modelizado como un reactor de mezcla perfecta. En este equipo se desarrolla la reacción química global presentada en la ecuación (4), aunque al llevar a cabo la simulación por motivos de simplicidad a la hora de calcular las propiedades de las sustancias se ha desglosado en las reacciones químicas (15) y (16):



Es importante tener en cuenta que aunque se hayan representado dos reacciones químicas ambas dos comparten el mismo grado de conversión, es decir en el reactor solamente está sucediendo una única reacción, ecuación (4), pero se han modelado como dos reacciones que se dan simultáneamente y en la misma proporción ya que esto permite realizar los balances de energía con las sustancias puras en vez de tener trabajar con datos experimentales referidos a la roca fosfórica, los cuales no se han podido obtener.

El reactor R-101 tiene dos corrientes de salidas. La corriente 6 se trata del efluente principal del reactor por donde salen: roca fosfórica no reaccionada, ácido sulfúrico no reaccionado, ácido fosfórico y yeso. Mientas que la corriente 7 es una línea de venteo de donde se extraen los gases generados durante la reacción química de la ecuación (16).

Teniendo en cuenta la complicación típica de la ciudad fosfórico [15] y la la dificultad de extraer el ácido sulfúrico residual del ácido fosfórico crudo de la corriente 6, se ha optado por limitar la concentración del ácido sulfúrico a un 1.8 %p.

$$Zm_{y_{3;6}} = 0.018 \quad (17)$$

mediante esta información y el balance de materia es posible deducir la cantidad de ácido sulfúrico necesaria a alimentar al reactor. Por último, el balance de materia del reactor R-101 se ha descrito mediante las siguientes ecuaciones:

- Corriente 6:

$$F_{1;6} = Alimentación_1 - 1 \cdot X \cdot Alimentación_1 - 0 \cdot X \cdot Alimentación_2 \quad (18)$$

$$F_{2;6} = Alimentación_1 - 0 \cdot X \cdot Alimentación_1 - 1 \cdot X \cdot Alimentación_2 \quad (19)$$

$$F_{3;6} = Alimentación_1 - 3 \cdot X \cdot Alimentación_1 - 1 \cdot X \cdot Alimentación_2 \quad (20)$$

$$F_{4;6} = Alimentación_1 + 2 \cdot X \cdot Alimentación_1 - 0 \cdot X \cdot Alimentación_2 \quad (21)$$

$$F_{5;6} = Alimentación_1 - 6 \cdot X \cdot Alimentación_1 - 2 \cdot X \cdot Alimentación_2 \quad (22)$$

$$F_{6;6} = Alimentación_1 + 3 \cdot X \cdot Alimentación_1 + 1 \cdot X \cdot Alimentación_2 \quad (23)$$

$$F_{7;6} = 0 \quad (24)$$

- Corriente 7:

$$F_{j;7} = 0 \quad (25)$$

$$F_{2;7} = 0 \quad (26)$$

$$F_{3;7} = 0 \quad (27)$$

$$F_{4;7} = 0 \quad (28)$$

$$F_{5;7} = 0 \quad (29)$$

$$F_{6;7} = 0 \quad (30)$$

$$F_{7;7} = Alimentación_1 - 0 \cdot X \cdot Alimentación_1 + 2 \cdot X \cdot Alimentación_2 \quad (31)$$

Donde:

- $Alimentación_j$  representa el caudal molar de la sustancia  $j$  alimentados al reactor, en [mol/h].

-X representa la fracción de moles de fosfato de calcio que han reaccionado, la cual se ha supuesto un 60%

-Los coeficientes que representa cada compuesto se encuentran en la Tabla 7

Por otro lado, teniendo en cuenta la composición típica del ácido fosfórico comercial [15] este incluye alrededor de un 2,5%p de sulfatos (SO<sub>4</sub>). En última instancia los sulfatos provienen del ácido sulfúrico introducido en el reactor y debido a la enorme cantidad de similitudes entre el ácido fosfórico y el ácido sulfúrico (carácter ácido, peso molecular, solubilidad en agua, polaridad, etc) es muy difícil llevar a cabo una separación de estos compuestos.

Por lo tanto, ha sido necesario limitar la presencia de sulfatos a la salida del reactor para que así la composición del ácido fosfórico obtenido tenga unas características similares al disponible comercialmente. Esto se ha logrado fijando la concentración de ácido sulfúrico a la salida del reactor en un 1,8 %p tal y como se muestra en la siguiente ecuación:

	$Zmy_{3,6} = 0,018$	(1)
--	---------------------	-----

#### 4.2.5 Bombas (P-101 a P-105)

Las bombas al tratarse de equipos de impulsión de fluidos presentan una única corriente de entrada y salida como se puede observar en la Ilustración 15:



Ilustración 15. Diagrama bomba.

Por lo tanto, todas las bombas desde la P-101 hasta la P-105 se ha modelizado su balance de materia siguiendo la ecuación (32).

$$F_j^{in} = F_j^{out} \quad (32)$$

Donde:

- $F_j^{in}$  Es el caudal molar de entrada de cada componente, en [mol/h].

- $F_j^{out}$  Es el caudal molar de salida de cada componente, en [mol/h].

## 4.2.6 Filtro (F-101)

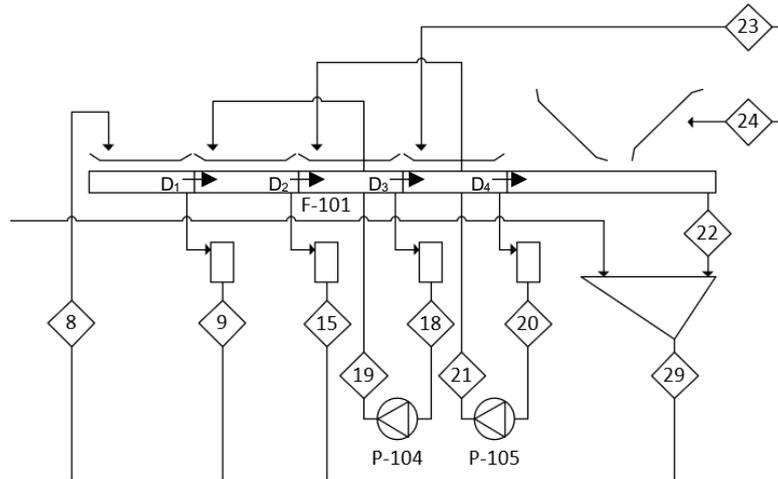


Ilustración 16. Diagrama del filtro (F-101).

El filtro (F-101), al tratarse de un filtro de bandejas, debería modelarse como un equipo de extracción sólido-líquido, para lo cual se requeriría conocer una serie de coeficientes de reparto y datos experimentales los cuales no han sido posible encontrar durante la realización de este trabajo.

Por lo tanto, para modelizar el filtro (F-101) se ha supuesto que cada bandeja del filtro se puede modelar como si se tratase de un tanque donde la componente líquida se encuentra en mezcla perfecta y la componente sólida fluye a la bandeja siguiente.

Previo a la relación de los cálculos del balance de materia para el filtro F 101 será necesario definir las corrientes  $D_{ji}$ . Estas se definen como el caudal de salida de un componente "j" de la bandeja "i", denotado como  $D_{j,i}$ .

- Bandeja 1

El balance de materia en la bandeja 1 debe cumplir la ecuación (33):

$$F_{j,9} + D_{j,1} = F_{j,8} \quad (33)$$

Donde:

$-F_{j,9}$  y  $F_{j,8}$  Es el caudal molar de cada componente j en la corriente 9 y 8 respectivamente, en [mol/h].

$-D_{j,1}$  Es el caudal molar de cada componente j en la corriente  $D_1$ , en [mol/h].

Al balance de materia de la bandeja 1 se le ha de añadir un conjunto de ecuaciones auxiliares. Estas ecuaciones nos permiten modelizar la bandeja 1 con el objetivo de separar la corriente 8 en sus componentes sólida y líquida. Para lograr eso se usarán las ecuaciones (34) y (35), donde la ecuación (34) solo aplica para los componentes sólidos de la corriente 8 y la ecuación (34) aplica al resto de compuestos.

	$D_{j;1} = Fx_8 \cdot (1 - \text{perdidas}) \cdot Zx_{j;8}$	(34)
	$D_{j;1} = Fx_8 \cdot (1 - \text{perdidas}) \cdot Zy_{j;8} \cdot \text{ratio}_{LS}$	(35)

Donde:

$-D_{j;1}$  es el caudal molar de cada componente  $j$  en la corriente  $D_1$ , en [mol/h].

$Fx_8$  representa el caudal de solidos presentes en la corriente 8, en [mol/h].

$-\text{perdidas}$  representa el porcentaje de solidos que atraviesa la bandeja 1 y por lo tanto no queda retenido, se ha supuesto un valor del 1%.

$-\text{ratio}_{LS}$  representa los moles de mezcla liquida por cada mol de sólido que pasa a la bandeja adyacente. Se ha supuesto 1 mol de mezcla liquida por cada mol de sólido.

$-Zy_{j;8}$  y  $Zx_{j;8}$  representan la fracción molar líquida ( $Zy$ ) y solida ( $Zx$ ) del compuesto  $j$  en la corriente 8.

Para el resto de las bandejas 2, 3 y 4 se ha seguido la misma estructura a la hora de modelizar sus comportamientos con las fracciones sólidas y líquidas de las corrientes que las atraviesan.

En el caso de las ecuaciones (36), (38) y (40), estas se aplican exclusivamente a la componente sólida. Estas ecuaciones se pueden interpretar de la siguiente manera: el caudal de salida de un componente " $j$ " de la bandeja " $i$ ", denotado como  $D_{j;i}$ , se calcula tomando el 95% del caudal de sólidos que ingresan a la bandeja " $i$ " y multiplicándolo por la concentración promedio del componente " $j$ ".

En el caso de la componente liquida este mismo razonamiento se aplica, pero en esta ocasión se multiplica por un termino  $\text{ratio}_{LS}$  el cual permite controlar la cantidad de líquido que acompaña al solido en la corriente  $D_i$ , tal y como se puede observar en las ecuaciones (37), (39) y (41):

- Bandeja 2

$$D_{j;2} = (Dx_1 + Fx_{19}) \cdot \frac{D_{1;1} + F_{1;19}}{Dx_1 + Fx_{19}} \quad (36)$$

$$D_{j;2} = (Dx_1 + Fx_{19}) \cdot \frac{D_{1;1} + F_{1;19}}{Dy_1 + Fy_{19}} \cdot \text{ratio}_{LS} \quad (37)$$

- Bandeja 3

$$D_{j;3} = (D_{X_2} + F_{X_{21}}) \cdot \frac{D_{1;2} + F_{1;21}}{D_{X_2} + F_{X_{21}}} \quad (38)$$

$$D_{j;3} = (D_{X_2} + F_{X_{21}}) \cdot \frac{D_{1;2} + F_{1;21}}{D_{y_2} + F_{y_{21}}} \cdot ratio_{LS} \quad (39)$$

- Bandeja 4

$$D_{j;4} = (D_{X_3} + F_{X_{23}}) \cdot \frac{D_{1;3} + F_{1;23}}{D_{X_3} + F_{X_{23}}} \quad (40)$$

$$D_{j;4} = (D_{X_3} + F_{X_{23}}) \cdot \frac{D_{1;3} + F_{1;23}}{D_{y_3} + F_{y_{23}}} \cdot ratio_{LS} \quad (41)$$

Donde:

- $D_{x_i}$  Representa la cantidad de sólidos en la corriente  $D_i$ , en [mol/h].

- $F_{x_i}$  Representa la cantidad de sólidos en la corriente  $F_i$ , en [mol/h].

$D_{x_{j;i}}$  Representa la cantidad de componente  $j$  en la corriente  $D_i$ , en [mol/h].

- $F_{x_{j;i}}$  Representa la cantidad de componente  $j$  en la corriente  $F_i$ , en [mol/h].

- $ratio_{LS}$  representa los moles de mezcla líquida por cada mol de sólido que pasa a la bandeja adyacente, se ha supuesto 1 mol se mezcla líquida por cada mol de sólido.

#### 4.2.7 Decantador (D-101)

El decantador D-101 es un equipo que consta de una entrada, (11), y dos salidas, (13) y (14), como se aprecia en la Ilustración 17:

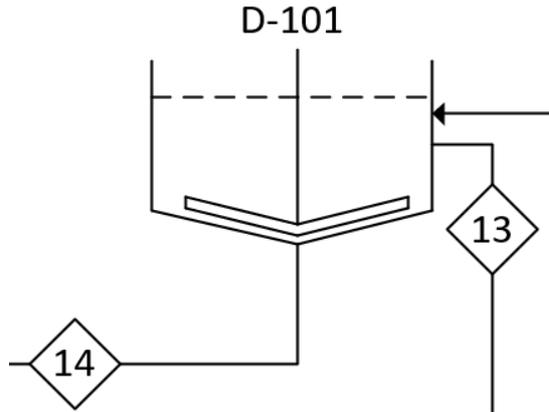


Ilustración 17. Diagrama del decantador (D-101).

El balance de materia del decantador (D-101) se rige por las ecuaciones (42):

$$F_{j;13} + F_{j;14} = F_{j;11} \quad (42)$$

Donde:

$-F_{j;11}$  Representa el caudal molar de entrada de cada componente  $j$  en la corriente 11, en [mol/h].

$-F_{j;13}$  y  $F_{j;14}$  Es el caudal molar de salida de cada componente  $j$  en la corriente 13 y 14 respectivamente, en [mol/h].

Además de las ecuaciones de balance de materia es necesario añadir otras ecuaciones auxiliares para poder definir por completo el balance de materia en el decantador (D-101).

Estas ecuaciones auxiliares nos permiten fijar el grado de retención de sólidos del decantador (D 101), el cual se ha fijado en un 80 %p, es decir, de cada kilogramo de sólido que entra el decantador el 80%p es capturado por el equipo. Junto a esto también ha sido necesario fijar la concentración del es slurry obtenido por el fondo del decantador. Se ha fijado a una concentración del 40%p en sólidos, se ha optado por este valor para promover una mejor impulsión de la corriente resultante a la hora de recircular la al reactor.

$$\frac{Fy_{14}}{F_{14}} = 0,6 \quad (43)$$

Por último, a la corriente de salida de los líquidos sobrenadantes del decantador se le ha añadido un filtro cuyo objetivo es la eliminación total de la poca materia sólida que haya podido escapar al decantador, su objetivo es asegurar una operación de evaporación segura y eficiente con mínimos problemas operacionales que podrían venir asociados a la presencia de sólidos en el evaporador.

$$Fm_{1;14} = \eta_{Decantador} \cdot Fm_{1;11} \quad (44)$$

$$Fm_{2;14} = \eta_{Decantador} \cdot Fm_{2;11} \quad (45)$$

$$Fm_{3;14} = Zmy_{3;11} \cdot Fmy_{14} \quad (46)$$

$$Fm_{4;14} = Zmy_{4;11} \cdot Fmy_{14} \quad (47)$$

$$Fm_{5;14} = Zmy_{5;11} \cdot Fmy_{14} \quad (48)$$

$$Fm_{6;14} = \eta_{Decantador} \cdot Fm_{3;11} \quad (49)$$

Donde:

- $Fm_{j;11}$  Es el caudal másico de entrada de cada componente j en la corriente 11, en [kg/h].

- $Fm_{j;14}$  Es el caudal másico de salida de cada componente j en la corriente 14, en [kg/h].

- $Fmy_{14}$  Es el caudal másico de salida de la fracción líquida en la corriente 14, en [kg/h].

- $\eta_{Decantador}$  Es la eficiencia del decantador la cual se ha fijado en un 80%p.

#### 4.2.8 Evaporador (V-101)

El evaporador V-101 es un equipo que consta de una entrada, (13), y dos salidas, (31) y (32), como se aprecia en la Ilustración 18:

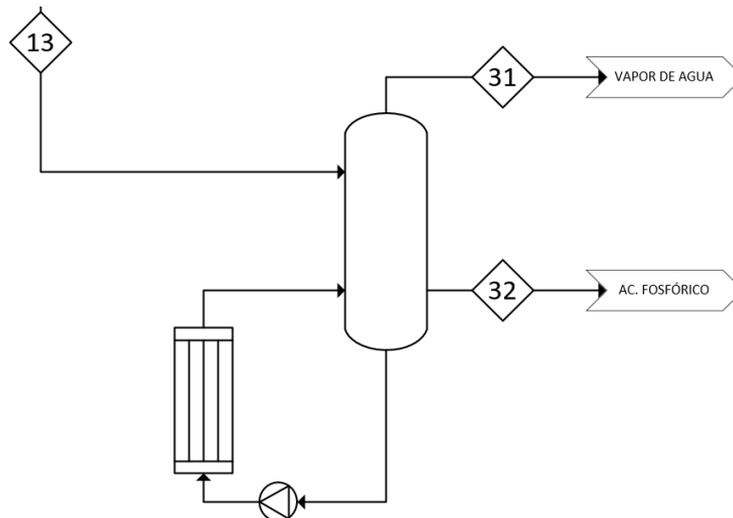


Ilustración 18. Diagrama del evaporador (V-101).

El balance de materia del evaporador (V-101) se rige por las ecuaciones:

$$F_{j;31} + F_{j;32} = F_{j;13} \quad (50)$$

Donde:

$-F_{j;13}$  Representa el caudal molar de entrada de cada componente  $j$  en la corriente 13, en [mol/h].

$-F_{j;31}$  y  $F_{j;32}$  Es el caudal molar de salida de cada componente  $j$  en la corriente 31 y 32 respectivamente, en [mol/h].

Además de las ecuaciones de balance de materia es necesario añadir otras ecuaciones auxiliares para poder definir por completo el balance de materia en el evaporador (V-101).

Estas ecuaciones auxiliares se añaden con el fin de determinar la composición de la corriente 31, es decir la corriente evaporada, para ello se ha hecho uso de datos experimentales [14] para determinar el equilibrio líquido-vapor en el evaporador. Para ello se ha hecho la suposición de que la mezcla agua-ácido fosfórico-ácido sulfúrico(1%p) presente en el equipo se puede asimilar a aquella formada únicamente por agua y ácido fosfórico. Mediante estos datos experimentales se comprueba que la fracción de ácido fosfórico en la fase gaseosa es despreciable por lo tanto se pueda asumir que en el evaporador únicamente se evapora agua. A continuación, se presentan los datos experimentales que se han utilizado:

**TABLE 7**  
Experimental (vapour + liquid) equilibrium data for phosphoric acid at 100 kPa.

$T^l$ K	Liquid phase Wt%	$T^v$ K	Liquid phase Wt%
372.57	0.40	376.38	36.35
372.55	0.21	376.48	31.37
372.60	0.52	377.53	39.99
372.60	0.27	377.52	40.66
372.60	0.47	379.20	45.80
372.69	1.58	379.40	46.95
372.67	1.44	379.36	45.26
372.68	1.79	379.82	46.60
372.67	1.74	379.93	46.02
372.67	1.97	383.91	55.33
372.68	1.72	384.20	55.57
372.67	2.01	391.15	66.31
372.66	1.98	390.45	65.58
372.74	4.46	402.60	71.91
372.75	4.58	409.14	75.97
372.76	5.13	409.35	75.69
372.76	4.34	415.26	80.24
372.82	5.46	415.37	79.14
372.81	5.89	414.97	80.82
372.83	5.78	426.17	86.71
372.80	6.25	426.27	86.44
372.88	8.09	426.54	87.12
372.90	7.99	448.07	90.45
373.11	9.41	449.17	92.05
373.13	9.61	448.88	89.15
373.33	12.12		
373.30	12.56	$T^v$	Vapour phase
373.63	14.81	K	Wt%
373.64	16.91	372.58	0.00
373.65	16.72	373.67	0.00
374.19	19.83	376.78	0.00
374.23	20.96	385.12	0.00
375.34	25.59	409.71	0.00
375.35	28.15	427.2	0.00
376.50	31.91	448.46	0.00
376.43	34.34		

Ilustración 19. Datos experimentales del equilibrio líquido-vapor de agua-ácido fosfórico a 100 kPa. [14]

Estos datos experimentales tomados a 100 kPa se han empleado para modelar el evaporador, el cual trabaja presión atmosférica. Tal y como se detalla en el apartado 4.3.7.

Por último, se debe establecer una concentración objetivo de ácido fosfórico del 75%p en la corriente 32. Todo esto da lugar a las siguientes ecuaciones que se presentan a continuación:

$$Zm_{1;31} = 0 \quad (51)$$

$$Zm_{2;31} = 0 \quad (52)$$

$$Zm_{3;31} = 0 \quad (53)$$

$$Zm_{4;32} = 0,75 \quad (54)$$

$$Zm_{5;31} = 0 \quad (55)$$

$$Zm_{6;31} = 0 \quad (56)$$

$$Zm_{7;31} = 0 \quad (57)$$

Donde

$-Zm_{j,i}$  representa el porcentaje másico de j en la corriente i.

#### 4.2.9 Resultados del balance de materia

Tras la realización de los balances de materia es posible evaluar el rendimiento que presenta la planta. Para ello nos fijaremos en varias métricas importantes y se comparará con la literatura disponible.

Comenzando con la pureza del ácido fosfórico obtenido éste se encuentra dentro de los rangos normales disponibles comercialmente. En nuestro caso el ácido obtenido contiene una concentración del 75%p de ácido fosfórico, un 3,5%p de ácido sulfúrico y un 21,5%p de agua

Por otro lado, el yeso obtenido por la línea 30 contiene una pureza bastante baja. Esto es debido a que es necesario una etapa posterior de purificación para recuperar la roca fosfórica no convertida. Esta etapa no se ha realizado durante este trabajo debido a que la mayoría de los métodos convencionales para la separación de sólidos depende en gran medida de la granulometría de estos, y de la cual no se dispone. La única excepción a esta regla sería una separación por densidad, pero debido a que no se ha encontrado ningún fluido con una densidad intermedia entre la del yeso y el fosfórico se ha optado por dejar la línea 30 con una composición tal que se facilite añadir a posteriori este equipo (línea 30: 70%p agua). Esta es la razón principal junto con el hecho de que no se recircula el vapor de agua extraído del evaporador por la que el consumo de agua en la planta es muy elevado.

Por último, mencionar que en el estado actual que presenta la planta se obtiene una eficiencia respecto al fósforo introducido de aproximadamente el 65%p. Es decir, aproximadamente un 35% del fósforo introducido en la planta se fuga junto con el yeso en la línea 30. Para lograr una eficiencia similar a la de otras plantas de ácido fosfórico sería necesario recuperar al menos el 95% de la roca fosfórica que se encuentran en la línea de yeso y recircularla al reactor.

A continuación, se exponen los resultados obtenidos mediante la realización del balance de materia como se ha explicado previamente, junto con la tabla de resultados también se muestra el PDF de la planta para facilitar la lectura y comprensión de los resultados obtenidos.

*NOTA: Para ver los resultados completos de la simulación dirigirse al anexo 2*

Tabla 8. Caudales molares por componentes [mol/h].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{HF}$
F <sub>1</sub>	-	-	67368	-	3496	-	-
F <sub>2</sub>	35588	1873	-	-	-	-	-
F <sub>3</sub>	118626	6243	-	-	-	-	-
F <sub>4</sub>	35588	1873	-	-	-	-	-
F <sub>5</sub>	83038	4370	-	-	-	-	-
F <sub>6</sub>	14281	751,6	2393	51865	428442	65918	-
F <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	-	2255
F <sub>8</sub>	14281	751,6	2393	51865	428442	65918	-
F <sub>9</sub>	142,8	7,516	1996	43254	357309	659,2	-
F <sub>10</sub>	142,8	7,516	1996	43254	357309	659,2	-
F <sub>11</sub>	142,8	7,516	1996	43254	357309	659,2	-
F <sub>12</sub>	-	-	-	-	-	-	-
F <sub>13</sub>	28,56	1,503	1961	42498	351065	131,8	-
F <sub>14</sub>	114,2	6,013	34,88	755,9	6244	527,3	-
F <sub>15</sub>	-	-	381,4	8267	190485	-	-
F <sub>16</sub>	-	-	381,4	8267	190485	-	-
F <sub>17</sub>	-	-	381,4	8267	190485	-	-
F <sub>18</sub>	-	-	137,6	2982	196012	-	-
F <sub>19</sub>	-	-	137,6	2982	196012	-	-
F <sub>20</sub>	-	-	39,49	855,8	198237	-	-
F <sub>21</sub>	-	-	39,49	855,8	198237	-	-
F <sub>22</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	2034000	65259	-
F <sub>23</sub>	-	-	-	-	199132	-	-
F <sub>24</sub>	-	-	-	-	1954000	-	-
F <sub>25</sub>	-	-	-	-	2153000	-	-
F <sub>26</sub>	-	-	-	-	6765	-	-
F <sub>27</sub>	-	-	-	-	-	-	112,7
F <sub>28</sub>	-	-	-	-	6765	-	2142
F <sub>29</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	2041000	65259	2142
F <sub>30</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	2041000	65259	2142

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{HF}$
F <sub>31</sub>	-	-	-	-	284647	-	-
F <sub>32</sub>	-	-	1961	42498	66418	-	-
F <sub>33</sub>	-	-	1961	42498	351065	-	-
D <sub>1</sub>	14138	744,1	397,3	8611	71133	65259	-
D <sub>2</sub>	14138	744,1	153,5	3327	76661	65259	-
D <sub>3</sub>	14138	744,1	55,38	1200	78886	65259	-
D <sub>4</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	79781	65259	-

Tabla 9. Caudales másicos por componentes.

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{HF}$
Fm <sub>1</sub>	-	-	6607	-	62,99	-	-
Fm <sub>2</sub>	11041	146,6	-	-	-	-	-
Fm <sub>3</sub>	36804	488,7	-	-	-	-	-
Fm <sub>4</sub>	11041	146,6	-	-	-	-	-
Fm <sub>5</sub>	25763	342,1	-	-	-	-	-
Fm <sub>6</sub>	4431	58,83	234,7	5085	7719	11346	-
Fm <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	-	45,12
Fm <sub>8</sub>	4431	58,83	234,7	5085	7719	11346	-
Fm <sub>9</sub>	44,31	0,588	195,7	4241	6437	113,5	-
Fm <sub>10</sub>	44,31	0,588	195,7	4241	6437	113,5	-
Fm <sub>11</sub>	44,31	0,588	195,7	4241	6437	113,5	-
Fm <sub>12</sub>	-	-	-	-	-	-	-
Fm <sub>13</sub>	8,861	0,118	192,3	4167	6325	22,69	-
Fm <sub>14</sub>	35,44	0,471	3,421	74,11	112,5	90,77	-
Fm <sub>15</sub>	-	-	37,41	810,5	3432	-	-
Fm <sub>16</sub>	-	-	37,41	810,5	3432	-	-
Fm <sub>17</sub>	-	-	37,41	810,5	3432	-	-
Fm <sub>18</sub>	-	-	13,5	292,4	3531	-	-
Fm <sub>19</sub>	-	-	13,5	292,4	3531	-	-
Fm <sub>20</sub>	-	-	3,873	83,91	3571	-	-
Fm <sub>21</sub>	-	-	3,873	83,91	3571	-	-
Fm <sub>22</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	36641	11233	-
Fm <sub>23</sub>	-	-	-	-	3588	-	-
Fm <sub>24</sub>	-	-	-	-	35204	-	-
Fm <sub>25</sub>	-	-	-	-	38791	-	-
Fm <sub>26</sub>	-	-	-	-	121,9	-	-
Fm <sub>27</sub>	-	-	-	-	-	-	2,256
Fm <sub>28</sub>	-	-	-	-	121,9	-	42,86
Fm <sub>29</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	36763	11233	42,86
Fm <sub>30</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	36763	11233	42,86
Fm <sub>31</sub>	-	-	-	-	5128	-	-
Fm <sub>32</sub>	-	-	192,3	4167	1197	-	-
Fm <sub>33</sub>	-	-	192,3	4167	6325	-	-
Dm <sub>1</sub>	4386	58,24	38,97	844,3	1282	11233	-
Dm <sub>2</sub>	4386	58,24	15,05	326,2	1381	11233	-
Dm <sub>3</sub>	4386	58,24	5,431	117,7	1421	11233	-
Dm <sub>4</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	1437	11233	-

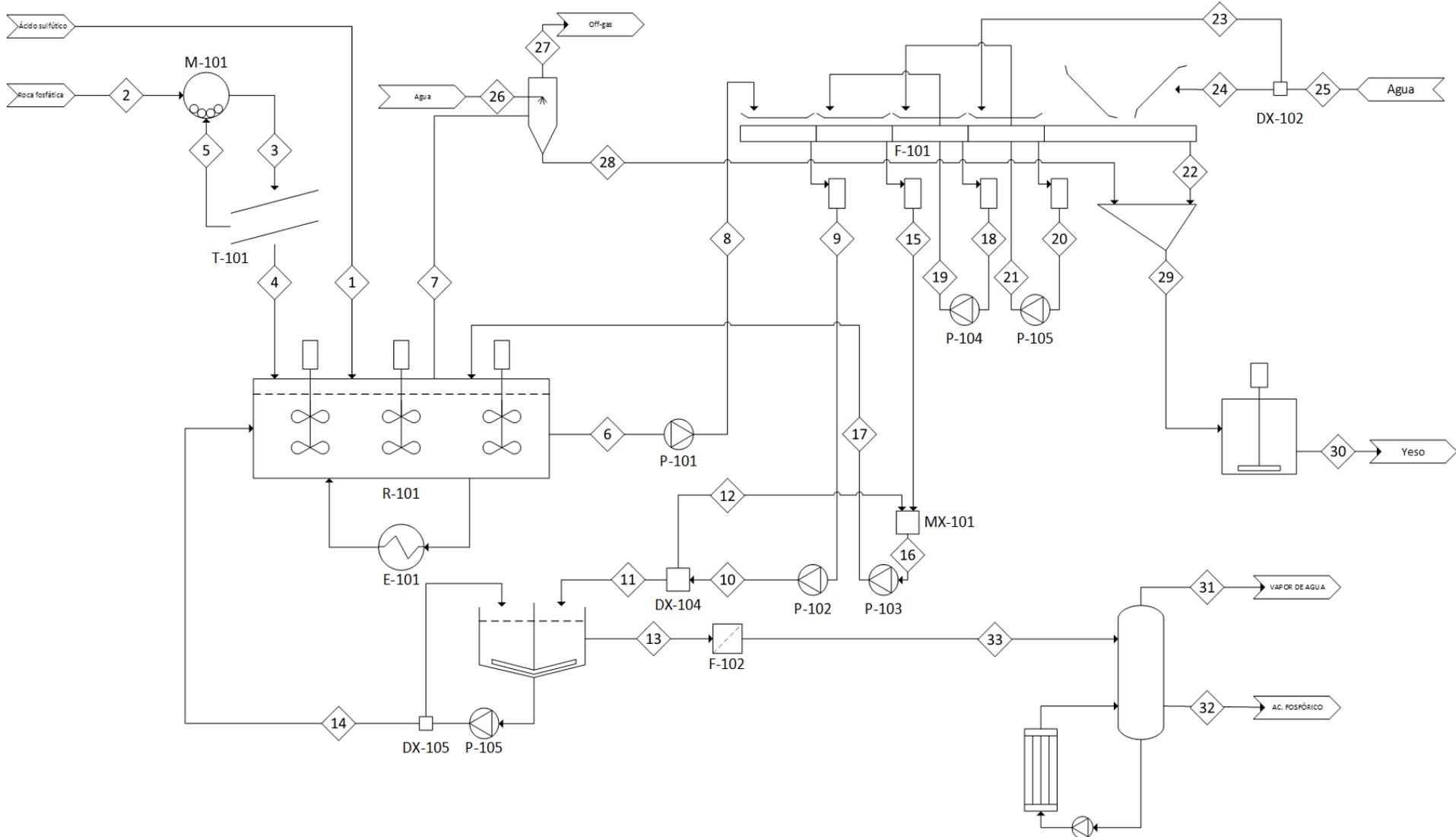


Ilustración 20.PFD de la planta de ácido fosfórico.

### 4.3 Balance de Energía.

Con el objetivo de simplificar las ecuaciones de balance de energía de la planta se ha definido una nueva variable  $\Delta H$ , la cual mide la cantidad energía por hora de una corriente en [kJ/h]. Esta nueva variable se define para cada sustancia en cada corriente mediante la ecuación (67):

$$\Delta H_i = \sum_{j=1}^7 \left( (H_{T_i;j}^o - H_{298,15;j}^o) + H_{f;j}^o \right) \cdot F_{j;i} \quad (58)$$

Donde:

$-H_{T_i;j}^o - H_{298,15;j}^o$  Representa la variación de entalpia de una sustancia j entre 25 °C y una temperatura  $T_i$  arbitraria a presión atmosférica, en [kJ/mol]. Esta variación encuentra su definición en la ecuación (6).

$-H_{f;j}^o$  representa la entalpia de formación estándar de una sustancia j, en [kJ/mol].

$-F_{j;i}$  representa el caudal molar de una sustancia j en una corriente i, en [mol/h]

Recordar que esta ecuación solamente es válida cuándo se aplica a una corriente a presión atmosférica. Tal y como se explica en el apartado 4.1.3.

#### 4.3.1 Molino de bolas (M-101)

Para llevar a cabo el balance de energía en el molino de bolas (M-101) se ha supuesto que el equipo trabaja de forma adiabática, es decir, no se produce intercambio de energía con el exterior mediante la transmisión de calor.

A su vez también se ha supuesto que el efecto de calentamiento que sufre la corriente procesada en el molino debido a la fricción no se produce, o de hacerlo su efecto es despreciable. Por lo tanto, el molino de bola cumple con la ecuación (59):

$$25[^\circ\text{C}] = T_2 = T_3 \quad (59)$$

Donde:

$-T_2$  representa la temperatura de la corriente 2, la cual además se ha fijado a 25 °C

$-T_3$  representa la temperatura de la corriente 3.

*NOTA: La potencia mecánica del equipo se encuentra calculada en el apartado 4.4.1.*

#### 4.3.2 Tamiz (T-101)

Para llevar a cabo el balance de energía en el tamiz (T-101) se ha supuesto que, al igual que en el molino de bolas (M-101), el equipo trabaja de forma adiabática y las temperaturas de las corrientes de salidas (4) y (5) es igual a la de entrada (3). Esto queda reflejado en las ecuaciones (60) y (61):

$$T_4 = T_3 \quad (60)$$

$$T_5 = T_3 \quad (61)$$

Donde:

$-T_i$  representa la temperatura de la corriente i.

### 4.3.3 Reactor (R-101)

Con el propósito de efectuar el balance de energía en el reactor (R-101), se empleará la variable previamente presentada en la ecuación (58) para determinar la cantidad de calor que requiere ser disipado mediante el proceso de refrigeración del reactor (R-101) bajo unas condiciones de operación de 90 °C y 1 bar.

En la ecuación (62) se representa el balance de energía del reactor (R-101)

$$\Delta H_6 + \Delta H_7 = \Delta H_1 + \Delta H_4 + \Delta H_{14} + \Delta H_{17} + Q_{\text{REACTOR}} \cdot 3600 \left[ \frac{\text{S}}{\text{h}} \right] \quad (62)$$

Donde:

$-\Delta H_i$  mide la cantidad energía por hora de una corriente i en [kJ/h].

$-Q_{\text{REACTOR}}$  representa la cantidad de calor a aportar al reactor (R-101), en kW.

*NOTA: La potencia a aportar del reactor se encuentra calculada en el apartado 4.4.2*

### 4.3.4 Bombas (P-101 a P-105)

Durante la realización del balance de energía en las bombas (P-101 a P-105) al tratarse estas de equipos de impulsión de líquidos, se han supuesto que operan de forma adiabática.

En una bomba que opera de forma adiabática, no hay transferencia de calor hacia o desde el fluido que está siendo bombeado. Como resultado, la única forma en que podría cambiar la temperatura del fluido es si hay una variación significativa en la energía interna debida a cambios en la presión o la velocidad del fluido. Sin embargo, para líquidos, que son prácticamente incompresibles, el cambio en energía interna asociado con la variación de presión es muy pequeño. Por lo tanto, cualquier aumento en la presión que produce la bomba se traduce principalmente en un aumento de la energía mecánica (presión), y no en un aumento significativo de la temperatura. Es por eso que, en una bomba operando adiabáticamente, la temperatura a la entrada y a la salida permanece esencialmente la misma.

una vez expuesto como la temperatura a la entrada y a la salida de una bomba que impulsa el líquido permanecerá casi constante es posible simplificar el balance de energía dando lugar a las siguientes ecuaciones (63), (64), (65), (66) y (67):

$$T_8 = T_6 \quad (63)$$

$$T_{10} = T_9 \quad (64)$$

$$T_{17} = T_{16} \quad (65)$$

$$T_{19} = T_{18} \quad (66)$$

$$T_{21} = T_{20} \quad (67)$$

Donde:

$-T_i$  representa la temperatura de la corriente  $i$ .

*NOTA: Las potencias de las bombas se encuentra calculadas en el apartado 4.4.3.*

#### 4.3.5 Filtro (F-101)

Con el propósito de efectuar el balance de energía en el reactor (R-101), se hará uso de la variable previamente presentada en la ecuación (58).

En esta caso como las bandejas del filtro (F-101) se ha modelizado de manera similar a un tanque en mezcla perfecta sin intercambio de calor con el medio, el balance de energía se puede calcular mediante las ecuaciones (68), (69), (70), (71) y (72):

$$\Delta H_{15} + \Delta H_{D,2} = \Delta H_{19} + \Delta H_{D,1} \quad (68)$$

$$\Delta H_{18} + \Delta H_{D,3} = \Delta H_{21} + \Delta H_{D,2} \quad (69)$$

$$\Delta H_{20} + \Delta H_{D,4} = \Delta H_{23} + \Delta H_{D,3} \quad (70)$$

$$\Delta H_{22} = \Delta H_{24} + \Delta H_{D,4} \quad (71)$$

$$\Delta H_{29} = \Delta H_{22} + \Delta H_{28} \quad (72)$$

Donde:

$-\Delta H_i$  mide la cantidad energía por hora de una corriente  $i$ , en [kJ/h].

$-\Delta H_{D,i}$  mide la cantidad energía por hora de una corriente  $D_i$ , en [kJ/h].

#### 4.3.6 Decantador (D-101)

Para llevar a cabo el análisis del balance de energía en el decantador (D-101), se asume que el equipo opera de manera adiabática, es decir, no hay intercambio de calor con el entorno. Además, se considera que la temperatura de la corriente de entrada (11) es igual a la temperatura de las corrientes de salida (13) y (14). Esta suposición se refleja en las ecuaciones (73) y (74):

$$T_{13} = T_{11} \quad (73)$$

$$T_{14} = T_{11} \quad (74)$$

Donde:

$-T_i$  representa la temperatura de la corriente  $i$ .

### 4.3.7 Evaporador (V-101)

Para realizar el análisis del balance de energía en el evaporador V-101, se adopta la hipótesis de que no hay pérdidas de calor entre el equipo y su entorno. Además, se asume que la temperatura de las corrientes de salida, identificadas como corrientes (31) y (32), se encuentran en equilibrio y 134,4 °C (Se deduce de las condiciones de saturación del fosfórico al 75%p. Ilustración 19).

Recalcar que el evaporador opera a presión atmosférica, aunque los datos experimentales que se han usado para el cálculo de la temperatura de operación del evaporador están tomados del equilibrio líquido-vapor de la mezcla ácido fosfórico-agua a 100 kPa. Esto es debido a que no se han podido encontrar datos experimentales del equilibrio tomados en condiciones atmosféricas y se ha optado por usar estos como una aproximación. Dado que la presión atmosférica es igual a 101,325 kPa estos datos deberían ser una muy buena aproximación del equipo real. Aunque es esperable que el equipo trabaje a unos pocos grados superior a lo mencionado previamente debido a que opera a una presión ligeramente mayor que en la que indica los datos que se han utilizado.

Esta consideración se traduce matemáticamente en las ecuaciones (75) y (76).

$$T_{31} = 134,4 \text{ [}^\circ\text{C]} \quad (75)$$

$$T_{32} = T_{31} \quad (76)$$

Donde:

$-T_i$  representa la temperatura de la corriente  $i$ .

La ecuación de balance de energía empleadas para modelizar el evaporador se encuentra en el apartado 4.4.4

*NOTA: El aporte de calor al equipo se encuentra calculada en el apartado 4.4.4*

## 4.4 Dimensionamiento de los equipos principales.

### 4.4.1 Molino de bolas (M-101)

Para dimensionar el molino de bolas la magnitud más características de estos equipos es la potencia necesaria para su operación.

Dicha potencia se puede calcular mediante la ley de Bond[11] la cual se muestra en la ecuación (77):

$$P = \dot{m} \cdot W_i \sqrt{0.1} \cdot \left( \frac{1}{\sqrt{D_{80}^S}} - \frac{1}{\sqrt{D_{80}^E}} \right) \quad (77)$$

Donde:

P es la potencia mecánica requerida para la molienda en [kW].

$\dot{m}$  representa el caudal másico a tratar, en [t/h]

$W_i$  es el índice de trabajo de la roca fosfórica e igual a 9,92 kWh/t [Anexo 4]

$D_{80}^S$  representa el tamaño de partícula con un 80% de paso en la salida, en [mm] y con valor de 0,25.

$D_{80}^E$  representa el tamaño de partícula con un 80% de paso en la entrada, en [mm] y con valor de 10.

*NOTA: La potencia mecánica así calculada es la potencia requerida en el eje del piñón del molino, lo cual incluye pérdidas de eficiencia, en rodamientos, engranajes y piñón, pero NO INCLUYE pérdidas de eficiencia en el motor y otros componentes accesorios, tales como reductores de velocidad, pérdidas por transmisión, etc. [12]*

Esto da lugar a un consumo de 197 kW, el cual al tratarse de una molienda seca se deberá multiplicar por un factor de 1,3 [12] dando lugar a un consumo de 256,1 kW mecánicos. Para calcular la potencia eléctrica necesaria por el motor podemos asumir un rendimiento del 95% del mismo. Esto da lugar a una potencia eléctrica de 269,6 kW.

#### 4.4.2 Reactor (R-101)

Para dimensionar del reactor (R-101), el cual se trata de un reactor mezcla perfecta, las variables más relevantes son su volumen y la cantidad de calor necesario que extraer del reactor.

Para poder determinar su volumen con precisión sería necesario conocer las cinéticas de las reacciones que tiene lugar en el reactor, así como los diversos procesos que se dan en el reactor como podría ser el caso de los fenómenos de precipitación de los cristales de yeso, los efectos de transferencia de materia, balances poblacionales de tamaño de partículas en el reactor, otras no idealidades en las concentraciones en el fluido en el interior del reactor debido a su fluidodinámica, etc.

Al desconocerse esto se ha optado por un análisis empírico tomando el proceso descrito por *Jordan Phosphate Mines* [13], el cual consiste en una planta de producción de ácido fosfórico por vía húmeda. Esto ha permitido realizar una estimación del volumen necesario para el reactor presentado en este proyecto.

En su caso para producir entre 900 y 1310 t/día (1105 t/día) de ácido fosfórico diluido (28%p  $P_2O_5$ ) requiere de un reactor con 1250 m<sup>3</sup>. Aplicando esta misma relación a nuestra planta, la cual produce 308,5 toneladas al día de ácido fosfórico diluido (30%p  $P_2O_5$ ), el volumen de reactor estimado es de 350 m<sup>3</sup>.

Por otro lado, realizando el balance de energía en el reactor tal y como se describe en el apartado 4.3.3 es posible calcular la potencia necesaria que aportar al reactor.

Tras realizar el balance de energía se obtiene:

$$Q_{REACTOR} = -29416 \text{ [kW]}$$

#### 4.4.3 Bombas (P-101 a P-105)

Los parámetros de diseño más importantes para una bomba son su caudal, aumento de presión proporcionado por el equipo y su potencia

Mientras que el caudal se puede obtener directamente de la simulación de la planta y el salto de presión de cada bomba se ha fijado en 3 bar. Este valor estimativo se ha tomado teniendo en cuenta que, previsiblemente, ningún equipo presente en la planta tenga una altura elevada siendo el más alto de ello el reactor, debido a sus grandes dimensiones.

Por otro lado, equipos como el filtro de bandeja presenta un sistema de distribución de agua mediante un recipiente con un vertedero para su distribución, por lo tanto la descarga es atmosférica y podemos asumir que no presenta una pérdida de carga significativa (además a lo largo de la literatura usada en este trabajo nunca se ha hecho énfasis en este aspecto del diseño por lo tanto es de prever que no es un problema especialmente relevante para este tipo de equipos), como se aprecia en las siguientes imágenes.



Ilustración 21. Diagrama de sistema de distribución de agua de lavado de un filtro pan



Ilustración 22. Filtro de bandeja operando.

Calcular la potencia requiere emplear la ecuación (78) para poder obtenerse:

$$P = \frac{Q \cdot \Delta P}{1000 \cdot \eta} \quad (78)$$

Donde:

-P representa la potencia eléctrica que consume la bomba, en [kW]

-Q representa el caudal volumétrico a la entrada de la bomba, expresado en[m<sup>3</sup>/s]

-\Delta P representa el salto de presión entre la impulsión y la aspiración de la bomba, en [Pa].

-\eta es un coeficiente adimensional que representa el rendimiento global de la bomba, el cual se ha supuesto un 60%.

Tabla 10. Dimensionamiento de las bombas P-101 a P-105.

<b>EQUIPO</b>	<b>Caudal [m<sup>3</sup>/h]</b>	<b>Salto de presión [bar]</b>	<b>Potencia [kW]</b>
P-101	19,47	3	2,70
P-102	11,14	3	1,55
P-103	4,32	3	0,60
P-104	4,13	3	0,57
P-105	4,03	3	0,56

#### 4.4.4 Evaporador (V-101)

El parámetro más importante para dimensionar el evaporador (V-101) es la carga de calor, o duty, que este debe aportar al fluido de proceso para que se evapore

Mediante la ecuación (79) es posible calcular el valor de la carga de calor del evaporador (V-101):

$$\Delta H_{13} + Q_{\text{EVAPORADOR}} \cdot 3600 \left[ \frac{\text{S}}{\text{h}} \right] = \Delta H_{31} + \Delta H_{32} \quad (79)$$

Donde:

$-\Delta H_j$  mide la cantidad energía por hora de una corriente  $i$  en [kJ/h].

$-Q_{\text{EVAPORADOR}}$  es la cantidad de calor que el evaporador debe aportar al fluido, en [kW].

El resultado es que la duty del evaporador (V-101) es igual a 4360 kW.



# 5 CONCLUSIONES.

---

En el transcurso de este trabajo de proyecto de fin de grado (TFG), se ha diseñado una planta química para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfática. El alcance de este proyecto ha abarcado desde la evaluación exhaustiva de las diferentes tecnologías disponibles en el mercado hasta el dimensionamiento de los equipos principales requeridos para la operación de la planta. A continuación, resumimos los logros alcanzados en cada uno de los objetivos específicos planteados:

1. **Análisis de las diferentes tecnologías existentes en el mercado para la producción de ácido fosfórico:** Se ha llevado a cabo una revisión minuciosa de las tecnologías disponibles para la producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfática. Este análisis ha permitido identificar y evaluar las diversas alternativas existentes, considerando aspectos como la eficiencia, las ventajas, las desventajas y la aplicabilidad de cada una.
2. **Selección de la tecnología más adecuada:** Basándonos en el análisis previo, se ha procedido a la selección de la tecnología más adecuada para la producción de ácido fosfórico. Esta elección se ha fundamentado en criterios sólidos, tales como la complejidad del proceso.
3. **Diseño del proceso:** Un diseño detallado de los procesos involucrados en la producción de ácido fosfórico se ha desarrollado minuciosamente. Esto incluye etapas como la preparación de la fosforita, la reacción química para la obtención del ácido y la separación y purificación del producto final. Cada uno de estos pasos ha sido cuidadosamente delineado para asegurar la eficiencia.
4. **Dimensionamiento de los equipos principales:** Con la tecnología seleccionada y el diseño del proceso definido, se ha llevado a cabo el dimensionamiento de los equipos principales requeridos para la planta mediante el uso de softwares de cálculos como EES y Excel. Esto ha implicado determinar la capacidad de producción deseada, especificar el tamaño de los equipos y las instalaciones necesarias, así como calcular los caudales de materia y energía necesarios para una operación óptima.

Sin embargo, este trabajo no se agota aquí, y se abren oportunidades para futuras investigaciones y desarrollos. Algunas áreas de extensión y mejora que podrían explorarse incluyen:

1. **Optimización de Procesos:** Se podría profundizar en la optimización de los procesos diseñados para aumentar la eficiencia y reducir los costos operativos, considerando variables como la cinética de reacción, la gestión de residuos y la utilización de recursos energéticos renovables.
2. **Impacto Ambiental y Sostenibilidad:** Un aspecto fundamental a considerar en futuras investigaciones es la evaluación del impacto ambiental de la planta química propuesta y la búsqueda de medidas para hacerla más sostenible desde el punto de vista ambiental.
3. **Innovación Tecnológica:** La incorporación de tecnologías emergentes, como la automatización y el uso de inteligencia artificial en el control de procesos, puede ser un camino hacia la mejora continua de la planta.

En resumen, este proyecto representa un sólido punto de partida para la materialización de una planta química de producción de ácido fosfórico a partir de roca fosfática

# REFERENCIAS

---

- [1] R. Hussein, K. Sahib, and A. Atwan, "Producción de ácido fosfórico."
- [2] K. Schrödter, S. Schrödter, T. Staffel, T. Klein, and T. Hofmann, "Phosphoric Acid and Phosphates 2.1 in part)," 2005, doi: 10.1002/14356007.a19.
- [3] MINISTERIO PARA LA TRANSICIÓN ECOLÓGICA Y EL RETO DEMOGRÁFICO, "Registro Estatal de Emisiones y Fuentes Contaminantes." [https://prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id\\_Complejo=1407](https://prtr-es.es/informes/fichacomplejo.aspx?Id_Complejo=1407) (accessed Sep. 07, 2023).
- [4] A. H. Couceyro, "Title: Design of a chemical plant for the production of phosphoric acid from the Cuban phosphorite."
- [5] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Coeficientes del fluoruro de calcio para la ecuación de Shomate." <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7789755&Type=JANAFS&Table=on> (accessed Sep. 06, 2023).
- [6] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Coeficientes del ácido sulfúrico para la ecuación de Shomate." <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7664939&Mask=FFF> (accessed Sep. 05, 2023).
- [7] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Coeficientes del ácido fosfórico para la ecuación de Shomate." <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7664382&Mask=FFF> (accessed Sep. 06, 2023).
- [8] National Institute of Standards and Technology (NIST), "Coeficientes del fluoruro de hidrógeno para la ecuación de Shomate." <https://webbook.nist.gov/cgi/cbook.cgi?ID=C7664393&Mask=1E9F> (accessed Sep. 06, 2023).
- [9] J. C. Southard and R. T. Milner, "Low Temperature Specific Heats. V. The Heat Capacity of Tricalcium Phosphate between 15 and 298°K.," *J Am Chem Soc*, vol. 57, no. 6, pp. 983–984, Jun. 1935, doi: 10.1021/ja01309a006.
- [10] JR. PLINY L. OLIVIER, "Producción de ácido fosforico mediante via humeda," 1978.
- [11] John W. Schlanz, "GRINDING: AN OVERVIEW OF OPERATION AND DESIGN," 1987.
- [12] Gutiérrez, L., Sepúlveda, J. 1986. Dimensionamiento y Optimización de Plantas Concentradoras mediante Técnicas de Modelación Matemática. Editado por CIMM, 302 p.
- [13] Jordan Phosphate Mines, Company (PLC), "Producción de ácido fosfórico" [https://www.jpmmc.com.jo/En/Pages/Phosphori\\_Acid](https://www.jpmmc.com.jo/En/Pages/Phosphori_Acid) (accessed jun. 28, 2024)
- [14] Sebastian Lang, Timur J. Kazdal, Frank Kühn, Manfred J. Hampe, Diffusion coefficients and VLE data of aqueous phosphoric acid, *The Journal of Chemical Thermodynamics*, Volume 68, Pages 75-81, ISSN 0021-9614, <https://doi.org/10.1016/j.jct.2013.08.028>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002196141300308X>)
- [15] Indian Government, "Technology in Indian phosphoric acid industry." Available at: <https://www.dsr.gov.in/sites/default/files/2019-12/tsr011.pdf> (Accessed: 06 September 2024).



# Anexo 1. Código de EES.

```
"1 Ca3(PO4)2 Fosfato de calcio/Roca fosfatica"  
"2 CaF2 Fluoruro de calcio/Roca fosfatica"  
"3 H2SO4 Acido sulfurico"  
"4 H3PO4 Acido fosforico"  
"5 H2O Agua"  
"6 CaSO4·2 H2O Sulfato de calcio dihidratado/yeso"  
"7 HF Acido fluohídrico"
```

```
n_comp = 7 [-]  
n_corr = 32 [-]
```

```
{
```

```
MAIN REACTION:
```

```
3 H2SO4 (l) + Ca3(PO4)2 (s) + 6 H2O (l) -----> 2 H3PO4 + 3 CaSO4·2 H2O (s)  
  3 [3]   + 1 [1]           + 6 [5]   -----> 2 [4]   + 3 [6]  
(Ca3(PO4)2 (s) LIMITANTE EN MAIN.R)
```

```
SIDE REACTIONS
```

```
CaF2 + H2SO4 + 2 H2O -----> 2HF + CaSO4·2H2O (s)  
1 [2] + 1 [3]   + 2 [5]   -----> 2 [7] + 1 [6]  
(CaF2 LIMITANTE EN SIDE.R)
```

```
}
```

```
$Bookmark 00 //////////////////////////////////////////////////BALACE DE MATERIA////////////////////////////////////  
$Bookmark 01 BM CORRIENTES DE ENTRADA / CAUDALES / COMPOSICIONES
```

```
"Definimos los pesos moleculares en [kg/mol]"
```

```
PM_[1] = 0,31025 [kg/mol]  
PM_[2] = 0,07827 [kg/mol]  
PM_[3] = 0,098076 [kg/mol]  
PM_[4] = 0,098044 [kg/mol]  
PM_[5] = 0,018016 [kg/mol]  
PM_[6] = 0,172126 [kg/mol]  
PM_[7] = 0,020008 [kg/mol]
```

```
"Calculamos el caudal masico (Fm_[j][i]) a partir del molar (F_[j][i])"
```

```
DUPLICATE i=1;n_corr  
  DUPLICATE j=1;n_comp  
  Fm_[j][i] = F_[j][i] * PM_[j]  
END
```

END

```
DUPLICATE i=1;4
  DUPLICATE j=1;n_comp
  Dm_[j][i] = D_[j][i] * PM_[j]
  END
```

END

"Definimos la composicion de cada corriente y caudal total"

```
DUPLICATE i=1;n_corr
```

```
"      MOLAR                      MASICA                      "
```

```
  F_[i] = sum(F_[n][i];n=1;n_comp) : Fm_[i] = sum(Fm_[n][i];n=1;n_comp) "Se define el
caudal total molar y masico"
```

```
  Fy_[i] = F_[3][i] + F_[4][i] + F_[5][i] + F_[7][i] : Fmy_[i] = Fm_[3][i] + Fm_[4][i] +
Fm_[5][i] + Fm_[7][i] "Se define el caudal total molar y masico de liquido en la corriente"
```

```
  Fx_[i] = F_[1][i] + F_[2][i] + F_[6][i] : Fmx_[i] = Fm_[1][i] + Fm_[2][i] + Fm_[6][i]
"Se define el caudal total molar y masico de solido en la corriente"
```

```
  DUPLICATE j=1;n_comp
```

```
  F_[j][i] + 0,000001 [mol/h] = F_[i] * Z_[j][i] : Fm_[j][i] + 0,000001 [kg/h] = Fm_[i] *
Zm_[j][i] "Se define el caudal total molar y masico de liquido en la corriente"
```

```
  END
```

END

"Composicion respecto a la fracción molar líquida (Zy) y solida (Zx), así como fracción masica líquida (Zmy) y solida (Zmx) de cada corriente"

```
DUPLICATE i=1;n_corr
```

```
"      MOLAR                      MASICA                      "
```

```
  Zy_[3][i] * Fy_[i] = F_[3][i] : Zmy_[7][i] * Fmy_[i] = Fm_[7][i]
```

```
  Zy_[4][i] * Fy_[i] = F_[4][i] : Zmy_[5][i] * Fmy_[i] = Fm_[5][i]
```

```
  Zy_[5][i] * Fy_[i] = F_[5][i] : Zmy_[4][i] * Fmy_[i] = Fm_[4][i]
```

```
  Zy_[7][i] * Fy_[i] = F_[7][i] : Zmy_[3][i] * Fmy_[i] = Fm_[3][i]
```

```
  Zx_[1][i] * Fx_[i] = F_[1][i] : Zmx_[6][i] * Fmx_[i] = Fm_[6][i]
```

```
  Zx_[2][i] * Fx_[i] = F_[2][i] : Zmx_[2][i] * Fmx_[i] = Fm_[2][i]
```

```
  Zx_[6][i] * Fx_[i] = F_[6][i] : Zmx_[1][i] * Fmx_[i] = Fm_[1][i]
```

END

"Definimos la composicion de cada corriente y caudal total en los filtros Pan"

```
DUPLICATE i=1;4
```

```
"      MOLAR                      MASICA                      "
```

```
  D_[i] = sum(D_[n][i];n=1;n_comp) : Dm_[i] = sum(Dm_[n][i];n=1;n_comp) "Se define el
caudal total molar y masico"
```

```
  Dy_[i] = D_[3][i] + D_[4][i] + D_[5][i] + D_[7][i] : Dmy_[i] = Dm_[3][i] + Dm_[4][i] +
Dm_[5][i] + Dm_[7][i] "Se define el caudal total molar y masico de liquido en la corriente"
```

```
  Dx_[i] = D_[1][i] + D_[2][i] + D_[6][i] : Dmx_[i] = Dm_[1][i] + Dm_[2][i] +
Dm_[6][i] "Se define el caudal total molar y masico de solido en la corriente"
```

```

DUPLICATE j=1;n_comp
D_[j][i] + 0,000001 [kg/h] = D_[i] * U_[j][i] : Dm_[j][i] + 0,000001 [kg/h] = Dm_[i] *
Um_[j][i] "Se define el caudal total molar y masico de liquido en la corriente"
END
END

```

"Composicion respecto a fracción líquida (Uy) y solida (Ux) de cada corriente en los filtros Pan"

```

DUPLICATE i=1;4
Uy_[3][i] * Dy_[i] = D_[3][i] : Umy_[3][i] * Dmy_[i] = Dm_[3][i]
Uy_[4][i] * Dy_[i] = D_[4][i] : Umy_[4][i] * Dmy_[i] = Dm_[4][i]
Uy_[5][i] * Dy_[i] = D_[5][i] : Umy_[5][i] * Dmy_[i] = Dm_[5][i]
Uy_[7][i] * Dy_[i] = D_[7][i] : Umy_[7][i] * Dmy_[i] = Dm_[7][i]

Ux_[1][i] * Dx_[i] = D_[1][i] : Umx_[1][i] * Dmx_[i] = Dm_[1][i]
Ux_[2][i] * Dx_[i] = D_[2][i] : Umx_[2][i] * Dmx_[i] = Dm_[2][i]
Ux_[6][i] * Dx_[i] = D_[6][i] : Umx_[6][i] * Dmx_[i] = Dm_[6][i]
END

```

"Definimos las corrientes de entrada"

"Linea 1, AC. SULFURICO"

```

F_[1][1] = 0 [mol/h]
F_[2][1] = 0 [mol/h]
"F_[3][1] = " : Zmy_[3][6] = 0,018 [-]
F_[4][1] = 0 [mol/h]
F_[5][1] = F_[5] * 0,04
F_[6][1] = 0 [mol/h]
F_[7][1] = 0 [mol/h]

```

"Linea 2, ROCA FOSFÓRICA"

F\_[4][13] = 100000/24/PM\_[4] "Se fija la producción de ácido fosforico"

```

"F_[1][2] = [mol/h]"
F_[2][2] = F_[2] * 0,05
F_[3][2] = 0 [mol/h]
F_[4][2] = 0 [mol/h]
"F_[5][2] = [mol/h]"
F_[5][2] = 0 * 0,5 * (F_[1][2] * PM_[1] + F_[2][2] * PM_[2]) / PM_[5]
F_[6][2] = 0 [mol/h]
F_[7][2] = 0 [mol/h]

```

"Linea 25 AGUA PAN FILTERS"

```

F_[1][25] = 0 [mol/h]
F_[2][25] = 0 [mol/h]
F_[3][25] = 0 [mol/h]
F_[4][25] = 0 [mol/h]
"F_[5][25] = [mol/h]"
F_[6][25] = 0 [mol/h]
F_[7][25] = 0 [mol/h]

```

"Linea 26, AGUA SCRUBBER"

F\_[1][26] = 0 [mol/h]  
F\_[2][26] = 0 [mol/h]  
F\_[3][26] = 0 [mol/h]  
F\_[4][26] = 0 [mol/h]  
F\_[5][26] = F\_[7] \* 3  
F\_[6][26] = 0 [mol/h]  
F\_[7][26] = 0 [mol/h]

"Linea 30 SALIDA YESO"

Zm\_[5][30] = 0,7

\$Bookmark 02 BM MOLINO

DUPLICATE j=1;n\_comp  
    F\_[j][3] = F\_[j][2] + F\_[j][5]  
END

\$Bookmark 03 BM TAMIZ

C\_rechazo = 0,7

DUPLICATE j=1;n\_comp  
    F\_[j][4] + F\_[j][5] = F\_[j][3]  
    F\_[j][5] = C\_rechazo \* F\_[j][3]  
END

X\_react\_[1] = 0,6 [-]  
X\_react\_[2] = 0,6 [-]

DUPLICATE j=1;n\_comp  
    Alimentación\_reactor\_[j] = F\_[j][1] + F\_[j][4] + F\_[j][14] + F\_[j][17] + A\_[j]  
END

F\_[1][6] = Alimentación\_reactor\_[1] - 1 \* X\_react\_[1] \* Alimentación\_reactor\_[1] - 0 \*  
X\_react\_[2] \* Alimentación\_reactor\_[2]  
F\_[2][6] = Alimentación\_reactor\_[2] - 0 \* X\_react\_[1] \* Alimentación\_reactor\_[1] - 1 \*  
X\_react\_[2] \* Alimentación\_reactor\_[2]  
F\_[3][6] = Alimentación\_reactor\_[3] - 3 \* X\_react\_[1] \* Alimentación\_reactor\_[1] - 1 \*  
X\_react\_[2] \* Alimentación\_reactor\_[2]  
F\_[4][6] = Alimentación\_reactor\_[4] + 2 \* X\_react\_[1] \* Alimentación\_reactor\_[1] - 0 \*  
X\_react\_[2] \* Alimentación\_reactor\_[2]  
F\_[5][6] = Alimentación\_reactor\_[5] - 6 \* X\_react\_[1] \* Alimentación\_reactor\_[1] - 2 \*  
X\_react\_[2] \* Alimentación\_reactor\_[2]  
F\_[6][6] = Alimentación\_reactor\_[6] + 3 \* X\_react\_[1] \* Alimentación\_reactor\_[1] + 1 \*  
X\_react\_[2] \* Alimentación\_reactor\_[2]  
F\_[7][6] = 0 [mol/h]

F\_[1][7] = 0 [mol/h]  
F\_[2][7] = 0 [mol/h]  
F\_[3][7] = 0 [mol/h]  
F\_[4][7] = 0 [mol/h]

$F_{[5][7]} = 0$  [mol/h]  
 $F_{[6][7]} = 0$  [mol/h]  
 $F_{[7][7]} = \text{Alimentación\_reactor}_{[7]} - 0 * X_{\text{react}}_{[1]} * \text{Alimentación\_reactor}_{[1]} + 2 * X_{\text{react}}_{[2]} * \text{Alimentación\_reactor}_{[2]}$

$A_{[1]} = 0$  [mol/h]  
 $A_{[2]} = 0$  [mol/h]  
 $A_{[3]} = 0$  [mol/h]  
 $A_{[4]} = 0$  [mol/h]  
**"A<sub>[5]</sub> = 0 [mol/h]"** :  $Z_{\text{my}}_{[4][6]} = 0,39$  [-] **"28,2% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>"**  
 $A_{[6]} = 0$  [mol/h]  
 $A_{[7]} = 0$  [mol/h]

### \$Bookmark 05 BM BOMBA 6/8

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][8]} = F_{[j][6]}$   
END

### \$Bookmark 06 BM FILTROS PAN

rendimiento\_pan = 0,96 [-] **"Cantidad de ac. fosfórico recuperado"**

rendimiento\_pan =  $(D_{[4][1]} - D_{[4][4]}) / D_{[4][1]}$

#### "Filtro 1"

ratio\_LS = 1 [-] **"1 mol se mezcla liquida por cada mol de solido"**  
perdidas\_[1] = 0,01 [-] **"Porcentaje de solidos que atraviesa el filtro 1"**

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][9]} + D_{[j][1]} = F_{[j][8]}$   
END

$D_{[1][1]} = F_{x_{[8]}} * (1 - \text{perdidas}_{[1]}) * Z_{x_{[1]}}_{[8]}$   
 $D_{[2][1]} = F_{x_{[8]}} * (1 - \text{perdidas}_{[1]}) * Z_{x_{[2]}}_{[8]}$   
 $D_{[3][1]} = F_{x_{[8]}} * (1 - \text{perdidas}_{[1]}) * Z_{y_{[3]}}_{[8]} * \text{ratio\_LS}$   
 $D_{[4][1]} = F_{x_{[8]}} * (1 - \text{perdidas}_{[1]}) * Z_{y_{[4]}}_{[8]} * \text{ratio\_LS}$   
 $D_{[5][1]} = F_{x_{[8]}} * (1 - \text{perdidas}_{[1]}) * Z_{y_{[5]}}_{[8]} * \text{ratio\_LS}$   
 $D_{[6][1]} = F_{x_{[8]}} * (1 - \text{perdidas}_{[1]}) * Z_{x_{[6]}}_{[8]}$   
 $D_{[7][1]} = F_{x_{[8]}} * (1 - \text{perdidas}_{[1]}) * Z_{y_{[7]}}_{[8]} * \text{ratio\_LS}$

#### "Filtro 2"

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][15]} + D_{[j][2]} = F_{[j][19]} + D_{[j][1]}$   
END

$D_{[1][2]} = (D_{x_{[1]}} + F_{x_{[19]}}) * (D_{[1][1]} + F_{[1][19]}) / (D_{x_{[1]}} + F_{x_{[19]}})$   
 $D_{[2][2]} = (D_{x_{[1]}} + F_{x_{[19]}}) * (D_{[2][1]} + F_{[2][19]}) / (D_{x_{[1]}} + F_{x_{[19]}})$   
 $D_{[3][2]} = (D_{x_{[1]}} + F_{x_{[19]}}) * (D_{[3][1]} + F_{[3][19]}) / (D_{y_{[1]}} + F_{y_{[19]}}) * \text{ratio\_LS}$   
 $D_{[4][2]} = (D_{x_{[1]}} + F_{x_{[19]}}) * (D_{[4][1]} + F_{[4][19]}) / (D_{y_{[1]}} + F_{y_{[19]}}) * \text{ratio\_LS}$   
 $D_{[5][2]} = (D_{x_{[1]}} + F_{x_{[19]}}) * (D_{[5][1]} + F_{[5][19]}) / (D_{y_{[1]}} + F_{y_{[19]}}) * \text{ratio\_LS}$

$D_{[6][2]} = (Dx_{[1]} + Fx_{[19]}) * (D_{[6][1]} + F_{[6][19]}) / (Dx_{[1]} + Fx_{[19]})$   
 $D_{[7][2]} = (Dx_{[1]} + Fx_{[19]}) * (D_{[7][1]} + F_{[7][19]}) / (Dy_{[1]} + Fy_{[19]}) * ratio\_LS$

"Filtro 3"

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][18]} + D_{[j][3]} = F_{[j][21]} + D_{[j][2]}$   
 END

$D_{[1][3]} = (Dx_{[2]} + Fx_{[21]}) * (D_{[1][2]} + F_{[1][21]}) / (Dx_{[2]} + Fx_{[21]})$   
 $D_{[2][3]} = (Dx_{[2]} + Fx_{[21]}) * (D_{[2][2]} + F_{[2][21]}) / (Dx_{[2]} + Fx_{[21]})$   
 $D_{[3][3]} = (Dx_{[2]} + Fx_{[21]}) * (D_{[3][2]} + F_{[3][21]}) / (Dy_{[2]} + Fy_{[21]}) * ratio\_LS$   
 $D_{[4][3]} = (Dx_{[2]} + Fx_{[21]}) * (D_{[4][2]} + F_{[4][21]}) / (Dy_{[2]} + Fy_{[21]}) * ratio\_LS$   
 $D_{[5][3]} = (Dx_{[2]} + Fx_{[21]}) * (D_{[5][2]} + F_{[5][21]}) / (Dy_{[2]} + Fy_{[21]}) * ratio\_LS$   
 $D_{[6][3]} = (Dx_{[2]} + Fx_{[21]}) * (D_{[6][2]} + F_{[6][21]}) / (Dx_{[2]} + Fx_{[21]})$   
 $D_{[7][3]} = (Dx_{[2]} + Fx_{[21]}) * (D_{[7][2]} + F_{[7][21]}) / (Dy_{[2]} + Fy_{[21]}) * ratio\_LS$

"Filtro 4"

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][20]} + D_{[j][4]} = F_{[j][23]} + D_{[j][3]}$   
 END

$D_{[1][4]} = (Dx_{[3]} + Fx_{[23]}) * (D_{[1][3]} + F_{[1][23]}) / (Dx_{[3]} + Fx_{[23]})$   
 $D_{[2][4]} = (Dx_{[3]} + Fx_{[23]}) * (D_{[2][3]} + F_{[2][23]}) / (Dx_{[3]} + Fx_{[23]})$   
 $D_{[3][4]} = (Dx_{[3]} + Fx_{[23]}) * (D_{[3][3]} + F_{[3][23]}) / (Dy_{[3]} + Fy_{[23]}) * ratio\_LS$   
 $D_{[4][4]} = (Dx_{[3]} + Fx_{[23]}) * (D_{[4][3]} + F_{[4][23]}) / (Dy_{[3]} + Fy_{[23]}) * ratio\_LS$   
 $D_{[5][4]} = (Dx_{[3]} + Fx_{[23]}) * (D_{[5][3]} + F_{[5][23]}) / (Dy_{[3]} + Fy_{[23]}) * ratio\_LS$   
 $D_{[6][4]} = (Dx_{[3]} + Fx_{[23]}) * (D_{[6][3]} + F_{[6][23]}) / (Dx_{[3]} + Fx_{[23]})$   
 $D_{[7][4]} = (Dx_{[3]} + Fx_{[23]}) * (D_{[7][3]} + F_{[7][23]}) / (Dy_{[3]} + Fy_{[23]}) * ratio\_LS$

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][22]} = D_{[j][4]} + F_{[j][24]}$   
 $F_{[j][29]} = F_{[j][28]} + F_{[j][22]}$   
 END

\$Bookmark 07 BM BOMBA 9/10

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][10]} = F_{[j][9]}$   
 END

\$Bookmark 08 BM DIVISOR 10/11/12

$R\_PURGA\_DIV = 1 [-]$   
 DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][11]} + F_{[j][12]} = F_{[j][10]}$   
 $F_{[j][11]} = R\_PURGA\_DIV * F_{[j][10]}$   
 END

\$Bookmark 09 BM MEZCLADOR 12/15/16

DUPLICATE j=1;n\_comp  
 $F_{[j][16]} = F_{[j][12]} + F_{[j][15]}$   
 END

**\$Bookmark 10 BM BOMBA 16/17**

DUPLICATE j=1;n\_comp  
     $F_{[j]}[17] = F_{[j]}[16]$   
END

**\$Bookmark 11 BM BOMBA 18/19**

DUPLICATE j=1;n\_comp  
     $F_{[j]}[19] = F_{[j]}[18]$   
END

**\$Bookmark 12 BM DIVISOR 23/24/25**

DUPLICATE j=1;n\_comp  
     $F_{[j]}[23] + F_{[j]}[24] = F_{[j]}[25]$   
END

$F_{[1]}[23] = 0$  [mol/h]  
 $F_{[2]}[23] = 0$  [mol/h]  
 $F_{[3]}[23] = 0$  [mol/h]  
 $F_{[4]}[23] = 0$  [mol/h]  
" $F_{[5]}[23] = 0$  [mol/h]" "Se calcula fijando el rendimiento en los filtros pan"  
 $F_{[6]}[23] = 0$  [mol/h]  
 $F_{[7]}[23] = 0$  [mol/h]

**\$Bookmark 13 BM BOMBA 20/21**

DUPLICATE j=1;n\_comp  
     $F_{[j]}[21] = F_{[j]}[20]$   
END

**\$Bookmark 14 BM DECANTADOR**

eficiencia\_decantador = 0,8 [-]

DUPLICATE j=1;n\_comp  
     $Fm_{[j]}[14] + Fm_{[j]}[13] = Fm_{[j]}[11]$   
END

$Fm_{[1]}[14] = eficiencia\_decantador * Fm_{[1]}[11]$   
 $Fm_{[2]}[14] = eficiencia\_decantador * Fm_{[2]}[11]$   
" $Fm_{[3]}[14] = "$   
" $Fm_{[4]}[14] = "$   
" $Fm_{[5]}[14] = "$   
 $Fm_{[6]}[14] = eficiencia\_decantador * Fm_{[6]}[11]$   
" $Fm_{[7]}[14] = "$

$Fmy_{[14]}/Fm_{[14]}=0,6$

$Fm_{[3]}[14] = Zmy_{[3]}[11] * Fmy_{[14]}$   
 $Fm_{[4]}[14] = Zmy_{[4]}[11] * Fmy_{[14]}$   
 $Fm_{[5]}[14] = Zmy_{[5]}[11] * Fmy_{[14]}$   
" $Fm_{[7]}[14] = Zmy_{[7]}[11] * Fmy_{[14]}$ "

**\$Bookmark 15 BM SCRUBBER**

R\_CAPTURA\_SCRUBBER = 0,95 [-]

```

DUPLICATE j=1;n_comp
      F_[j][27] + F_[j][28] = F_[j][7] + F_[j][26]
END

```

```

F_[1][27] = 0 [mol/h]
F_[2][27] = 0 [mol/h]
F_[3][27] = 0 [mol/h]
F_[4][27] = 0 [mol/h]
F_[5][27] = 0 [mol/h]
F_[6][27] = 0 [mol/h]
F_[7][27] = (1-R_CAPTURE_SCRUBBER) * F_[7][7]

```

#### \$Bookmark 16 BM TANQUE DE YESO

```

DUPLICATE j=1;n_comp
      F_[j][30] = F_[j][29]
END

```

#### \$Bookmark 17 BM EVAPORADOR

```

DUPLICATE j=1;n_comp
      F_[j][31] + F_[j][32] = F_[j][13]
END

```

```

Zm_[1][31] = 0
Zm_[2][31] = 0
Zm_[3][31] = 0
Zm_[4][31] = 0
"Zm_[5][31] = "
Zm_[6][31] = 0
Zm_[7][31] = 0

```

```

"Zm_[1][32] = "
"Zm_[2][32] = "
"Zm_[3][32] = "
Zm_[4][32] = 0,75
"Zm_[5][32] = "
"Zm_[6][32] = "
"Zm_[7][32] = "

```

#### \$Bookmark 18 //////////////////////////////////////BALACE DE ENERGIA////////////////////////////////////

#### \$Bookmark 19 BE CORRIENTES DE ENTRADA / TEMPPERATURAS / PRESIONES / ENTALPIAS

```

T_ref = 298,15 [K]
T_[1] = (25 + 273,15) [K]
T_[2] = (25 + 273,15) [K]
T_[3] = (25 + 273,15) [K]
T_[4] = T_[3]
T_[5] = T_[3]
"T_[6] = [K]" "Se calcula en el reactor"
T_[6] = (90 + 273) [K]
T_[7] = T_[6]
T_[8] = T_[6]
T_[9] = T_[8]
T_[10] = T_[9]
T_[11] = T_[10]

```

$T_{[12]} = T_{[10]}$   
 $T_{[13]} = T_{[11]}$   
 $T_{[14]} = T_{[11]}$   
 $T_{[15]} = [K]$  "Calculada en los FILTROS PAN"  
 $T_{[16]} = [K]$  " Calculada en MEZCLADOR 12/15/16"  
 $T_{[17]} = T_{[16]}$   
 $T_{[18]} = [K]$  "Calculada en los FILTROS PAN"  
 $T_{[19]} = T_{[18]}$   
 $T_{[20]} = [K]$  "Calculada en los FILTROS PAN"  
 $T_{[21]} = T_{[20]}$   
 $T_{[22]} = [K]$  "Calculada en los FILTROS PAN"  
 $T_{[23]} = T_{[25]}$   
 $T_{[24]} = T_{[25]}$   
 $T_{[25]} = (25 + 273,15) [K]$   
 $T_{[26]} = (25 + 273,15) [K]$   
 $T_{[27]} = (25 + 273,15) [K]$   
 $T_{[28]} = (25 + 273,15) [K]$   
 $T_{[29]} = [K]$   
 $T_{[30]} = T_{[29]}$   
 $T_{[31]} = (134,4 + 273,15) [K]$   
 $T_{[32]} = T_{[31]}$

$TD_{[1]} = T_{[9]}$   
 $TD_{[2]} = T_{[15]}$   
 $TD_{[3]} = T_{[18]}$   
 $TD_{[4]} = T_{[20]}$

DUPLICATE i=1;n\_corr  
 $Tc_{[i]} = T_{[i]}/1000$   
 END

$P_{ref} = 1,01325 [bar]$   
 $P_{[1]} = 1 [bar]$   
 $P_{[2]} = 1 [bar]$   
 $P_{[3]} = 1 [bar]$   
 $P_{[4]} = 1 [bar]$   
 $P_{[5]} = 1 [bar]$   
 $P_{[6]} = 1 [bar]$   
 $P_{[7]} = 1 [bar]$   
 $P_{[8]} = 1 [bar]$   
 $P_{[9]} = 1 [bar]$   
 $P_{[10]} = 1 [bar]$   
 $P_{[11]} = 1 [bar]$   
 $P_{[12]} = 1 [bar]$   
 $P_{[13]} = 1 [bar]$   
 $P_{[14]} = 1 [bar]$   
 $P_{[15]} = 1 [bar]$   
 $P_{[16]} = 1 [bar]$   
 $P_{[17]} = 1 [bar]$   
 $P_{[18]} = 1 [bar]$   
 $P_{[19]} = 1 [bar]$   
 $P_{[20]} = 1 [bar]$   
 $P_{[21]} = 1 [bar]$   
 $P_{[22]} = 1 [bar]$   
 $P_{[23]} = 1 [bar]$

P\_[24] = 1 [bar]  
P\_[25] = 1 [bar]  
P\_[26] = 1 [bar]  
P\_[27] = 1 [bar]  
P\_[28] = 1 [bar]  
P\_[29] = 1 [bar]  
P\_[30] = 1 [bar]  
P\_[31] = 1 [bar]  
P\_[32] = 1 [bar]

PD\_[1] = 1 [bar]  
PD\_[2] = 1 [bar]  
PD\_[3] = 1 [bar]  
PD\_[4] = 1 [bar]

"Entalpias de formacion estandar a la misma ref (Tablas termoquimicas)"

h\_formacion\_[1] = -4121 [kJ/mol]  
h\_formacion\_[2] = -1228 [kJ/mol]  
h\_formacion\_[3] = -814 [kJ/mol]  
h\_formacion\_[4] = -1272 [kJ/mol]  
h\_formacion\_[5] = -285,8 [kJ/mol]  
h\_formacion\_[6] = -2006,6 [kJ/mol]  
h\_formacion\_[7] = -273 [kJ/mol]

HREACCION\_[1] = 286 [kJ/mol]  
HREACCION\_[2] = -61 [kJ/mol]

DUPLICATE i=1;n\_corr

h\_[1][i] = ( 16,9847 [kJ / mol\*K] \* Tc\_[i] + 510,2795 [kJ / mol\*K2] \* Tc\_[i]^2 - 345,4655 [kJ / mol\*K3] \* Tc\_[i]^3 - 0,4137 [kJ / mol\*K4] \* Tc\_[i]^4 - 0,0027 [kJ \* K / mol] / Tc\_[i] - 41,2559 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_[1]  
h\_[2][i] = ( 89,8840 [kJ / mol\*K] \* Tc\_[i] - 23,0601 [kJ / mol\*K2] \* Tc\_[i]^2 + 21,7593 [kJ / mol\*K3] \* Tc\_[i]^3 - 4,4656 [kJ / mol\*K4] \* Tc\_[i]^4 + 1,1394 [kJ \* K / mol] / Tc\_[i] - 29,0960 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_[2]  
h\_[3][i] = ( 47,2892 [kJ / mol\*K] \* Tc\_[i] + 95,1657 [kJ / mol\*K2] \* Tc\_[i]^2 - 49,3766 [kJ / mol\*K3] \* Tc\_[i]^3 + 10,9665 [kJ / mol\*K4] \* Tc\_[i]^4 + 0,7400 [kJ \* K / mol] / Tc\_[i] - 23,8189 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_[3]  
h\_[4][i] = ( 55,2095 [kJ / mol\*K] \* Tc\_[i] + 150,6602 [kJ / mol\*K2] \* Tc\_[i]^2 - 0,0317 [kJ / mol\*K3] \* Tc\_[i]^3 + 0,0105 [kJ / mol\*K4] \* Tc\_[i]^4 - 0,0005 [kJ \* K / mol] / Tc\_[i] - 29,8510 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_[4]  
h\_[5][i] = ( Enthalpy(Water;T=T\_[i];P=P\_[i]) - Enthalpy(Water;T=T\_ref;P=P\_ref) ) \* 0,001 [kmol/mol] + h\_formacion\_[5]  
h\_[6][i] = ( 10,4485 [kJ / mol\*K] \* Tc\_[i] + 416,1466 [kJ / mol\*K2] \* Tc\_[i]^2 - 264,6916 [kJ / mol\*K3] \* Tc\_[i]^3 - 0,3845 [kJ / mol\*K4] \* Tc\_[i]^4 + 0,0587 [kJ \* K / mol] / Tc\_[i] - 33,2865 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_[6]  
h\_[7][i] = ( 30,1169 [kJ / mol\*K] \* Tc\_[i] - 1,6233 [kJ / mol\*K2] \* Tc\_[i]^2 + 0,9560 [kJ / mol\*K3] \* Tc\_[i]^3 + 0,1144 [kJ / mol\*K4] \* Tc\_[i]^4 + 0,0248 [kJ \* K / mol] / Tc\_[i] - 8,9447 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_[7]

DELTAH\_[i] = sum(F\_[j][i]\*h\_[j][i];j=1;7)  
END

DUPLICATE i=1;4

$$TcD\_i = TD\_i/1000$$

$$hD\_1[i] = ( 16,9847 [kJ / mol*K] * TcD\_i + 510,2795 [kJ / mol*K2] * TcD\_i^2 - 345,4655 [kJ / mol*K3] * TcD\_i^3 - 0,4137 [kJ / mol*K4] * TcD\_i^4 - 0,0027 [kJ * K/ mol] / TcD\_i - 41,2559 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_1$$

$$hD\_2[i] = ( 89,8840 [kJ / mol*K] * TcD\_i - 23,0601 [kJ / mol*K2] * TcD\_i^2 + 21,7593 [kJ / mol*K3] * TcD\_i^3 - 4,4656 [kJ / mol*K4] * TcD\_i^4 + 1,1394 [kJ * K/ mol] / TcD\_i - 29,0960 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_2$$

$$hD\_3[i] = ( 47,2892 [kJ / mol*K] * TcD\_i + 95,1657 [kJ / mol*K2] * TcD\_i^2 - 49,3766 [kJ / mol*K3] * TcD\_i^3 + 10,9665 [kJ / mol*K4] * TcD\_i^4 + 0,7400 [kJ * K/ mol] / TcD\_i - 23,8189 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_3$$

$$hD\_4[i] = ( 55,2095 [kJ / mol*K] * TcD\_i + 150,6602 [kJ / mol*K2] * TcD\_i^2 - 0,0317 [kJ / mol*K3] * TcD\_i^3 + 0,0105 [kJ / mol*K4] * TcD\_i^4 - 0,0005 [kJ * K/ mol] / TcD\_i - 29,8510 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_4$$

$$hD\_5[i] = ( Enthalpy(Water;T=TD\_i;P=PD\_i) -$$

$$Enthalpy(Water;T=T\_ref;P=P\_ref) ) * 0,001 [kmol/mol] + h\_formacion\_5$$

$$hD\_6[i] = ( 10,4485 [kJ / mol*K] * TcD\_i + 416,1466 [kJ / mol*K2] * TcD\_i^2 - 264,6916 [kJ / mol*K3] * TcD\_i^3 - 0,3845 [kJ / mol*K4] * TcD\_i^4 + 0,0587 [kJ * K/ mol] / TcD\_i - 33,2865 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_6$$

$$hD\_7[i] = ( 30,1169 [kJ / mol*K] * TcD\_i - 1,6233 [kJ / mol*K2] * TcD\_i^2 + 0,9560 [kJ / mol*K3] * TcD\_i^3 + 0,1144 [kJ / mol*K4] * TcD\_i^4 + 0,0248 [kJ * K/ mol] / TcD\_i - 8,9447 [kJ / mol] ) + h\_formacion\_7$$

$$DELTAHD\_i = \text{sum}(D\_j[i]*hD\_j[i];j=1;7)$$

END

### \$Bookmark 20 MOLINO

D|S\_80 = 0,25 [mm] "Tamaño de salida D\_80 en la molienda"

D|E\_80 = 10 [mm] "Tamaño de entrada D\_80 en la molienda"

W\_i = 9,92 "Índice de trabajo"

$$\text{Alimentacion\_tritadora} = \text{sum}( (F\_j[2] + F\_j[5]) * PM\_j; j=1;2) / 1000 [kg/t]$$

$$W\_TRITURADORA = \text{Alimentacion\_tritadora} * W\_i * \text{sqrt}(0,1) * (1/\text{sqrt}(D|S\_80) - 1/\text{sqrt}(D|E\_80))$$

### \$Bookmark 22 BE REACTOR

$$\text{DELTAH}\_6 + \text{DELTAH}\_7 = \text{DELTAH}\_1 + \text{DELTAH}\_4 + \text{DELTAH}\_14 + \text{DELTAH}\_17 + Q\_REACTOR * 3600 [s/h]$$

### \$Bookmark 24 BE FILTROS PAN

$$\text{DELTAH}\_15 + \text{DELTAHD}\_2 = \text{DELTAH}\_19 + \text{DELTAHD}\_1$$

$$\text{DELTAH}\_18 + \text{DELTAHD}\_3 = \text{DELTAH}\_21 + \text{DELTAHD}\_2$$

$$\text{DELTAH}\_20 + \text{DELTAHD}\_4 = \text{DELTAH}\_23 + \text{DELTAHD}\_3$$

$$\text{DELTAH}\_22 = \text{DELTAH}\_24 + \text{DELTAHD}\_4$$

$$\text{DELTAH}\_29 = \text{DELTAH}\_22 + \text{DELTAH}\_28$$

### \$Bookmark 27 BE MEZCLADOR 12/15/16

$$\text{DELTAH}\_16 = \text{DELTAH}\_12 + \text{DELTAH}\_15$$

### \$Bookmark 34 BE TANQUE DE YESO

$$\text{DELTAH}\_13 + Q\_EVAPORADOR * 3600 [s/h] = \text{DELTAH}\_31 + \text{DELTAH}\_32$$



## Anexo 2. Resultados de la simulación

En la Tabla 11 se recogen los todos los caudales totales y temperaturas calculas durante la simulación.

Las variables recogidas en esta tabla son:

- $F_i$  representa el caudal total molar en la corriente  $i$ , en mol/h.

- $F_{x_i}$  representa el caudal molar total de la componente solida en la corriente  $i$ , en mol/h.

- $F_{y_i}$  representa el caudal molar total de la componente líquida en la corriente  $i$ , en mol/h.

- $F_{m_i}$  representa el caudal másico total en la corriente  $i$ , en kg/h.

- $F_{m_{y_i}}$  representa el caudal másico total de la componente solida en la corriente  $i$ , en kg/h.

- $F_{m_{x_i}}$  representa el caudal másico total de la componente líquida en la corriente  $i$ , en kg/h.

- $T_i$  representa la temperatura de la corriente  $i$ , en K.

- $T_{c_i}$  representa la temperatura de la corriente  $i$ , corregida según la ecuación (7), en K.

Tabla 11. Caudales totales y temperaturas.

Corriente	$F_i$ [mol/h]	$F_{x_i}$ [mol/h]	$F_{y_i}$ [mol/h]	$F_{m_i}$ [kg/h]	$F_{m_{x_i}}$ [kg/h]	$F_{m_{y_i}}$ [kg/h]	$T_i$ [K]	$T_{c_i}$ [-]
1	-	70864	6670	-	6670	298,2	0,298	-
2	37461	-	11188	11188	-	298,2	0,298	37461
3	124869	-	37292	37292	-	298,2	0,298	124869
4	37461	-	11188	11188	-	298,2	0,298	37461
5	87408	-	26105	26105	-	298,2	0,298	87408
6	80951	482700	28874	15836	13039	363	0,363	80951
7	-	2255	45,12	-	45,12	363	0,363	-
8	80951	482700	28874	15836	13039	363	0,363	80951
9	809,5	402559	11032	158,4	10874	363	0,363	809,5
10	809,5	402559	11032	158,4	10874	363	0,363	809,5
11	809,5	402559	11032	158,4	10874	363	0,363	809,5
12	-	-	-	-	-	-	-	-
13	161,9	395524	10715	31,67	10684	363	0,363	161,9
14	647,6	7035	316,7	126,7	190	363	0,363	647,6
15	-	199132	4280	-	4280	355,4	0,355	-
16	-	199132	4280	-	4280	355,4	0,355	-
17	-	199132	4280	-	4280	355,4	0,355	-

Corriente	F <sub>i</sub> [mol/h]	F <sub>x<sub>i</sub></sub> [mol/h]	F <sub>y<sub>i</sub></sub> [mol/h]	F <sub>m<sub>i</sub></sub> [kg/h]	F <sub>m<sub>x<sub>i</sub></sub></sub> [kg/h]	F <sub>m<sub>y<sub>i</sub></sub></sub> [kg/h]	T <sub>i</sub> [K]	T <sub>c<sub>i</sub></sub> [-]
18	-	199132	3837	-	3837	343,6	0,344	-
19	-	199132	3837	-	3837	343,6	0,344	-
20	-	199132	3659	-	3659	325,5	0,326	-
21	-	199132	3659	-	3659	325,5	0,326	-
22	80141	2034000	52354	15677	36676	301,7	0,302	80141
23	-	199132	3588	-	3588	298,2	0,298	-
24	-	1954000	35204	-	35204	298,2	0,298	-
25	-	2153000	38791	-	38791	298,2	0,298	-
26	-	6765	121,9	-	121,9	298,2	0,298	-
27	-	112,7	2,256	-	2,256	298,2	0,298	-
28	-	8907	164,7	-	164,7	298,2	0,298	-
29	80141	2043000	52518	15677	36841	301,7	0,302	80141
30	80141	2043000	52518	15677	36841	301,7	0,302	80141
31	-	284647	5128	-	5128	407,6	0,408	-
32	-	110876	5556	-	5556	407,6	0,408	-
33	-	395524	10684	-	10684	363	0,363	-

En el resto de las tablas se muestran cada una de las variables antes presentas separadas por cada componente presente en las corrientes:

Tabla 12. Caudales molares por componentes [mol/h].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
F <sub>1</sub>	-	-	67368	-	3496	-	-
F <sub>2</sub>	35588	1873	-	-	-	-	-
F <sub>3</sub>	118626	6243	-	-	-	-	-
F <sub>4</sub>	35588	1873	-	-	-	-	-
F <sub>5</sub>	83038	4370	-	-	-	-	-
F <sub>6</sub>	14281	751,6	2393	51865	428442	65918	-
F <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	-	2255
F <sub>8</sub>	14281	751,6	2393	51865	428442	65918	-
F <sub>9</sub>	142,8	7,516	1996	43254	357309	659,2	-
F <sub>10</sub>	142,8	7,516	1996	43254	357309	659,2	-
F <sub>11</sub>	142,8	7,516	1996	43254	357309	659,2	-
F <sub>12</sub>	-	-	-	-	-	-	-
F <sub>13</sub>	28,56	1,503	1961	42498	351065	131,8	-
F <sub>14</sub>	114,2	6,013	34,88	755,9	6244	527,3	-
F <sub>15</sub>	-	-	381,4	8267	190485	-	-
F <sub>16</sub>	-	-	381,4	8267	190485	-	-
F <sub>17</sub>	-	-	381,4	8267	190485	-	-
F <sub>18</sub>	-	-	137,6	2982	196012	-	-
F <sub>19</sub>	-	-	137,6	2982	196012	-	-

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
F <sub>20</sub>	-	-	39,49	855,8	198237	-	-
F <sub>21</sub>	-	-	39,49	855,8	198237	-	-
F <sub>22</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	2034000	65259	-
F <sub>23</sub>	-	-	-	-	199132	-	-
F <sub>24</sub>	-	-	-	-	1954000	-	-
F <sub>25</sub>	-	-	-	-	2153000	-	-
F <sub>26</sub>	-	-	-	-	6765	-	-
F <sub>27</sub>	-	-	-	-	-	-	112,7
F <sub>28</sub>	-	-	-	-	6765	-	2142
F <sub>29</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	2041000	65259	2142
F <sub>30</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	2041000	65259	2142
F <sub>31</sub>	-	-	-	-	284647	-	-
F <sub>32</sub>	-	-	1961	42498	66418	-	-
F <sub>33</sub>	-	-	1961	42498	351065	-	-
D <sub>1</sub>	14138	744,1	397,3	8611	71133	65259	-
D <sub>2</sub>	14138	744,1	153,5	3327	76661	65259	-
D <sub>3</sub>	14138	744,1	55,38	1200	78886	65259	-
D <sub>4</sub>	14138	744,1	15,89	344,4	79781	65259	-

Tabla 13. Fracciones molares de cada corriente [m/m].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
Z <sub>1</sub>	-	-	0,951	-	0,049	-	-
Z <sub>2</sub>	0,95	0,05	-	-	-	-	-
Z <sub>3</sub>	0,95	0,05	-	-	-	-	-
Z <sub>4</sub>	0,95	0,05	-	-	-	-	-
Z <sub>5</sub>	0,95	0,05	-	-	-	-	-
Z <sub>6</sub>	0,025	0,001	0,004	0,092	0,76	0,117	-
Z <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	-	1
Z <sub>8</sub>	0,025	0,001	0,004	0,092	0,76	0,117	-
Z <sub>9</sub>	-	-	0,005	0,107	0,886	0,002	-
Z <sub>10</sub>	-	-	0,005	0,107	0,886	0,002	-
Z <sub>11</sub>	-	-	0,005	0,107	0,886	0,002	-
Z <sub>12</sub>	-	-	-	-	-	-	-
Z <sub>13</sub>	-	-	0,005	0,107	0,887	-	-

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
Z <sub>14</sub>	0,015	0,001	0,005	0,098	0,813	0,069	-
Z <sub>i;15</sub>	-	-	0,002	0,042	0,957	-	-
Z <sub>16</sub>	-	-	0,002	0,042	0,957	-	-
Z <sub>17</sub>	-	-	0,002	0,042	0,957	-	-
Z <sub>18</sub>	-	-	0,001	0,015	0,984	-	-
Z <sub>19</sub>	-	-	0,001	0,015	0,984	-	-
Z <sub>20</sub>	-	-	-	0,004	0,996	-	-
Z <sub>21</sub>	-	-	-	0,004	0,996	-	-
Z <sub>22</sub>	0,007	-	-	-	0,962	0,031	-
Z <sub>23</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Z <sub>24</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Z <sub>25</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Z <sub>26</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Z <sub>27</sub>	-	-	-	-	-	-	1
Z <sub>28</sub>	-	-	-	-	0,76	-	0,241
Z <sub>29</sub>	0,007	-	-	-	0,961	0,031	0,001
Z <sub>30</sub>	0,007	-	-	-	0,961	0,031	0,001
Z <sub>31</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Z <sub>32</sub>	-	-	0,018	0,383	0,599	-	-
Z <sub>33</sub>	-	-	0,005	0,107	0,888	-	-
U <sub>1</sub>	0,088	0,005	0,002	0,054	0,444	0,407	-
U <sub>2</sub>	0,088	0,005	0,001	0,021	0,478	0,407	-
U <sub>3</sub>	0,088	0,005	-	0,007	0,492	0,407	-
U <sub>4</sub>	0,088	0,005	-	0,002	0,498	0,407	-

Tabla 14. Fracciones molares de sólidos en la corriente [m/m].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
Zx <sub>1</sub>	-	-	-	-	-	-	-
Zx <sub>2</sub>	0,95	0,05	-	-	-	-	-
Zx <sub>3</sub>	0,95	0,05	-	-	-	-	-
Zx <sub>4</sub>	0,95	0,05	-	-	-	-	-

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
Zx <sub>5</sub>	0,95	0,05				-	
Zx <sub>6</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>7</sub>	-	-				-	
Zx <sub>8</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>9</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>10</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>11</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>12</sub>	-	-				-	
Zx <sub>13</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>14</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>15</sub>	0,082	0,021				0,897	
Zx <sub>16</sub>	0,082	0,021				0,897	
Zx <sub>17</sub>	0,082	0,021				0,897	
Zx <sub>18</sub>	0,206	0,123				0,672	
Zx <sub>19</sub>	0,238	0,143				0,78	
Zx <sub>20</sub>	0,07	0,094				0,835	
Zx <sub>21</sub>	0,089	0,126				1	
Zx <sub>22</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>23</sub>	-	-				-	
Zx <sub>24</sub>	-	-				-	
Zx <sub>25</sub>	-	-				-	
Zx <sub>26</sub>	-	-				-	
Zx <sub>27</sub>	-	-				-	
Zx <sub>28</sub>	-	-				-	
Zx <sub>29</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>30</sub>	0,176	0,009				0,814	
Zx <sub>31</sub>	0,148	0,586				0,266	
Zx <sub>32</sub>	0,148	0,586				0,266	
Zx <sub>33</sub>	-	-				-	
Ux <sub>1</sub>	0,176	0,009				0,814	
Ux <sub>2</sub>	0,176	0,009				0,814	
Ux <sub>3</sub>	0,176	0,009				0,814	
Ux <sub>4</sub>	0,176	0,009				0,814	

Tabla 15. Fracciones molares de líquidos en la corriente[m/m].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
Zy <sub>1</sub>			0,951	-	0,049		-
Zy <sub>2</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>3</sub>			-	0,052	0,949		-
Zy <sub>4</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>5</sub>			-	0,072	0,928		-
Zy <sub>6</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Zy <sub>7</sub>			-	-	-		1
Zy <sub>8</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Zy <sub>9</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Zy <sub>10</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Zy <sub>11</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Zy <sub>12</sub>			-	-	-		-
Zy <sub>13</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Zy <sub>14</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Zy <sub>15</sub>			0,002	0,042	0,957		-
Zy <sub>16</sub>			0,002	0,042	0,957		-
Zy <sub>17</sub>			0,002	0,042	0,957		-
Zy <sub>18</sub>			0,001	0,015	0,984		-
Zy <sub>19</sub>			0,001	0,015	0,984		-
Zy <sub>20</sub>			-	0,004	0,996		-
Zy <sub>21</sub>			-	0,004	0,996		-
Zy <sub>22</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>23</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>24</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>25</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>26</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>27</sub>			-	-	-		1
Zy <sub>28</sub>			-	-	0,76		0,241
Zy <sub>29</sub>			-	-	0,999		0,001
Zy <sub>30</sub>			-	-	0,999		0,001
Zy <sub>31</sub>			-	-	1		-
Zy <sub>32</sub>			0,018	0,383	0,599		-
Zy <sub>33</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Uy <sub>1</sub>			0,005	0,107	0,888		-
Uy <sub>2</sub>			0,002	0,042	0,957		-
Uy <sub>3</sub>			0,001	0,015	0,984		-
Uy <sub>4</sub>			-	0,004	0,996		-

Tabla 16. Caudales máxicos por componentes.

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{HF}$
Fm <sub>1</sub>	-	-	6607	-	62,99	-	-
Fm <sub>2</sub>	11041	146,6	-	-	-	-	-
Fm <sub>3</sub>	36804	488,7	-	-	-	-	-
Fm <sub>4</sub>	11041	146,6	-	-	-	-	-
Fm <sub>5</sub>	25763	342,1	-	-	-	-	-
Fm <sub>6</sub>	4431	58,83	234,7	5085	7719	11346	-
Fm <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	-	45,12
Fm <sub>8</sub>	4431	58,83	234,7	5085	7719	11346	-
Fm <sub>9</sub>	44,31	0,588	195,7	4241	6437	113,5	-
Fm <sub>10</sub>	44,31	0,588	195,7	4241	6437	113,5	-
Fm <sub>11</sub>	44,31	0,588	195,7	4241	6437	113,5	-
Fm <sub>12</sub>	-	-	-	-	-	-	-
Fm <sub>13</sub>	8,861	0,118	192,3	4167	6325	22,69	-
Fm <sub>14</sub>	35,44	0,471	3,421	74,11	112,5	90,77	-
Fm <sub>15</sub>	-	-	37,41	810,5	3432	-	-
Fm <sub>16</sub>	-	-	37,41	810,5	3432	-	-
Fm <sub>17</sub>	-	-	37,41	810,5	3432	-	-
Fm <sub>18</sub>	-	-	13,5	292,4	3531	-	-
Fm <sub>19</sub>	-	-	13,5	292,4	3531	-	-
Fm <sub>20</sub>	-	-	3,873	83,91	3571	-	-
Fm <sub>21</sub>	-	-	3,873	83,91	3571	-	-
Fm <sub>22</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	36641	11233	-
Fm <sub>23</sub>	-	-	-	-	3588	-	-
Fm <sub>24</sub>	-	-	-	-	35204	-	-
Fm <sub>25</sub>	-	-	-	-	38791	-	-
Fm <sub>26</sub>	-	-	-	-	121,9	-	-
Fm <sub>27</sub>	-	-	-	-	-	-	2,256
Fm <sub>28</sub>	-	-	-	-	121,9	-	42,86
Fm <sub>29</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	36763	11233	42,86
Fm <sub>30</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	36763	11233	42,86
Fm <sub>31</sub>	-	-	-	-	5128	-	-
Fm <sub>32</sub>	-	-	192,3	4167	1197	-	-
Fm <sub>33</sub>	-	-	192,3	4167	6325	-	-
Dm <sub>1</sub>	4386	58,24	38,97	844,3	1282	11233	-
Dm <sub>2</sub>	4386	58,24	15,05	326,2	1381	11233	-
Dm <sub>3</sub>	4386	58,24	5,431	117,7	1421	11233	-
Dm <sub>4</sub>	4386	58,24	1,559	33,77	1437	11233	-

Tabla 17. Fracciones másicas de cada corriente [p/p].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
Zm <sub>1</sub>	-	-	0,991	-	0,009	-	-
Zm <sub>2</sub>	0,987	0,013	-	-	-	-	-
Zm <sub>3</sub>	0,987	0,013	-	-	-	-	-
Zm <sub>4</sub>	0,987	0,013	-	-	-	-	-
Zm <sub>5</sub>	0,987	0,013	-	-	-	-	-
Zm <sub>6</sub>	0,153	0,002	0,008	0,176	0,267	0,393	-
Zm <sub>7</sub>	-	-	-	-	-	-	1
Zm <sub>8</sub>	0,153	0,002	0,008	0,176	0,267	0,393	-
Zm <sub>9</sub>	0,004	-	0,018	0,384	0,584	0,01	-
Zm <sub>10</sub>	0,004	-	0,018	0,384	0,584	0,01	-
Zm <sub>11</sub>	0,004	-	0,018	0,384	0,584	0,01	-
Zm <sub>12</sub>	-	-	-	-	-	-	-
Zm <sub>13</sub>	0,001	-	0,018	0,389	0,59	0,002	-
Zm <sub>14</sub>	0,112	0,001	0,011	0,234	0,355	0,287	-
Zm <sub>15</sub>	-	-	0,009	0,189	0,802	-	-
Zm <sub>16</sub>	-	-	0,009	0,189	0,802	-	-
Zm <sub>17</sub>	-	-	0,009	0,189	0,802	-	-
Zm <sub>18</sub>	-	-	0,004	0,076	0,92	-	-
Zm <sub>19</sub>	-	-	0,004	0,076	0,92	-	-
Zm <sub>20</sub>	-	-	0,001	0,023	0,976	-	-
Zm <sub>21</sub>	-	-	0,001	0,023	0,976	-	-
Zm <sub>22</sub>	0,084	0,001	-	0,001	0,7	0,215	-
Zm <sub>23</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Zm <sub>24</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Zm <sub>25</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Zm <sub>26</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Zm <sub>27</sub>	-	-	-	-	-	-	1
Zm <sub>28</sub>	-	-	-	-	0,74	-	0,26
Zm <sub>29</sub>	0,084	0,001	-	0,001	0,7	0,214	0,001
Zm <sub>30</sub>	0,084	0,001	-	0,001	0,7	0,214	0,001
Zm <sub>31</sub>	-	-	-	-	1	-	-
Zm <sub>32</sub>	-	-	0,035	0,75	0,215	-	-
Zm <sub>33</sub>	-	-	0,018	0,39	0,592	-	-
Um <sub>1</sub>	0,246	0,003	0,002	0,047	0,072	0,63	-
Um <sub>2</sub>	0,252	0,003	0,001	0,019	0,079	0,646	-
Um <sub>3</sub>	0,255	0,003	-	0,007	0,083	0,652	-
Um <sub>4</sub>	0,256	0,003	-	0,002	0,084	0,655	-

Tabla 18. Fracciones másicas de sólidos en la corriente [p/p].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{HF}$
Zmx <sub>1</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>2</sub>	0,987	0,013				-	
Zmx <sub>3</sub>	0,987	0,013				-	
Zmx <sub>4</sub>	0,987	0,013				-	
Zmx <sub>5</sub>	0,987	0,013				-	
Zmx <sub>6</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>7</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>8</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>9</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>10</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>11</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>12</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>13</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>14</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>15</sub>	0,14	0,009				0,851	
Zmx <sub>16</sub>	0,14	0,009				0,851	
Zmx <sub>17</sub>	0,14	0,009				0,851	
Zmx <sub>18</sub>	0,338	0,051				0,612	
Zmx <sub>19</sub>	0,337	0,051				0,612	
Zmx <sub>20</sub>	0,126	0,043				0,831	
Zmx <sub>21</sub>	0,128	0,046				0,826	
Zmx <sub>22</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>23</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>24</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>25</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>26</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>27</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>28</sub>	-	-				-	
Zmx <sub>29</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>30</sub>	0,28	0,004				0,717	
Zmx <sub>31</sub>	0,333	0,333				0,333	
Zmx <sub>32</sub>	0,333	0,333				0,333	
Zmx <sub>33</sub>	-	-				-	
Umx <sub>1</sub>	0,28	0,004				0,717	
Umx <sub>2</sub>	0,28	0,004				0,717	
Umx <sub>3</sub>	0,28	0,004				0,717	
Umx <sub>4</sub>	0,28	0,004				0,717	

Tabla 19. Fracciones másicas de líquidos en la corriente [p/p].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub>	CaF <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> O	CaSO <sub>4</sub> (s)·2H <sub>2</sub> O	HF
Zmy <sub>1</sub>			0,991	-	0,009		-
Zmy <sub>2</sub>			-	-	1		-
Zmy <sub>3</sub>			-	0,228	0,772		-
Zmy <sub>4</sub>			-	-	1		-
Zmy <sub>5</sub>			-	0,297	0,703		-
Zmy <sub>6</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Zmy <sub>7</sub>			-	-	-		1
Zmy <sub>8</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Zmy <sub>9</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Zmy <sub>10</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Zmy <sub>11</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Zmy <sub>12</sub>			-	-	-		-
Zmy <sub>13</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Zmy <sub>14</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Zmy <sub>15</sub>			0,009	0,189	0,802		-
Zmy <sub>16</sub>			0,009	0,189	0,802		-
Zmy <sub>17</sub>			0,009	0,189	0,802		-
Zmy <sub>18</sub>			0,004	0,076	0,92		-
Zmy <sub>19</sub>			0,004	0,076	0,92		-
Zmy <sub>20</sub>			0,001	0,023	0,976		-
Zmy <sub>21</sub>			0,001	0,023	0,976		-
Zmy <sub>22</sub>			-	0,001	0,999		-
Zmy <sub>23</sub>			-	-	1		-
Zmy <sub>24</sub>			-	-	1		-
Zmy <sub>25</sub>			-	-	1		-
Zmy <sub>26</sub>			-	-	1		-
Zmy <sub>27</sub>			-	-	-		1
Zmy <sub>28</sub>			-	-	0,74		0,26
Zmy <sub>29</sub>			-	0,001	0,998		0,001
Zmy <sub>30</sub>			-	0,001	0,998		0,001
Zmy <sub>31</sub>			-	-	1		-
Zmy <sub>32</sub>			0,035	0,75	0,215		-
Zmy <sub>33</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Umy <sub>1</sub>			0,018	0,39	0,592		-
Umy <sub>2</sub>			0,009	0,189	0,802		-
Umy <sub>3</sub>			0,004	0,076	0,92		-
Umy <sub>4</sub>			0,001	0,023	0,976		-

Tabla 20. Entalpía por componentes [kJ/mol].

Índice	1	2	3	4	5	6	7
Nombre de la Sustancia	Difosfato tricálcico	Difluoruro de calcio	Ácido sulfúrico	Ácido fosfórico	Agua	Sulfato de calcio dihidratado (Yeso)	Fluoruro de hidrógeno
Fórmula de la sustancia	$\text{Ca}_3(\text{PO}_4)_2$	$\text{CaF}_2$	$\text{H}_2\text{SO}_4$	$\text{H}_3\text{PO}_4$	$\text{H}_2\text{O}$	$\text{CaSO}_4(\text{s}) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	$\text{HF}$
<b>h<sub>1</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>2</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>3</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>4</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>5</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>6</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>7</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>8</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>9</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>10</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>11</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>12</sub></b>	-	-	-	-	-	-	-
<b>h<sub>13</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>14</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>h<sub>15</sub></b>	-4107	-1224	-808,9	-1263	-281,5	-1995	-271,3
<b>h<sub>16</sub></b>	-4107	-1224	-808,9	-1263	-281,5	-1995	-271,3
<b>h<sub>17</sub></b>	-4107	-1224	-808,9	-1263	-281,5	-1995	-271,3
<b>h<sub>18</sub></b>	-4110	-1225	-810	-1265	-282,4	-1998	-271,7
<b>h<sub>19</sub></b>	-4110	-1225	-810	-1265	-282,4	-1998	-271,7
<b>h<sub>20</sub></b>	-4115	-1226	-811,6	-1268	-283,7	-2001	-272,2
<b>h<sub>21</sub></b>	-4115	-1226	-811,6	-1268	-283,7	-2001	-272,2
<b>h<sub>22</sub></b>	-4120	-1228	-813,7	-1271	-285,5	-2006	-272,9
<b>h<sub>23</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>24</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>25</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>26</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>27</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>28</sub></b>	-4121	-1228	-814	-1272	-285,8	-2007	-273
<b>h<sub>29</sub></b>	-4120	-1228	-813,7	-1271	-285,5	-2006	-272,9
<b>h<sub>30</sub></b>	-4120	-1228	-813,7	-1271	-285,5	-2006	-272,9
<b>h<sub>31</sub></b>	-4094	-1220	-804	-1254	-238,2	-1984	-269,8
<b>h<sub>32</sub></b>	-4094	-1220	-804	-1254	-238,2	-1984	-269,8
<b>h<sub>33</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>hD<sub>1</sub></b>	-4105	-1223	-808,2	-1262	-280,9	-1994	-271,1
<b>hD<sub>2</sub></b>	-4107	-1224	-808,9	-1263	-281,5	-1995	-271,3
<b>hD<sub>3</sub></b>	-4110	-1225	-810	-1265	-282,4	-1998	-271,7
<b>hD<sub>4</sub></b>	-4115	-1226	-811,6	-1268	-283,7	-2001	-272,2

## Anexo 3. Tablas Termoquímicas

---

TABLAS DE TERMOQUÍMICA

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
e <sup>-</sup>	0	0	65,3	---
<b>Ag (s)</b>	0	0	42,6	25,4
Ag (g)	284,9	246	173	20,8
Ag <sup>+</sup> (ac)	106	77,1	72,7	21,8
Ag(NH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> <sup>+</sup> (ac)	-111,3	-17,1	245,2	---
AgBr(s)	-100	-96,9	107,1	52,4
AgBrO <sub>3</sub> (s)	-10,5	71,3	151,9	---
AgCN(s)	146	156,9	107,2	66,7
Ag <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (s)	-505,8	-436,8	167,4	112,3
AgCl(s)	-127	-110	96,3	50,8
AgClO <sub>3</sub> (s)	-30,3	64,5	142	---
Ag <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub> (s)	-732	-642	217,6	142,3
AgI(s)	-61,8	-66,2	115,5	56,8
AgIO <sub>3</sub> (s)	-171	-93,7	149,4	102,9
AgNO <sub>3</sub> (s)	-124	-33,4	140,9	93,1
Ag <sub>2</sub> O(s)	-31,1	-11,2	121,3	65,9
Ag <sub>2</sub> S(s, argentita)	-32,6	-40,7	144	76,5
Ag <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-716	-618	200,4	131,4
<b>Al(s)</b>	0	0	28,3	24,2
Al(g)	330	289,4	164,6	21,4
Al <sup>3+</sup> (ac)	-538,4	-491,5	-325	---
AlO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ac)	-930,9	-830,9	-36,8	---
AlBr <sub>3</sub> (s)	-527	---	180,2	100,6
AlCl <sub>3</sub> (s)	-704	-629	109,3	91,1
AlF <sub>3</sub> (s)	-1510	-1431	66,5	75,1
AlF <sub>3</sub> (g)	-1205	-1188	277,1	62,6
AlH <sub>3</sub> (s)	-46	---	30	40,2
AlN(s)	-318	-287	20,2	30,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s, corundum)	-1676	-1582	50,9	79
AlPO <sub>4</sub> (s)	-1734	-1618	90,8	93,2
Al <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (s)	-724	---	116,9	105,1
Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (s)	-3440,8	-3100,1	239,2	259,4
<b>Ar(g)</b>	0	0	154,8	20,8
<b>As (s, gris)</b>	0	0	35,1	24,6
As(g)	302,5	261	174,2	20,8
AsO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ac)	-429	-350	40,6	---
H <sub>2</sub> AsO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-714,8	-587,1	110,5	---
AsO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (ac)	-888,1	-648,4	-162,8	---
H <sub>2</sub> AsO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ac)	-909,6	-753,2	117	---
AsBr <sub>3</sub> (g)	-130	-159	363,9	79,2
AsCl <sub>3</sub> (l)	-305	-259	216,3	---
AsCl <sub>3</sub> (g)	-262	-249	327,2	75,7
AsF <sub>3</sub> (l)	-821	-774	181,2	126,6
AsF <sub>3</sub> (g)	-786	-771	289,1	65,6
AsGa(s)	-71	-67,8	64,2	46,2
H <sub>3</sub> As(g)	66,4	68,9	222,8	38,1
AsI <sub>3</sub> (s)	-58,2	-59,4	213,1	105,8
As <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	-925	-782	105,4	116,5
As <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (s)	-169	-169	163,6	116,3
H <sub>3</sub> AsO <sub>4</sub> (s)	-906	---	---	---
<b>Au(s)</b>	0	0	47,4	25,4
Au(g)	366,1	326,3	180,5	20,8
AuCl <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ac)	-322	-235,2	---	---
Au(CN) <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ac)	242	286	---	---
Au <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	80,75	163,2	---	---
<b>B(s, β)</b>	0	0	5,9	11,1
B(g)	565	521	153,4	---
BO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ac)	-772,4	-678,9	-37,2	---
BBr <sub>3</sub> (l)	-240	-239	229,7	---
BBr <sub>3</sub> (g)	-206	-233	324,2	67,8
BCl <sub>3</sub> (l)	-427	-387	206,3	106,7
BCl <sub>3</sub> (g)	-404	-389	290,1	62,7
BF <sub>3</sub> (g)	-1136	-1119	254,4	---
BH <sub>3</sub> (g)	89,2	93,3	188,2	36
B <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	36,4	87,6	232,1	56,7
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub> (s)	-1094	-969	90	86,1
HBO <sub>2</sub> (s,β)	-794	-723	38	---
HBO <sub>2</sub> (g)	-562	-551	240,1	42,2
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1274	-1194	54	62,8
B <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g)	-844	-832	279,8	66,9

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
B <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (s)	-241	---	100	111,7
<b>Ba(s)</b>	0	0	62,5	28,1
Ba(g)	180	146	170,2	20,8
Ba <sup>2+</sup> (ac)	-537,6	-560,8	9,6	---
BaBr <sub>2</sub> (s)	-757	-737	146	---
BaCO <sub>3</sub> (s)	-1213	-1134,4	112,1	86
Ba(HCO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-1921,6	-1734,3	192	---
BaCl <sub>2</sub> (s)	-855	-807	123,7	75,1
BaF <sub>2</sub> (s)	-1207	-1157	96,4	71,2
BaH <sub>2</sub> (s)	-177	-138	63	46
Ba(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-988	-793	214	151,4
BaO(s)	-548	-520	72,1	47,3
BaS(s)	-460	-456	78,2	49,4
BaSO <sub>4</sub> (s)	-1473	-1362	132,2	101,8
<b>Be(s)</b>	0	0	9,5	16,4
Be(g)	324	286,6	136,3	20,8
Be <sup>2+</sup> (ac)	-382,8	-379,7	-129,7	---
BeO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-790,8	-640,1	-159	---
BeBr <sub>2</sub> (s)	-354	---	108	69,4
BeCO <sub>3</sub> (s)	-1025	---	52	65
BeCl <sub>2</sub> (s)	-490	-446	75,8	62,4
BeF <sub>2</sub> (s)	-1027	-979	53,4	51,8
BeI <sub>2</sub> (s)	-193	---	121	71,1
BeO(s)	-609	-580	13,8	25,6
Be(OH) <sub>2</sub> (s)	-903	-815	45,5	62,1
BeSO <sub>4</sub> (s)	-1205	-1094	77,9	85,7
BeS(s)	-234	---	34	34
<b>Bi(s)</b>	0	0	56,7	25,5
Bi(g)	207,1	168,2	187	20,8
Bi <sup>3+</sup> (ac)	---	82,8	---	---
BiOH <sup>+</sup> (ac)	---	-146,4	---	---
BiCl <sub>3</sub> (s)	-379	-315	177	105
BiCl <sub>3</sub> (g)	-266	-256	358,9	79,7
BN(s)	-254	-228	14,8	19,7
BN(g)	647,5	614,5	212,3	29,5
Bi <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-574	-494	151,5	113,5
Bi <sub>2</sub> S <sub>3</sub> (s)	-143	-141	200,4	122,2
<b>Br<sub>2</sub>(l)</b>	0	0	152,2	75,7
Br <sub>2</sub> (g)	30,9	3,1	245,5	36
Br(g)	111,9	82,4	175	20,8
Br <sup>-</sup> (ac)	-121,5	-104	82,4	-141,8
Br <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-130,4	-107	215,5	---
BrO <sup>-</sup> (ac)	-94,1	-33,4	42	---
BrO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-67,1	18,6	161,7	---
BrO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ac)	13	118,1	199,6	---
HBr(g)	-36,3	-53,4	198,7	29,1
<b>C (s, grafito)</b>	0	0	5,7	8,5
C (s, diamante)	1,9	2,9	2,4	6,1
C (g)	716,7	671,3	158	20,8
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-675,2	-528	-50	---
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-689,9	-587	98,4	---
HCOO <sup>-</sup> (ac)	-425,6	-351	92	-87,9
CH <sub>3</sub> COO <sup>-</sup> (ac)	-486	-369,3	86,6	-6,3
C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-825,1	-673,9	45,6	---
C <sub>2</sub> O <sub>4</sub> H <sup>-</sup> (ac)	-818,4	-698,3	149,4	---
CN <sup>-</sup> (ac)	150,6	172,4	94,1	---
SCN <sup>-</sup> (ac)	76,4	92,7	144,3	-40,2
CaC <sub>2</sub> (s)	-59,8	-64,9	70	62,7
CCl <sub>4</sub> (l)	-128,2	---	---	130,7
CCl <sub>4</sub> (g)	-95,7	---	---	83,3
C <sub>2</sub> Cl <sub>4</sub> (l)	-50,6	3	266,9	143,4
COCl <sub>2</sub> (g)	-218	-205	283,4	57,7
F <sub>4</sub> C(g)	-933,6	---	261,6	61,1
HCN (l)	108,9	125	112,8	70,6
HCN (g)	135,1	124,7	201,8	35,9
CS <sub>2</sub> (l)	89	65,3	151,3	75,7
CS <sub>2</sub> (g)	116,7	67,2	237,7	45,4
CSi(s, cúbico)	-65,3	-62,8	16,6	26,9
CSi(s, hexagonal)	-62,8	-60,2	16,5	26,7

TABLAS DE TERMOQUÍMICA

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
CO (g)	-110,5	-137,1	197,6	29,1
CO <sub>2</sub> (g)	-393,5	-394,4	213,7	37,1
CO <sub>2</sub> (ac)	-413,3	-386	119,4	---
H <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (ac)	-699,6	-623,1	187,4	---
CO(NH <sub>2</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-333,7	-196,8	104,6	93,1
CH <sub>4</sub> (g)	-74,5	-50,8	186,1	35,3
CCl <sub>3</sub> F (g)	-268	-238	309,8	78,1
CCl <sub>3</sub> F (l)	-301	-236,9	225,4	121,5
CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub> (g)	-478	-439	300,7	72,3
CClF <sub>3</sub> (g)	-710	-653	285,2	66,9
CH <sub>3</sub> Cl (g)	-82	-75,4	234,5	40,8
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (l)	-124,1	-67,3	177,8	100
CH <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (g)	-95,7	-65,9	270,1	51
CHF <sub>3</sub> (g)	-695,4	---	259,7	51
CHCl <sub>3</sub> (l)	-135,1	-73,7	201,7	113,8
CHCl <sub>3</sub> (g)	-105	-70,4	295,6	65,7
CHI <sub>3</sub> (g)	251	---	356,2	75
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> (l)	-47,3	35,7	150,2	102,1
CH <sub>3</sub> NH <sub>2</sub> (g)	-22,5	32,7	242,9	50,1
CH <sub>3</sub> OH (l)	-239,1	-166,4	126,8	81,6
CH <sub>3</sub> OH (g)	-200,8	-162	239,7	43,9
HCHO (g)	-108,7	-113	218,7	35,4
HCOOH (l)	-425	-361,4	129	99
NaHCOO(s)	-666,5	-599,9	103,8	82,7
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> (g)	228	209,2	200,8	43,9
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> (g)	52,2	68,1	219,5	43,6
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> (g)	-84	-32,9	229,5	52,6
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (l)	-277,6	-174,8	160,7	112,3
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH (g)	-234,8	-167,9	281,6	65,6
CH <sub>3</sub> CHO (l)	-192,2	-127,6	160,2	89
CH <sub>3</sub> CHO (g)	-166,2	-133	263,8	55,3
CH <sub>3</sub> COOH (l)	-484,3	-389,9	159,8	123,3
CH <sub>3</sub> COOH (g)	-432,2	-374,2	283,5	63,4
CH <sub>3</sub> COONa(s)	-708,8	-607,2	123	79,9
COOHCOOH(s)	-829,9	---	109,8	91
COOHCOOH (g)	-731,8	-662,7	320,6	86,2
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> (l, Etilenglicol)	-460	---	163,2	148,6
C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O <sub>2</sub> (g, Etilenglicol)	-392,2	---	303,8	82,7
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> (g)	-47,5	36,3	283,8	71,5
(C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> ) <sub>2</sub> NH (l)	-43,9	70	182,3	137,7
(CH <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> O (g)	-184,1	-112,6	266,4	64,4
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g, Propileno)	20,2	62,7	266,9	64
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> (g, Ciclopropano)	53,3	104,5	237,5	55,6
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> (g)	-104,5	-23,4	269,9	73,6
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> CHO (g)	-185,6	---	304,5	80,7
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O (l, Acetona)	-248,4	---	199,8	126,3
C <sub>3</sub> H <sub>6</sub> O (g, Acetona)	-217,1	-152,7	295,3	74,5
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COOH (l, Ácido Propanoico)	-510,7	---	191	152,8
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COOCH <sub>3</sub> (l, Acet. de Metilo)	-445,9	---	---	141,9
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> COOCH <sub>3</sub> (g, Acet. de Metilo)	-413,3	---	324,4	86
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (l, 1-Propanol)	-302,6	---	193,6	143,9
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (g, 1-Propanol)	-255,1	---	322,6	85,6
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (l, 2-Propanol)	-318,1	---	181,1	156,5
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (g, 2-Propanol)	-272,6	---	309,2	89,3
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O (g, Etil Metil Éter)	-216,4	---	309,2	93,3
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>2</sub> (l, 1,2-Propilenglicol)	-501	---	---	190,8
C <sub>3</sub> H <sub>8</sub> O <sub>3</sub> (l, Glicerol)	-669,6	---	206,3	218,9
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (l)	-147,3	---	---	140,9
n-C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> (g)	-126,5	-17,1	310,1	97,4
C <sub>4</sub> H <sub>10</sub> O <sub>3</sub> (l, Dietilenglicol)	-628,5	---	---	244,8
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (g)	-146,5	-8,4	348,9	120,2
n-C <sub>5</sub> H <sub>12</sub> (l)	-173,2	-9,6	263,3	---
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (l)	-198,6	-4,4	295,9	216
n-C <sub>6</sub> H <sub>14</sub> (g)	-167,1	-0,3	388,4	143,1
n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (l)	-224	1	328,5	---
n-C <sub>7</sub> H <sub>16</sub> (g)	-187,5	8	427,8	166
n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (l)	-250	6,4	361,2	276
n-C <sub>8</sub> H <sub>18</sub> (g)	-208,5	16,4	466,7	189
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> (l, Ciclohexano)	-156,3	26,7	204,4	157,7
C <sub>6</sub> H <sub>12</sub> (g, Ciclohexano)	-123,4	---	---	---
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (l)	49	124,7	172	132

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub> (g)	82,9	129,7	269,2	81,6
CH <sub>3</sub> C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> (l)	12	114,1	219,6	160
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH(s)	-165,1	---	144	127,4
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH(g)	-96,4	---	---	---
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> (l)	31,6	---	---	191,9
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> NH <sub>2</sub> (g)	87,5	-7	317,9	107,9
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> CHO(l)	-87	---	221,2	172
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> COOH(s)	-385,2	---	167,6	146,8
C <sub>6</sub> H <sub>15</sub> NO <sub>3</sub> (s, Trietanolamina)	-664,2	---	---	389
C <sub>7</sub> H <sub>5</sub> (NO <sub>2</sub> ) <sub>3</sub> (s, 2,4,6-Trinitrotolueno)	-63,2	---	---	243,3
C <sub>8</sub> H <sub>8</sub> (l, Estireno)	103,8	---	182	147,9
C <sub>9</sub> H <sub>10</sub> (l, Etilbenceno)	-12,3	---	183,2	29,9
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (l, o-Xileno)	-24,4	---	186,1	19,1
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (l, m-Xileno)	-25,4	---	183	17,3
C <sub>8</sub> H <sub>10</sub> (l, p-Xileno)	-24,4	---	181,5	18
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> (s, Naftaleno)	78,5	201,6	167,4	165,7
C <sub>10</sub> H <sub>8</sub> (g, Naftaleno)	150,6	224,1	333,1	131,9
C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> (s, Antraceno)	129,2	---	207,5	210,5
C <sub>14</sub> H <sub>10</sub> (s, Fenantreno)	116,2	---	215,1	220,6
Ca(s)	0	0	41,6	25,9
Ca(g)	177,8	144	154,8	20,8
Ca <sup>2+</sup> (ac)	-542,8	-553,6	-56,2	---
CaOH <sup>+</sup> (ac)	---	-718,4	---	---
CaBr <sub>2</sub> (s)	-683	-664	130	---
CaC <sub>2</sub> (s)	-59,8	-64,9	70,0	62,7
CaCO <sub>3</sub> (s, calcita)	-1207,6	-1129,1	91,7	83,5
CaCO <sub>3</sub> (s, aragonito)	-1207,8	-1128,2	88	82,3
CaCl <sub>2</sub> (s)	-795	-749	108,4	72,9
CaF <sub>2</sub> (s)	-1228	-1176	68,5	67
CaH <sub>2</sub> (s)	-182	-143	41,4	41
CaI <sub>2</sub> (s)	-534	-529	142	---
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-938	-743	193,2	149,4
CaO(s)	-635	-603	38,1	42
Ca(OH) <sub>2</sub> (s)	-985	-898	83,4	87,5
Ca <sub>3</sub> (PO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-4121	-3885	236	227,8
CaS(s)	-482	-477	56,5	47,4
CaSO <sub>4</sub> (s)	-1435	-1322	106,5	99,7
Cd(s)	0	0	51,8	26
Cd(g)	111,8	---	167,7	20,8
Cd <sup>2+</sup> (ac)	-75,9	-77,6	-73,2	---
CdOH <sup>+</sup> (ac)	---	-261,1	---	---
Cd(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	428	507,6	322	---
Cd(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> <sup>2+</sup> (ac)	-450,2	-226,1	336,4	---
CdBr <sub>2</sub> (s)	-316	-296	137,2	76,7
CdCO <sub>3</sub> (s)	-750,6	-669,4	92,5	---
CdCl <sub>2</sub> (s)	-392	-344	115,3	74,7
CdF <sub>2</sub> (s)	-700	-648	77,4	---
CdI <sub>2</sub> (s)	-203	-201	161,1	80
CdO(s)	-258	-229	54,8	43,4
Cd(OH) <sub>2</sub> (s)	-561	-474	96	---
CdS(s)	-162	-157	64,9	---
CdSO <sub>4</sub> (s)	-833	-823	123	99,5
Cl <sub>2</sub> (g)	0	0	223,1	33,9
Cl(g)	121,3	105,7	165,1	21,8
Cl <sup>-</sup> (ac)	-167,2	-131,2	56,5	-136,4
ClO <sup>-</sup> (ac)	-107,1	-36,8	42	---
ClO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (ac)	-66,5	17,2	101,3	---
ClO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-104	-8	162,3	---
ClO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ac)	-128,1	-7,5	184	---
HCl(g)	-92,3	-95,3	186,9	29,1
Cl <sub>2</sub> CO(g)	-477,4	-439,4	300,8	72,3
Cl <sub>2</sub> O(g)	80,3	97,9	266,1	45,5
ClO <sub>2</sub> (g)	102,5	120,5	256,8	42
HClO(g)	-76,7	-66,1	236,7	37,2
Co(s)	0	0	30	24,8
Co(g)	424,7	380,3	179,5	23
Co <sup>2+</sup> (ac)	-58,2	-54,4	-113	---
Co <sup>3+</sup> (ac)	92	134	-305	---
Co(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> <sup>3+</sup> (ac)	-584,9	-157	146	---
CoBr <sub>2</sub> (s)	-221	---	---	79,5
CoCl <sub>2</sub> (s)	-313	-270	109,2	78,5

TABLAS DE TERMOQUÍMICA

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
CoF <sub>2</sub> (s)	-692	-647	82	68,8
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub>	-472,8	-276,9	180	---
CoO(s)	-238	-214	53	55,2
Co(OH) <sub>2</sub> (s)	-540	-454	79	---
CoSO <sub>4</sub> (s)	-888	-782	118	---
Cr(s)	0	0	23,8	23,4
Cr(g)	396,6	351,8	174,5	20,8
Cr <sup>2+</sup> (ac)	-143,5	---	---	---
CrO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-881,1	-727,7	50,2	---
Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-149	-1301,1	261,9	---
CrCl <sub>2</sub> (s)	-395	-356	115,3	71,2
CrCl <sub>3</sub> (s)	-557	-486	123	91,8
CrF <sub>3</sub> (s)	-1159	-1088	93,9	78,7
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1140	-1058	81,2	118,7
Cs(s)	0	0	85,2	32,2
Cs(g)	76,5	49,6	175,6	20,8
Cs <sup>+</sup> (ac)	-258	-292	132,1	-10,5
CsBr(s)	-406	-391	113,1	52,9
Cs <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (s)	-1139,7	-1054,3	204,5	123,9
CsCl(s)	-443	-415	101,2	52,5
CsClO <sub>4</sub> (s)	-443	-314	175,1	108,3
CsF(s)	-554	-526	92,8	51,1
CsI(s)	-347	-341	123,1	52,8
CsNO <sub>3</sub> (s)	-506	-407	155,2	---
Cs <sub>2</sub> O(s)	-346	-308	146,9	76
CsOH(s)	-416	-372	104,2	69,9
Cs <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-1443	-1324	211,9	134,9
Cu(s)	0	0	33,2	24,4
Cu(g)	337,4	297,7	166,4	20,8
Cu <sup>+</sup> (ac)	71,7	50	40,6	---
Cu <sup>2+</sup> (ac)	64,8	65,5	-99,6	---
Cu(CN) <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (ac)	---	403,8	---	---
Cu(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> <sup>2+</sup> (ac)	-348,5	-111,1	273,6	---
CuBr(s)	-105	-101	96,1	54,7
CuCl(s)	-137	-120	86,2	48,5
CuCN(s)	96,2	111,3	84,5	---
CuCl <sub>2</sub> (s)	-220	-176	108,1	71,9
CuI(s)	-67,8	-69,5	96,7	54,1
CuO(s)	-157	-130	42,6	42,3
Cu <sub>2</sub> O(s)	-169	-146	93,1	63,6
Cu(OH) <sub>2</sub> (s)	-450	---	---	---
CuS(s)	-53,1	-53,6	66,5	47,8
Cu <sub>2</sub> S(s)	-79,5	-86,2	120,9	76,3
CuSO <sub>4</sub> (s)	-771	-662	109,2	---
CuSO <sub>4</sub> ·H <sub>2</sub> O(s)	-1085,8	-918,2	146	134
CuSO <sub>4</sub> ·3H <sub>2</sub> O(s)	-1684,3	-1400,2	221	205
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O(s)	-2279,7	-1880,1	300	280
F <sub>2</sub> (g)	0	0	202,8	31,3
F(g)	79,4	62,3	158,8	22,7
F <sup>-</sup> (ac)	-335,4	-281,8	-13,8	-106,7
F <sub>2</sub> CO(g)	-639,8	---	---	46,8
F <sub>2</sub> O(g)	-23,0	-4,6	247,3	43,3
HF(g)	-273	-275	173,8	---
Fe(s)	0	0	27,3	25,1
Fe(g)	416,3	370,7	180,5	25,7
Fe <sup>2+</sup> (ac)	-89,1	-78,9	-137,7	---
Fe <sup>3+</sup> (ac)	-48,5	-4,7	-315,9	---
FeOH <sup>+</sup> (ac)	-324,7	-277,4	-29	---
FeOH <sup>2+</sup> (ac)	-290,8	-229,4	-142	---
Fe(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> (ac)	---	-438	---	---
Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>3-</sup> (ac)	581,9	729,4	270,3	---
Fe(CN) <sub>6</sub> <sup>4-</sup> (ac)	455,6	695,1	95	---
Fe(CNS) <sub>2</sub> <sup>2+</sup> (ac)	23,4	71,1	-130	---
FeBr <sub>2</sub> (s)	-250	-238	140,6	---
Fe <sub>3</sub> C(s)	25,1	20,1	104,6	105,9
FeCO <sub>3</sub> (s)	-740,6	-666,7	92,9	82,1
FeCl <sub>2</sub> (s)	-342	-302	118	76,7
FeCl <sub>3</sub> (s)	-400	-334	142,3	96,7
FeF <sub>2</sub> (s)	-711	-669	87	68,1
FeMoO <sub>4</sub> (s)	-1075	-975	129,3	118,5
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-824	-742	87,4	103,9
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	-1118	-1015	146,4	143,4

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
FeS(s)	-100	-100	60,3	50,5
FeS <sub>2</sub> (s, pirita)	-178	-167	52,9	62,2
FeSO <sub>4</sub> (s)	-928	-821	107,5	100,6
Fe <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	-1480	-1379	145,2	132,9
Ga(s)	0	0	40,8	26,1
Ga(g)	272	233,7	169	25,3
Ga <sup>3+</sup> (ac)	-211,7	-159	-331	---
GaBr <sub>3</sub> (s)	-387	-360	180	---
GaCl <sub>3</sub> (s)	-525	-455	142	---
GaF <sub>3</sub> (s)	-1163	-1085	84	---
GaO(g)	279,5	253,5	231,1	32,1
Ga <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1089	-998	85	92,1
Ga(OH) <sub>3</sub> (s)	-964	-831	100	---
Ge(s)	0	0	31,1	23,3
Ge(g)	372	331,2	167,9	30,7
GeBr <sub>4</sub> (l)	-348	-331	280,7	---
GeBr <sub>2</sub> (g)	-300	-318	396,2	101,8
GeCl <sub>4</sub> (l)	-532	-463	245,6	---
GeCl <sub>4</sub> (g)	-496	-457	347,7	96,1
GeF <sub>4</sub> (g)	-1190	-1150	301,9	---
GeI <sub>4</sub> (s)	-142	-144	271,1	---
GeH <sub>4</sub> (g)	90,8	113	217,0	45,0
GeO <sub>2</sub> (s)	-580	-521	39,7	52,1
GeS(s)	-69	-71,5	71	---
GeS(g)	92	42	234	33,7
H <sub>2</sub> (g)	0	0	130,7	28,8
H(g)	218	203,3	114,7	20,8
H <sup>+</sup> (ac)	0	0	0	0
H <sub>2</sub> O(l)	-285,8	-237	70	75,3
H <sub>2</sub> O(g)	-241,8	-229	188,8	33,6
He(g)	0	0	126,2	20,8
He(ac)	-1,7	19,7	54,4	---
Hf(s)	0	0	43,6	25,7
HfCl <sub>4</sub> (s)	-990	-901	190,8	120,5
HfF <sub>4</sub> (s)	-1931	-1830	113	---
Hg(l)	0	0	75,9	28
Hg(g)	61,4	31,8	175	20,8
Hg <sup>2+</sup> (ac)	171,1	164,4	-32,2	---
Hg <sub>2</sub> <sup>2+</sup> (ac)	172,4	153,5	84,5	---
HgOH <sup>+</sup> (ac)	-84,5	-52,3	71	---
Hg(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	526,3	618,5	305	---
Hg(CNS) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	326,4	411,4	456	---
HgCl <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-554	-446,8	293	---
Hg <sub>2</sub> Br <sub>2</sub> (s)	-207	-181	218	---
HgBr <sub>2</sub> (s)	-171	-153	172	---
Hg <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> (s)	-265	-211	191,6	---
HgCl <sub>2</sub> (s)	-224	-179	146	---
HgI <sub>2</sub> (s)	-105	-102	180	---
HgO(s)	-90,8	-58,5	70,3	44,1
HgS(s)	-58,2	-50,6	82,4	48,4
Hg <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-743	-626	200,7	132
I <sub>2</sub> (s, rómbico)	0	0	116,1	54,4
I <sub>2</sub> (g)	62,4	19,3	260,7	36,9
I <sub>2</sub> (ac)	22,6	16,4	137,2	---
I(g)	106,8	70,2	180,8	20,8
I <sup>-</sup> (ac)	-55,2	-51,6	111,3	-142,3
I <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-51,5	-51,4	239,3	---
IO <sup>-</sup> (ac)	-107,5	-38,5	-5,4	---
IO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-221,3	-128	118,4	---
IO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ac)	-151,5	-58,5	222	---
HI(g)	26,5	1,7	206,6	29,2
In(s)	0	0	57,8	26,7
In(g)	243,3	208,7	173,8	20,8
In <sup>+</sup> (ac)	---	-12,1	---	---
In <sup>3+</sup> (ac)	-105	-98	-151	---
InOH <sup>2+</sup> (ac)	-370,3	-313	-88	---
In(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> (ac)	-619	-525	25	---
InI(s)	-116	-121	130	---
InI(g)	7,5	-37,7	267,3	36,8
InO(g)	387	364,4	236,5	32,6
In <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-926	-831	104,2	92

TABLAS DE TERMOQUÍMICA

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
$\text{Ir}_2\text{S}_3(\text{s})$	-427	-413	163,6	119
$\text{Ir}(\text{s})$	0	0	35,5	25,1
$\text{Ir}(\text{g})$	665,3	617,9	193,6	20,8
$\text{IrO}_2(\text{s})$	-274	---	---	57,3
<b>K(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>64,7</b>	<b>29,6</b>
$\text{K}(\text{g})$	89	60,5	160,3	20,8
$\text{K}^+(\text{ac})$	-252,1	---	101,2	21,8
$\text{KBr}(\text{s})$	-394	-381	95,9	52,3
$\text{KCN}(\text{s})$	-113	-101,9	128,5	66,3
$\text{KHCO}_3(\text{s})$	-963,2	-863,5	115,5	---
$\text{K}_2\text{CO}_3(\text{s})$	-1151	-1063,5	155,5	114,4
$\text{KCNS}(\text{s})$	-200,2	-178,3	124,3	88,5
$\text{KCl}(\text{s})$	-437	-409	82,6	51,3
$\text{KCl}(\text{g})$	-215	-233	239,1	36,5
$\text{KClO}_3(\text{s})$	-398	-296	143,1	100,3
$\text{KClO}_4(\text{s})$	-433	-303	151	112,4
$\text{KF}(\text{s})$	-567	-538	66,6	49
$\text{KH}(\text{g})$	125,5	105,0	198	---
$\text{KI}(\text{s})$	-328	-325	106,3	52,9
$\text{KIO}_3(\text{s})$	-501	-418	151,5	106,5
$\text{KIO}_4(\text{s})$	-467	-361	175,7	---
$\text{KMnO}_4(\text{s})$	-837	-738	171,7	117,6
$\text{KNO}_2(\text{s})$	-370	-307	152,1	107,4
$\text{KNO}_3(\text{s})$	-495	-395	133,1	96,4
$\text{K}_2\text{O}(\text{s})$	-361,5	-322,2	---	---
$\text{K}_2\text{O}_2(\text{s})$	-494	-425	102,1	---
$\text{KOH}(\text{s})$	-425	-379	81,2	68,9
$\text{KH}_2\text{PO}_4(\text{s})$	-1568	-1416	134,9	116,6
$\text{K}_2\text{S}(\text{s})$	-381	-364	105	---
$\text{K}_2\text{SO}_4(\text{s})$	-1438	-1321	175,6	131,5
$\text{KHSO}_4(\text{s})$	-1161	-1031	138,1	---
<b>Kr(g)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>164,1</b>	<b>20,8</b>
<b>Li(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>29,1</b>	<b>24,8</b>
$\text{Li}(\text{g})$	158,3	126,6	138,8	20,8
$\text{Li}^+(\text{ac})$	-278,5	---	12,2	---
$\text{LiBr}(\text{s})$	-351	-342	74,3	---
$\text{Li}_2\text{CO}_3(\text{s})$	-1215,5	-1132,6	90,4	97,5
$\text{LiCl}(\text{s})$	-409	-384	59,3	48
$\text{LiF}(\text{s})$	-616	-588	35,7	41,6
$\text{HLi}(\text{s})$	-90,5	-68,3	20	27,9
$\text{LiI}(\text{s})$	-270	-270	86,8	51
$\text{LiNO}_2(\text{s})$	-372	-302	96	---
$\text{LiNO}_3(\text{s})$	-483	-381	90	---
$\text{LiOH}(\text{s})$	-488	-442	42,8	49,6
$\text{Li}_2\text{O}(\text{s})$	-598	-561	37,6	54,1
$\text{Li}_2\text{SO}_4(\text{s})$	-1437	-1322	115,1	117,6
$\text{Li}_2\text{SiO}_3(\text{s})$	-1648	-1557	79,8	99,1
<b>Mg(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>32,7</b>	<b>24,9</b>
$\text{Mg}(\text{g})$	147,1	112,5	148,6	20,8
$\text{Mg}^{2+}(\text{ac})$	-466,8	-454,8	-138,1	---
$\text{MgOH}^+(\text{ac})$	---	-626,7	---	---
$\text{MgBr}_2(\text{s})$	-524	-504	117,2	---
$\text{MgCO}_3(\text{s, magnesita})$	-1096	-1012	65,7	75,5
$\text{MgCl}_2(\text{s})$	-641	-592	89,6	71,4
$\text{MgCl}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{s})$	-966,6	-861,8	137	115,3
$\text{MgCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}(\text{s})$	-1279,7	-1118,1	180	159,2
$\text{MgCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}(\text{s})$	-1899	-1623,5	264	241,4
$\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}(\text{s})$	-2499	-2115	366	315
$\text{MgF}_2(\text{s})$	-1124	-1071	57,2	61,6
$\text{H}_2\text{Mg}(\text{s})$	-75,3	-35,9	31,1	35,4
$\text{MgI}_2(\text{s})$	-364	-358	129,7	---
$\text{Mg}(\text{NO}_3)_2(\text{s})$	-791	-589	164	141,9
$\text{Mg}(\text{OH})_2(\text{s})$	-925	-834	63,2	77
$\text{MgO}(\text{s})$	-602	-569	27	37,2
$\text{MgS}(\text{s})$	-346	-342	50,3	45,6
$\text{MgSO}_4(\text{s})$	-1285	-1171	91,6	96,5
$\text{Mg}_2\text{SiO}_4(\text{s})$	-2174	-2035	55,1	119,5
<b>Mn(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>32</b>	<b>26,3</b>
$\text{Mn}(\text{g})$	280,7	238,5	173,7	20,8
$\text{Mn}^{2+}(\text{ac})$	-220,7	-228,1	-73,6	50

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
$\text{MnOH}^+(\text{ac})$	-450,6	-405	-17	---
$\text{MnO}_4^-(\text{ac})$	-541,4	-447,2	191,2	-82
$\text{MnO}_4^{2-}(\text{ac})$	-653	-500,7	59	---
$\text{MnCO}_3(\text{s})$	-894	-817	85,8	81,5
$\text{MnCl}_2(\text{s})$	-481	-441	118,2	72,9
$\text{MnO}(\text{s})$	-385	-363	59,7	45,4
$\text{MnO}_2(\text{s})$	-520	-465	53,1	54,1
$\text{Mn}_2\text{O}_3(\text{s})$	-959	-881	110,5	107,7
$\text{Mn}_3\text{O}_4(\text{s})$	-1388	-1283	155,6	139,7
$\text{Mn}(\text{OH})_2(\text{s})$	-693,7	-610,4	88,3	---
$\text{MnS}(\text{s, } \alpha)$	-214	-218	78,2	50
$\text{Mn}_2\text{SO}_4(\text{s})$	-1065,3	-957,4	112	100,5
$\text{MnSiO}_3(\text{s})$	-1321	-1241	89,1	86,4
$\text{Mn}_2\text{SiO}_4(\text{s})$	-1731	-1632	163,2	129,9
<b>Mo(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>28,7</b>	<b>24,1</b>
$\text{Mo}(\text{g})$	658,1	612,5	182	20,8
$\text{MoO}_4^{2-}(\text{ac})$	-997,9	-836,3	27,2	---
$\text{MoO}_2(\text{s})$	-589	-533	46,3	56
$\text{MoO}_3(\text{s})$	-745	-668	77,7	75
$\text{MoS}_2(\text{s})$	-235	-226	62,6	63,6
<b>N<sub>2</sub>(g)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>191,6</b>	<b>29,1</b>
$\text{N}(\text{g})$	472,7	455,5	153,3	20,8
$\text{N}^{3-}(\text{g})$	146	---	---	---
$\text{NH}_4^+(\text{ac})$	-133,3	---	111,2	79,9
$\text{NO}_2^-(\text{ac})$	-104,6	-32,2	123	-97,5
$\text{NO}_3^-(\text{ac})$	-206,8	---	146,7	-86,6
$\text{NH}_3(\text{g})$	-45,9	-16,4	192,8	35,1
$\text{NH}_3(\text{ac})$	-80,3	-26,5	111,3	---
$\text{NH}_4\text{OH}(\text{l})$	-361	-254	165,6	154,9
$\text{NH}_4\text{HCO}_3(\text{s})$	-849,4	-665,9	120,9	---
$\text{NH}_4\text{Cl}(\text{s})$	-314	-203	94,6	84,1
$\text{NH}_4\text{ClO}_4(\text{s})$	-295	-88,8	186,2	---
$\text{NH}_4\text{F}(\text{s})$	-464	-349	72	65,3
$\text{NH}_4\text{NO}_3(\text{s})$	-366	-184	151,1	139,3
$(\text{NH}_4)_2\text{HPO}_4(\text{s})$	-1567	---	---	188
$(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4(\text{s})$	-1672	---	---	---
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4(\text{s})$	-1181	-902	220,1	187,5
$\text{N}_2\text{O}(\text{g})$	81,6	103,7	220	38,6
$\text{N}_2\text{O}_3(\text{g})$	86,6	142,4	314,7	72,7
$\text{N}_2\text{O}_4(\text{l})$	-19,5	97,5	209,2	142,7
$\text{N}_2\text{O}_4(\text{g})$	11,1	99,8	304,4	79,2
$\text{N}_2\text{O}_5(\text{s})$	-43,1	113,9	178,2	143,1
$\text{N}_2\text{O}_5(\text{g})$	13,3	117,1	355,7	95,3
$\text{NO}(\text{g})$	91,3	87,6	210,8	29,9
$\text{NO}_2(\text{g})$	33,2	51,3	240,1	37,2
$\text{HNO}_2(\text{g})$	-79,5	-46	254,1	45,6
$\text{HNO}_3(\text{l})$	-174	-80,7	155,6	109,9
<b>Na(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>51,3</b>	<b>28,2</b>
$\text{Na}(\text{g})$	107,5	77	153,7	20,8
$\text{Na}^+(\text{ac})$	-240,1	-261,9	59	46,4
$\text{NaBO}_2(\text{s})$	-977	-921	73,5	65,9
$\text{NaBr}(\text{s})$	-361	-349	86,8	51,4
$\text{NaBr}(\text{g})$	-143	-177	241,2	36,3
$\text{NaBrO}_3(\text{s})$	-334	-243	128,9	---
$\text{NaCN}(\text{s})$	-87,5	-76,4	115,6	70,4
$\text{Na}_2\text{CO}_3(\text{s})$	-1131,4	-1048,1	136	110,5
$\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot 10\text{H}_2\text{O}(\text{s})$	-4083,6	-3426,3	542,2	535,6
$\text{NaHCO}_3(\text{s})$	-947,7	-850,2	102,1	87,6
$\text{NaCl}(\text{s})$	-411	-384	72,1	50,5
$\text{NaClO}_3(\text{s})$	-366	-262	123,4	---
$\text{NaClO}_4(\text{s})$	-383	-255	142,3	---
$\text{NaF}(\text{s})$	-577	-546	51,1	46,9
$\text{HNa}(\text{s})$	-56,3	-33,5	40	36,4
$\text{NaI}(\text{s})$	-288	-286	98,5	52,1
$\text{NaIO}_4(\text{s})$	-429	-323	163	---
$\text{Na}_2\text{MoO}_4(\text{s})$	-1468	-1354	159,7	141,7
$\text{NaNO}_2(\text{s})$	-359	-285	103,8	---
$\text{NaNO}_3(\text{s})$	-468	-367	116,5	92,9
$\text{Na}_2\text{O}(\text{s})$	-414	-376	75,1	69,1
$\text{Na}_2\text{O}_2(\text{s})$	-511	-448	95	89,2
$\text{NaOH}(\text{s})$	-426	-380	64,4	59,5
$\text{Na}_2\text{HPO}_4(\text{s})$	-1748	-1608	150,5	135,3

## TABLAS DE TERMOQUÍMICA

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
Na <sub>2</sub> S(s)	-365	-350	83,7	---
Na <sub>2</sub> SO <sub>3</sub> (s)	-1101	-1013	145,9	120,3
NaHSO <sub>4</sub> (s)	-1126	-993	113	---
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-1387	-1270	149,6	128,2
Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ·10H <sub>2</sub> O (s)	-4328	-3647	592	587,4
Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (s)	-1555	-1463	113,9	---
<b>Nb(s)</b>	0	0	36,4	24,6
Nb(g)	725,9	681,1	186,3	30,2
NbCl <sub>5</sub> (s)	-798	-683	210,5	148,1
NbO(s)	-406	-379	48,1	41,3
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	-1900	-1766	137,2	132,1
<b>Ne(g)</b>	0	0	146,3	20,8
<b>Ni(s)</b>	0	0	29,9	26,1
Ni(g)	429,7	384,5	182,2	23,4
Ni <sup>2+</sup> (ac)	-54	-45,6	-128,9	---
NiOH <sup>+</sup> (ac)	-287,9	-227,6	-71	---
Ni(CN) <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	367,8	472,1	218	---
Ni(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> <sup>2+</sup> (ac)	-438,9	---	258,6	---
Ni(NH <sub>3</sub> ) <sub>6</sub> <sup>2+</sup> (ac)	-630,1	-255,7	394,6	---
NiCl <sub>2</sub> (s)	-305	-259	97,7	71,7
NiF <sub>2</sub> (s)	-651	-604	73,6	64,1
NiO (s)	-239	-212	38	44,3
Ni(OH) <sub>2</sub> (s)	-530	-447	88	---
NiS(s)	-82	-79,5	53	47,1
NiSO <sub>4</sub> (s)	-873	-760	92	138
NiSO <sub>4</sub> ·6H <sub>2</sub> O (s)	-2682,8	-2225	334,5	327,9
<b>O<sub>2</sub>(g)</b>	0	0	205,2	29,4
O <sub>2</sub> (ac)	-11,7	16,4	110,9	---
O(g)	249,2	231,7	1610,9	21,9
O <sup>-</sup> (g)	908	---	---	---
OH <sup>-</sup> (ac)	-230	-157,2	-10,8	-148,5
O <sub>3</sub> (g)	142,7	163,2	238,9	39,2
H <sub>2</sub> O(l)	-285,8	-237	70	75,3
H <sub>2</sub> O(g)	-241,8	-229	188,8	33,6
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (l)	-188	-120	109,6	89,1
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> (g)	-136	-106	232,7	43,1
<b>Os(s)</b>	0	0	32,6	24,7
Os(g)	791	745	192,6	20,8
OsO <sub>4</sub> (s)	-394	-305	143,9	---
OsO <sub>4</sub> (g)	-337	-293	293,8	74,1
<b>P(s, blanco)</b>	0	0	41,1	23,8
P(s, rojo)	-17,6	---	22,8	21,2
P(g)	316,5	280,1	163,2	20,8
P <sub>4</sub> (g)	58,9	24,4	280	67,2
H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ac)	-1296,3	-1130,2	90,4	---
HPO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (ac)	-1299	---	-33,5	---
PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (ac)	-1277,4	-1018,7	-222	---
H <sub>2</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-2278,6	-2010,2	163	---
HP <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>3-</sup> (ac)	-2274,8	-1972,2	46	---
P <sub>2</sub> O <sub>7</sub> <sup>4-</sup> (ac)	-2271,1	-1919	-117	---
PCl <sub>5</sub> (l)	-320	-272	217,1	---
PCl <sub>5</sub> (g)	-287	-268	311,8	71,8
PCl <sub>3</sub> (g)	-375	-305	364,6	112,8
PH <sub>3</sub> (g)	5,4	13,5	210,2	37,1
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (s)	-1284	-1124	110,5	106,1
H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub> (l)	-1272	-1124	150,8	145
<b>Pb(s)</b>	0	0	64,8	26,4
Pb(g)	195,2	162,2	175,4	20,8
Pb <sup>2+</sup> (ac)	0,9	---	18,5	---
PbOH <sup>+</sup> (ac)	---	-226,3	---	---
PbBr <sub>2</sub> (s)	-279	-262	161,5	80,1
PbCO <sub>3</sub> (s)	-699,1	-625,5	131	87,4
PbC <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (s)	-851,4	-750,2	146	105,4
PbCl <sub>2</sub> (s)	-359	-314	136	---
PbF <sub>2</sub> (s)	-664	-617	110,5	---
PbI <sub>2</sub> (s)	-176	-174	174,9	77,4
PbO(s)	-219,5	-189,8	67,8	45,8
PbO <sub>2</sub> (s)	-277	-217	68,6	64,6
Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	-718	-601	211,3	146,9
Pb <sub>3</sub> O <sub>4</sub> (s)	-100	-98,7	91,2	49,5
PbS(s)	-100	-98,7	91,2	49,5
PbSO <sub>4</sub> (s)	-920	-813	148,5	103,2

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
PbSeO <sub>4</sub> (s)	-609	-505	167,8	---
PbSiO <sub>3</sub> (s)	-1146	-1062	109,6	90
Pb <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	-1363	-1253	186,6	137,2
<b>Pd(s)</b>	0	0	37,6	26
Pd(g)	378,2	339,7	167,1	20,8
Pd <sup>2+</sup> (ac)	149	176,5	-184	---
PdS(s)	-75	-67	46	---
<b>Pt(s)</b>	0	0	41,6	25,9
Pt(g)	565,3	520,5	192,4	25,5
Pt <sup>2+</sup> (ac)	---	254,8	---	---
PtS(s)	-81,6	-76,1	55,1	43,4
PtS <sub>2</sub> (s)	-109	-99,6	74,7	65,9
<b>Rb(s)</b>	0	0	76,8	31,1
Rb(g)	80,9	53,1	170,1	20,8
Rb <sup>+</sup> (ac)	-251,1	---	121,8	---
RbBr(s)	-395	-382	110	52,8
Rb <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (s)	-1136	-1051	181,3	117,6
RbCl(s)	-435	-408	95,9	52,4
RbClO <sub>4</sub> (s)	-437	-307	161,1	---
RbF(s)	-558	-519	---	52,7
RbNO <sub>3</sub> (s)	-495	-396	147,3	102,1
RbOH(s)	-419	-374	94	69
RbOH(g)	-238	-239	248,5	49,5
Rb <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-1436	-1317	197,4	134,1
<b>Re(s)</b>	0	0	36,9	25,5
Re(g)	769,9	724,6	188,9	20,8
ReCl <sub>3</sub> (s)	-264	-188	123,8	92,4
Re <sub>2</sub> O <sub>7</sub> (s)	-1240	-1066	207,1	166,1
<b>Rh(s)</b>	0	0	31,5	25
Rh(g)	556,9	510,8	185,8	21
<b>Rn(g)</b>	0	0	176,2	20,8
<b>Ru(s)</b>	0	0	28,5	24,1
Ru(g)	642,7	595,8	186,5	21,5
RuO <sub>4</sub> (s)	-239	-152	146,4	---
<b>S(s, rómbico)</b>	0	0	32,1	22,6
S(g)	277,2	236,7	167,8	23,7
S <sup>=</sup> (g)	636	---	---	---
S <sup>=</sup> (ac)	33,1	85,8	-14,6	---
HS <sup>-</sup> (ac)	-16,3	---	67	---
SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (ac)	-909,3	-744,5	20,1	-293
SO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (ac)	-486,6	-635,5	-29,3	---
HSO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (ac)	-626,2	-527,7	139,7	---
SF <sub>4</sub> (g)	-763	-722	299,6	77,6
SF <sub>6</sub> (g)	-1209	-1105,4	291,7	97,3
H <sub>2</sub> S(g)	-20,6	-33,4	205,8	34,2
SO <sub>2</sub> (g)	-297	-300	248,2	39,9
SO <sub>3</sub> (s)	-455	-374	70,7	---
SO <sub>3</sub> (l)	-441	-374	113,8	---
SO <sub>3</sub> (g)	-396	-371	256,8	50,7
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (l)	-814	-690	156,9	138,9
<b>Sb(s)</b>	0	0	45,7	25,2
Sb(g)	262,3	222,1	180,3	20,8
Sb <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	-972	-829	125,1	---
SbBr <sub>3</sub> (s)	-259	-239	207,1	---
SbCl <sub>3</sub> (s)	-382	-324	184,1	107,9
SbCl <sub>3</sub> (g)	-314	-301	337,7	76,7
SbH <sub>3</sub> (g)	145,1	147,8	232,8	41,1
<b>Sc(s)</b>	0	0	34,6	25,5
Sc(g)	377,8	336	174,8	22,1
Sc <sup>+3</sup> (ac)	-614,2	-586,6	-255	---
Sc <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1909	-1819	77	94,2
<b>Se(s, gris)</b>	0	0	42,4	25,4
Se(g)	227,1	187	176,7	20,8
Se <sup>=</sup> (ac)	---	129,3	---	---
HSe <sup>-</sup> (ac)	15,9	44	79	---
HSeO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (ac)	-514,6	-411,5	135,1	---
HSeO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (ac)	-581,6	-452,2	149,4	---
SeO <sub>3</sub> <sup>=</sup> (ac)	-509,2	-369,8	13	---
SeO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (ac)	-599,1	-441,3	54	---
H <sub>2</sub> Se(g)	29,7	15,9	219	34,7
<b>Si(s)</b>	0	0	18,8	20

TABLAS DE TERMOQUÍMICA

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
Si(g)	450	405,5	168	22,3
H <sub>4</sub> Si(g)	34,3	56,9	204,6	42,8
SiF <sub>4</sub> (g)	-1615	-1572,8	282,7	73,6
SiCl <sub>4</sub> (l)	-687	-619,9	239,7	145
SiC(s, cúbico)	-65,3	-62,8	16,6	26,9
SiO <sub>2</sub> (s, α)	-911	-856	41,5	44,4
H <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (s)	-1189	-1092	134	---
H <sub>4</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	-1481	-1333	192	---
<b>Sn(s, blanco)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>51,2</b>	<b>27</b>
Sn(s, gris)	-2,1	0,1	44,1	25,8
Sn(g)	301,2	266,2	168,5	21,3
Sn <sup>2+</sup> (ac)	-8,9	-27,2	-16,7	---
Sn <sup>4+</sup> (ac)	30,5	2,5	-117	---
SnOH <sup>+</sup> (ac)	-286,2	-254,8	50	---
SnBr <sub>4</sub> (s)	-377	-350	264,4	---
SnBr <sub>2</sub> (g)	-315	-331	411,9	103,4
SnCl <sub>4</sub> (l)	-511	-440	258,6	165,3
SnCl <sub>4</sub> (g)	-472	-432	365,8	98,3
SnO(s)	-281	-252	57,2	44,3
SnO(g)	15,1	-8,4	232,1	31,6
SnO <sub>2</sub> (s)	-578	-516	49	52,6
Sn(OH) <sub>2</sub> (s)	-561	-492	155	---
SnS(s)	-100	-98,3	77	49,3
<b>Sr(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>55</b>	<b>26,8</b>
Sr(g)	164,4	130,9	164,6	20,8
Sr <sup>2+</sup> (ac)	-545,8	-559,48	-32,6	---
SrOH <sup>+</sup> (ac)	---	-721,3	---	---
SrBr <sub>2</sub> (s)	-718	-697	135,1	75,3
SrCO <sub>3</sub> (s)	-1220,1	-1140,1	97,1	81,4
SrCl <sub>2</sub> (s)	-829	-781	114,9	75,6
SrF <sub>2</sub> (s)	-1216	-1165	82,1	70
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-978	-780	194,6	149,9
SrO(s)	-592	-562	54,4	45
SrS(s)	-472	-468	68,2	48,7
SrSO <sub>4</sub> (s)	-1453	-1341	117	---
SrSiO <sub>3</sub> (s)	-1634	-1550	96,7	88,5
Sr <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	-2305	-2191	153,1	134,3
<b>Ta(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>41,5</b>	<b>25,4</b>
Ta(g)	782	739,3	185,2	20,9
Ta <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	-2046	-1911	143,1	135,1
<b>Te(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>49,7</b>	<b>25,7</b>
Te(g)	196,7	157,1	182,7	20,8
TeCl <sub>4</sub> (s)	-326	---	---	138,5
TeO <sub>2</sub> (s)	-323	-270	79,5	---
<b>Ti(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>30,7</b>	<b>25</b>
Ti(g)	473	428,4	180,3	24,4
TiBr <sub>3</sub> (s)	-549	-524	176,6	101,7
TiBr <sub>4</sub> (s)	-617	-590	243,5	131,5
TiBr <sub>4</sub> (g)	-549	-568	398,4	100,8
TiCl <sub>2</sub> (s)	-514	-464	87,4	69,8
TiCl <sub>3</sub> (s)	-721	-654	139,7	97,2
TiCl <sub>4</sub> (l)	-804	-737	252,3	145,2
TiCl <sub>4</sub> (g)	-763	-726	353,2	95,4
TiI <sub>4</sub> (s)	-376	-372	249,4	125,7
TiO(s)	-520	-495	50	40
TiO <sub>2</sub> (s, rutilo)	-944	-889	50,6	55
Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1521	-1434	78,8	97,4
<b>Tl(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>64,2</b>	<b>26,3</b>
Tl(g)	182,2	147,4	181	20,8
Tl <sup>+</sup> (ac)	5,4	-32,4	125,5	---
Tl <sup>3+</sup> (ac)	196,6	214,6	-192	---
TlOH <sup>+</sup> (ac)	---	-15,9	---	---
Tl(OH) <sub>2</sub> <sup>+</sup> (ac)	---	-244,7	---	---
TlBr(s)	-173	-167	120,5	---
Tl <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> (s)	-700	-614,6	155,2	---
TlCl(s)	-204	-185	111,3	50,9
TlI(s)	-124	-125	127,6	---
TlNO <sub>3</sub> (s)	-244	-152	160,7	99,5
Tl <sub>2</sub> O(s)	-179	-147	126	---
TlOH(s)	-239	-196	88	---
Tl <sub>2</sub> S(s)	-97,1	-93,7	151	---
Tl <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (s)	-932	-830	230,5	---

Fórmula	$\Delta H_f^\circ$ kJ/mol	$\Delta G_f^\circ$ kJ/mol	$S^\circ$ J/mol·K	$C_p$ J/mol·K
Tl <sub>2</sub> Se(s)	-59	-59	172	---
<b>U(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>50,2</b>	<b>27,7</b>
U(g)	533	488,4	199,8	23,7
U <sup>-3</sup> (ac)	-489,1	-476,2	-188	---
U <sup>4+</sup> (ac)	-591,2	-531	-410	---
UO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> (ac)	-1019	-953,5	-98,2	---
UCl <sub>3</sub> (s)	-867	-799	159	102,5
UCl <sub>4</sub> (s)	-1019	-930	197,1	122
UCl <sub>4</sub> (g)	-810	-787	419	---
UCl <sub>6</sub> (s)	-1092	-962	285,8	175,7
UCl <sub>6</sub> (g)	-1013	-928	431	---
UF <sub>6</sub> (g)	-2112,9	-2029,2	379,7	---
UO <sub>2</sub> (s)	-1085	-1032	77	63,6
UO <sub>2</sub> (g)	-466	-472	274,6	51,4
UO <sub>3</sub> (s)	-1224	-1146	96,1	81,7
<b>V(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>28,9</b>	<b>24,9</b>
V(g)	514,2	754,4	182,3	26
VO <sub>2</sub> <sup>+</sup> (ac)	-650	-587	---	---
VO <sub>2</sub> <sup>2+</sup> (ac)	-487	-446	---	---
VO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (ac)	-888	-784	50	---
HVO <sub>4</sub> <sup>-</sup> (ac)	-1159	-975	---	---
VO <sub>4</sub> <sup>3-</sup> (ac)	---	-899	---	---
VCl <sub>3</sub> (s)	-581	-511	131	93,2
VCl <sub>4</sub> (l)	-569	-504	255	---
VCl <sub>4</sub> (g)	-526	-492	362,4	96,2
VF <sub>5</sub> (l)	-1480	-1373	175,7	---
VF <sub>5</sub> (g)	-1434	-1370	320,9	98,6
VOCI(s)	-607	-556	75	---
VOCl <sub>3</sub> (l)	-735	-669	244	---
VOCl <sub>3</sub> (g)	-696	-659,3	344,2	89,9
V <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1219	-1139	98,3	103,2
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (s)	-1551	-1420	131	127,7
V <sub>3</sub> O <sub>5</sub> (s)	-1933	-1803	163	---
<b>W(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>32,6</b>	<b>24,3</b>
W(g)	849,4	807,1	174	21,3
WO <sub>4</sub> <sup>=</sup> (ac)	-1075,7	---	---	---
WO <sub>2</sub> (s)	-590	-534	50,5	56,1
WO <sub>3</sub> (s)	-843	-764	75,9	73,8
<b>Xe(g)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>169,7</b>	<b>20,8</b>
XeF <sub>4</sub> (s)	-262	---	---	---
<b>Y(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>44,4</b>	<b>26,5</b>
Y(g)	421,3	381,1	179,5	25,9
Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (s)	-1905	-1817	99,1	102,5
<b>Zn(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>41,6</b>	<b>25,4</b>
Zn(g)	130,4	94,8	161	20,8
Zn <sup>2+</sup> (ac)	-153,9	-147,1	-112,1	46
Zn(CN) <sub>4</sub> <sup>=</sup>	342,3	446,9	226	---
Zn(NH <sub>3</sub> ) <sub>4</sub> <sup>2+</sup> (ac)	-533,5	-301,9	301	---
ZnOH <sup>+</sup> (ac)	---	-330,1	---	---
Zn(OH) <sub>4</sub> <sup>=</sup> (ac)	---	-858,5	---	---
ZnBr <sub>2</sub> (s)	-329	-312	138,5	---
ZnCO <sub>3</sub> (s)	-812,8	-731,5	82,4	79,7
ZnCl <sub>2</sub> (s)	-415	-369	111,5	71,3
ZnF <sub>2</sub> (s)	-764	-713	73,7	65,7
ZnI <sub>2</sub> (s)	-208	-209	161,1	---
ZnO(s)	-351	-321	43,7	40,3
Zn(OH) <sub>2</sub> (s)	-642	-554	81,2	---
ZnS(s)	-206	-201	57,7	46
ZnSO <sub>4</sub> (s)	-983	-872	110,5	99,2
ZnSe(s)	-163	-163	84	---
Zn <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub> (s)	-1637	-1523	131,4	123,3
<b>Zr(s)</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>39</b>	<b>25,4</b>
Zr(g)	608,8	566,5	181,4	26,7
ZrCl <sub>4</sub> (s)	-981	-890	181,6	119,8
ZrCl <sub>4</sub> (g)	-870	-836	368	98,3
ZrF <sub>4</sub> (s, monoclinico)	-1911	-1810	105	103,7
ZrF <sub>4</sub> (g)	-1674	-1636	319	87,4
ZrO <sub>2</sub> (s)	-1101	-1043	50,4	56,2
Zr(SO <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> (s)	-2217	---	---	172
ZrSiO <sub>4</sub> (s)	-2033	-1919	84,1	98,7

## **Anexo 4. Índices de trituración**

---

Tabla 27.1. Indices de trabajo para trituración seca†  
o molienda húmeda‡

Material	Dens. rel.	Indice de trabajo, $W_i$
Bauxita	2,20	8,78
Clinker de cemento	3,15	13,45
Materias primas de cemento	2,67	10,51
Arcilla	2,51	6,30
Carbón	1,4	13,00
Coque	1,31	15,13
Granito	2,66	15,13
Grava	2,66	16,06
Yeso	2,69	6,73
Míneral de hierro (hematites)	3,53	12,84
Piedra caliza	2,66	12,74
Roca fosfática	2,74	9,92
Cuarzo	2,65	13,57
Pizarra	2,63	15,87
Esquistos	2,57	14,30
Roca volcánica	2,87	19,32

† Para molienda seca, multiplicar por 4/3.

‡ Tomada de Allis-Chalmers, Solids Processing Equipment Div., Appleton, Wis., con autorización.

$$\dot{m} = 100 \text{ ton/h}$$

$$D_{pa} = 2 \times 25,4 = 50,8 \text{ mm} \quad D_{pb} = 0,125 \times 25,4 = 3,175 \text{ mm}$$

La potencia requerida es

$$P = 100 \times 0,3162 \times 12,74 \left( \frac{1}{\sqrt{3,175}} - \frac{1}{\sqrt{50,8}} \right)$$

$$= 169,6 \text{ kW (227 CV)}$$

$$l_{ca} = 2000 \text{ lb} = 0,9071846 \text{ t}$$

### Simulación por ordenador de las operaciones de molienda

La distribución de tamaños de los productos en los diferentes tipos de equipos de reducción de tamaños se puede predecir mediante una simulación por ordenador del proceso de desintegración<sup>7b, 8</sup>. Con esta finalidad se utilizan dos conceptos básicos, una *función de velocidad de molienda*  $S_u$  y una *función de rotura*  $\Delta B_{n, u}$ . El material de un molino o triturador está formado en un determinado momento por partículas de muchos tamaños diferentes, y todas ellas interaccionan entre sí durante el proceso de reducción de tamaños, pero para los fines de la simulación por ordenador se supone que el material está dividido en un número de fracciones discretas (tales como las retenidas sobre los distintos tamices normalizados) y