

























































## EVAPORADOR

El sistema está constituido por un evaporador, que en el caso del modelo de laboratorio se trata de un tubo vertical.

El evaporador es parte del sistema integrado formado por un reactor de compostaje, el evaporador y un enfriador. La función del evaporador es la de obtener un fertilizante líquido, rico en nitrógeno y potasio, mediante la evaporación de parte del agua de la orina procedente del sistema de producción porcina. El medio utilizado para conseguir la evaporación del agua es el flujo de aire de recirculación procedente del reactor de compostaje. Desde la parte inferior del evaporador entra este flujo de aire. Dicho aire está lo suficientemente caliente (debido al calor transmitido durante el proceso de compostaje) para provocar la evaporación del agua. Aún más, este flujo contiene cierta cantidad de amoníaco que ha arrastrado a su paso por el compostador. Este amoníaco es el resultado de la degradación de compuestos nitrogenados, principalmente proteínas.

Así, la concentración de amoníaco en la orina es debida a dos factores, la evaporación del agua como tal y el amoníaco arrastrado por el flujo de aire, que pasa al concentrado líquido en el evaporador.

Se necesita cierta cantidad de ácido nítrico (flujo) en el sistema para forzar que el amoníaco que viene en el flujo de aire pase al líquido concentrado.

Dicho flujo de ácido nítrico se determina igualmente en el modelo.

En el sistema, tienen lugar transferencias de materia y calor. Los principales factores son el flujo de aire, la humedad y el calor.

En relación con el flujo de aire, las principales magnitudes a tener en cuenta son la temperatura, el flujo y no menos importante, la concentración de amoníaco.

Igualmente, el flujo de aire que sale del evaporador presenta una cierta temperatura, debida a su paso por el evaporador, así como a un incremento de humedad, a consecuencia del proceso de evaporación que tiene lugar. Se supone que el flujo de aire que sale del evaporador está saturado en vapor de agua.

Con respecto a la fracción de amoníaco en el flujo de aire saliente, al pasar el flujo de aire a través de la orina, y debido a la acidificación del medio<sup>4</sup>, el amoníaco pasa del flujo de aire a la orina, aumentando la concentración en la orina, no sólo debido al proceso de absorción, sino también debido a la evaporación de agua de la orina, que implica igualmente el incremento de la concentración de todos los componentes de la misma. En teoría, si el proceso de absorción ocurre correctamente, todo el amoníaco presente en el flujo de aire pasará a la orina.

Por tanto es necesario calcular y controlar el flujo de aire que pasa por el evaporador, para conseguir los objetivos fijados: evaporar el agua y pasar el amoníaco del aire a la orina.

Para ello también es necesario determinar el nivel de orina en el evaporador, que estará relacionado con la longitud que el aire debe atravesar para alcanzar el estado de saturación y liberar todo el amoníaco.

---

<sup>4</sup> Teniendo en cuenta el equilibrio de la reacción, al aumenta el pH, el equilibrio se desplazará hacia la formación de amonio, en lugar de amoníaco, y así será retenido en el concentrado líquido:  $\text{NH}_3 + \text{H}^+ \leftrightarrow \text{NH}_4$

Para provocar la evaporación del agua de la orina, la temperatura requerida es superior a la del flujo de aire entrante. Por tanto, es necesaria otra fuente de calor suplementaria. En este caso, dicha fuente de calor es la camisa de agua que rodea al evaporador.

Dicho sistema mantiene la temperatura deseada en el evaporador.

Respecto a la orina, existen dos sistemas que controlan la orina que entra y sale del evaporador.

Puesto que el objetivo principal en el evaporador es concentrar la orina, se utiliza un medidor de conductividad, que mide la conductividad eléctrica de la orina que entra y sale del evaporador. Este sistema determina si la orina es recirculada en el evaporador o definitivamente sale del sistema (cuando la concentración es la adecuada).

Este cambio de la conductividad se debe a la variación de los iones presentes en el líquido (incremento o disminución). En este caso, dichos iones son principalmente los procedentes del nitrato de amonio ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ).

El flujo de orina por el evaporador depende también del nivel de orina en el mismo. Como ya se ha mencionado anteriormente, este nivel debe fijarse al calculado para conseguir los niveles óptimos de evaporación de agua y absorción de amoniaco.

Así, el flujo de orina que sale del evaporador debería ser igual al que entra en el mismo, de modo que el nivel de orina dentro del evaporador no cambia.

Al mismo tiempo, se mide el pH en el medio para mantener las condiciones óptimas (acidificación) para facilitar la absorción de amoniaco.

La estabilización del pH (ácido) se consigue mediante la adición de ácido nítrico al sistema. En este caso es necesario tener en cuenta el flujo que entra de ácido nítrico.

Debido a los diferentes balances de materia que tienen lugar en el evaporador, las presiones parciales de los gases son magnitudes importantes a tener en cuenta en el modelo.

VARIABLES DE ESTADO EN EL SISTEMA:

- Temperatura
- Humedad del flujo de aire
- Concentración de amoniaco
- pH

INPUTS:

- Flujo de aire
- Composición de la orina
- Flujo de ácido nítrico

OUTPUTS:

- Medidas del flujo de aire saliente
- pH del líquido en el evaporador
- Conductividad eléctrica
- Nivel de orina en el evaporador

Estos factores están relacionados entre sí por varios parámetros a través de balances de materia y calor. Así como mediante relaciones indirectas como aquellas entre la conductividad y la concentración de determinados componentes.

## MODELO DEL EVAPORADOR

Este texto explica el modelo matemático desarrollado para representar el proceso de evaporación que tiene lugar en el sistema, que al mismo tiempo es parte del proceso completo que tiene lugar en el sistema global objeto del estudio.

Es posible dividir el modelo en dos partes; una relacionada con los procesos de transferencia de materia que tienen lugar durante la evaporación, y el segundo, relacionado con la transferencia de calor.

Para el primero, el modelo ha sido desarrollado utilizando balances de materia. Por tanto, esta parte del modelo está enfocada en el problema de establecer los diferentes balances de materia que tienen lugar dentro del evaporador. Con este modelo es posible determinar los diferentes flujos que entran y salen del evaporador.

Para el segundo, las ecuaciones de transferencia de calor han sido desarrolladas y utilizadas para construir la parte del modelo correspondiente.

Para desarrollar el modelo se han seguido una serie de pasos:

- Formulación de la teoría:

La teoría de balances de materia y de calor ha sido utilizada para desarrollar el modelo.

- Desarrollo del modelo matemático:

Partiendo de las ecuaciones de balances de materia y calor es posible desarrollar el modelo matemático que representa el proceso que ocurre en el evaporador. Así se establecen las ecuaciones que representan los diferentes flujos en el sistema, así como las transferencias de calor.

- Verificación:

Una vez desarrollado el modelo, era necesario chequearlo y comprobar si funcionaba o no. Para ello, se comprobó que los resultados obtenidos con las ecuaciones coincidían con los balances de materia esperados. Por lo que se puede decir que el modelo funciona apropiadamente.

### Balance de amoníaco (NH<sub>3</sub>):

$$Q_{in} \cdot G_{inNH_3} + F_u \cdot U_{inNH_3} - F_{pr} \cdot P_{outNH_3} = 0$$

donde:

Q<sub>in</sub>: flujo de aire entrante en el evaporador

G<sub>inNH<sub>3</sub></sub>: fracción de amoníaco en el flujo de aire entrante

F<sub>u</sub>: flujo de orina que entra en el evaporador

U<sub>inNH<sub>3</sub></sub>: fracción de amoníaco en la orina

F<sub>pr</sub>: flujo de producto que sale del evaporador

P<sub>outNH<sub>3</sub></sub>: fracción de amoníaco en el flujo de producto saliente

### Balance de agua (H<sub>2</sub>O):

$$F_u \cdot U_{inH_2O} + Q_{in} \cdot G_{inH_2O} + F_{ac} \cdot Ac_{inH_2O} - F_{pr} \cdot P_{outH_2O} - GAS_{out} \cdot Gas_{outH_2O} = 0$$

donde:

F<sub>u</sub>: flujo de orina que entra en el evaporador

U<sub>inH<sub>2</sub>O</sub>: fracción de agua en la orina

Q<sub>in</sub>: flujo de aire entrante en el evaporador

G<sub>inH<sub>2</sub>O</sub>: fracción de agua en el flujo de aire entrante

F<sub>ac</sub>: flujo de ácido nítrico que entra al evaporador

Ac<sub>inH<sub>2</sub>O</sub>: fracción de agua en el flujo de ácido nítrico

F<sub>pr</sub>: flujo de producto que sale del evaporador

P<sub>outH<sub>2</sub>O</sub>: fracción de agua en el flujo de producto saliente

GAS<sub>out</sub>: flujo de aire que sale del evaporador

Gas<sub>outH<sub>2</sub>O</sub>: fracción de agua en el aire saliente

### Balance de nitrato (NO<sub>3</sub>):

$$F_{ac} \cdot Ac_{inNO_3} - F_{pr} \cdot P_{outNO_3} = 0$$

donde:

F<sub>ac</sub>: flujo de ácido nítrico que entra al evaporador

Ac<sub>inNO<sub>3</sub></sub>: fracción de nitrato en el flujo de ácido nítrico

F<sub>pr</sub>: flujo de producto que sale del evaporador

P<sub>outNO<sub>3</sub></sub>: fracción de nitrato en el flujo de producto saliente

**Balance de gases (secos):**

$$Q_{in} \cdot (G_{in_{N_2}} + G_{in_{O_2}} + G_{in_{CO_2}}) - GAS_{out} \cdot (Gas_{out_{N_2}} + Gas_{out_{O_2}} + Gas_{out_{CO_2}}) = 0$$

donde:

$Q_{in}$ : flujo de aire entrante en el evaporador

$G_{in_{N_2}}$ : fracción de nitrógeno en el flujo de aire entrante

$G_{in_{O_2}}$ : fracción de oxígeno en el flujo de aire entrante

$G_{in_{CO_2}}$ : fracción de dióxido de carbono en el flujo de aire entrante

$GAS_{out}$ : flujo de aire que sale del evaporador

$Gas_{out_{N_2}}$ : fracción de nitrógeno en el aire saliente

$Gas_{out_{O_2}}$ : fracción de oxígeno en el aire saliente

$Gas_{out_{CO_2}}$ : fracción de dióxido de carbono en el aire saliente

El siguiente paso para verificar el modelo era utilizar los datos procedentes de las mediciones en el laboratorio y chequear si los resultados obtenidos en laboratorio coincidían con los obtenidos de las ecuaciones desarrolladas en el modelo.

Una vez verificado, se comprobó que el modelo funcionaba.

**Modelo del evaporador (transferencia de materia):**

El modelo matemático para el evaporador está constituido por dos archivos diferentes ligados entre sí por comandos de referencia.

Estos dos archivos son:

- Evaporator model T based
- Application evaporator T based

A continuación se presenta una descripción de cada uno de ellos.

### 1. *Evaporator model T based:*

Este archivo contiene todas las ecuaciones que representan las transferencias de materia que tienen lugar en el evaporador.

De este modo se definen:

- Flujo de orina a tratar
- Flujo de orina concentrada que sale del evaporador
- Flujo de gas en el evaporador (procedente del reactor de compostaje)
- Flujo de gas que sale del evaporador
- Flujo de ácido nítrico que entra al evaporador

Todos estos flujos están representados por ecuaciones dependientes del flujo de aire entrante al evaporador procedente del reactor (flujo de recirculación).

Este flujo entrante se fija como un valor conocido. Por tanto, el resto de flujos se obtienen una vez fijado el flujo de aire de recirculación.

Igualmente, se suponen conocidos todos los valores relacionados con el flujo de aire entrante, el flujo de orina a tratar, el flujo de orina concentrada (puesto que este es el producto buscado y las características del mismo son conocidas) y finalmente, la composición del ácido nítrico.

La composición del flujo de aire saliente depende de la composición del flujo entrante y de la temperatura en el evaporador.

### 2. *Application evaporator T based:*

Este archivo representa los resultados obtenidos del cálculo del archivo “Evaporator model T based”.

En lugar de fijar la temperatura a un determinado valor, es posible modificar las ecuaciones y ponerlas en función del flujo de aire entrante y de la temperatura en el evaporador (temperatura de evaporación).

En la aplicación informática se han desarrollado una serie de gráficos, que representan la variación del flujo de aire saliente del evaporador cuando varían el flujo de aire entrante y/o la temperatura en el evaporador.











## ENFRIADOR

En el sistema integrado, después del evaporador, el flujo de aire calentado y saturado es enfriado en una bomba de calor (o cambiador de calor), donde se producen calor y agua condensada. El calor es transferido de la bomba de calor al evaporador. Utilizando una bomba de calor, el calor producido en el reactor (por la degradación aeróbica de compuestos orgánicos), puede ser reutilizado varias veces para evaporar el agua de la orina. El calor puede ser también utilizado para aumentar la temperatura del flujo de aire entrante en el evaporador. Esto es simplemente cuestión de cambiar el agente enfriador (orina o flujo de aire) a poner en contacto con el agente caliente (flujo de aire procedente del evaporador).

Cuando no es necesario calentar el flujo de aire procedente del reactor, este flujo de aire se bombea directamente al evaporador.

En el sistema a escala del laboratorio, este cambiador de calor es un enfriador, pero en lugar de orina, se utiliza un agente refrigerante para enfriar el flujo de aire. La orina se introduce directamente en el evaporador sin haber sido previamente calentada, puesto que el flujo no es muy grande y no es necesario. Así, el flujo de aire se trata igual que en sistema integrado; no así la orina.

Debido al enfriamiento del flujo de aire, se produce un flujo de agua condensada. Este flujo no es necesario en el sistema. Por lo que es eliminado del mismo.

### **Modelo del enfriador:**

El modelo del enfriador simula el proceso de transferencia de calor en el interior del enfriador.

También se tiene en cuenta la transferencia de masa, que en este caso se refiere al agua condensada procedente del flujo de aire de recirculación.

Para desarrollar el modelo se ha seguido una serie de pasos:

- **Formulación de la teoría:**

La teoría de balances de calor aplicada en este tipo de intercambiadores de calor es la que se ha utilizado para desarrollar esta parte del modelo matemático; igualmente, lo correspondiente a transferencia de materia.

- **Desarrollo del modelo:**

Para ello se han utilizado las ecuaciones de balance de materia y de calor.

- **Verificación:**

Estableciendo los balances de materia en el enfriador ha sido posible comprobar el funcionamiento del modelo matemático. El siguiente paso era la validación del modelo utilizando los datos obtenidos del sistema a escala del laboratorio.

Los diferentes flujos que entran y salen del enfriador son los siguientes:

$U_{cin}$ : flujo de orina entrante

$U_{cout}$ : flujo de orina saliente

$Q_{cin}$ : flujo de aire entrante

$Q_{cout}$ : flujo de aire saliente

$F_{cond}$ : flujo de agua condensada

En el sistema a escala del laboratorio, el flujo entrante de orina procede de un frigorífico. De ahí pasa directamente al evaporador.

En el sistema integrado, la orina procedería de los tanques donde se ha ido almacenando la fracción líquida separada de los purines en la explotación porcina. En este caso, antes de entrar al evaporador, el flujo de orina pasaría por el enfriador (como refrigerante) y al entrar en contacto con el flujo de aire de recirculación (procedente del evaporador) sería calentado.

El modelo matemático del enfriador permite simular este intercambio de calor entre el flujo de aire y la orina.

Puesto que algunos de los flujos que aparecen en esta parte del modelo también están en el modelo del evaporador, ambas partes del modelo matemático están ligadas, así como otras también interrelacionadas.

Utilizando los balances de materia ha sido posible definir el flujo de aire saliente del enfriador, como una función del flujo de aire entrante en el mismo y la temperatura de condensación. Igualmente, el flujo de agua condensada se establece en función del flujo de aire entrante y el saliente.

Así, la cantidad de agua condensada se define como sigue:

$$q_{cond}(Gas_{out}, Q_{cout}) := \frac{C_{sat}(Gas_{outTf}) \cdot Gas_{outFLOW} - C_{sat}(Q_{coutTf}) \cdot Q_{coutFLOW}}{M_{H2O}}$$

Donde:

$Gas_{outFLOW}$ : flujo de aire entrante en el condensador (que es el saliente del evaporador)

$Q_{coutFLOW}$ : flujo de aire saliente del condensador

$C_{sat}$ : cantidad de vapor de agua en el flujo de aire, en función de la temperatura

$Gas_{outTf}$ : temperatura del flujo de aire entrante en el condensador

$Q_{coutTf}$ : temperatura del aire saliente del condensador

Del mismo modo, la cantidad de flujo de aire procedente del enfriador se representa mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Airflow}_{\text{out}}(\text{Gas}_{\text{out}}, T_{\text{cond}}) := \text{Gas}_{\text{out}}_{\text{FLOW}} \cdot \left( \frac{\frac{1}{V_{\text{mol}}(\text{Gas}_{\text{outTf}}, P)} - \frac{C_{\text{sat}}(\text{Gas}_{\text{outTf}})}{M_{\text{H}_2\text{O}}}}{\frac{1}{V_{\text{mol}}(T_{\text{cond}}, P)} - \frac{C_{\text{sat}}(T_{\text{cond}})}{M_{\text{H}_2\text{O}}}} \right)$$

Donde:

$\text{Gas}_{\text{out}}$ : flujo de aire entrante al condensador

$T_{\text{cond}}$ : temperatura en el condensador

$V_{\text{mol}}$ : volumen del gas, en función de la temperatura y la presión

$\text{Gas}_{\text{outTf}}$ : temperatura del flujo de aire entrante al condensador

P: presión

$C_{\text{sat}}$ : cantidad de vapor de agua en el flujo de aire, en función de la temperatura

$M_{\text{H}_2\text{O}}$ : masa molecular del agua

Más abajo es posible ver los balances de calor en el enfriador para ambos casos, el sistema a escala del laboratorio y el sistema integrado.

La temperatura de condensación se ha fijado como un valor conocido. Como ya se ha dicho, se supone que se alcanza el equilibrio. Así, la temperatura del flujo de aire que sale del enfriador es igual a la temperatura de condensación. Ocurre lo mismo con el flujo de agua condensada.

En el caso del sistema a escala del laboratorio, puesto que el refrigerante no tiene otra función más que como tal, el modelo matemático se simplifica bastante, y así, lo único a tener en cuenta es que el sistema de refrigeración mantiene la temperatura de condensación al valor necesario por el sistema, independientemente.

Es necesario fijar el coeficiente global de transferencia de calor para el enfriador.

Sin embargo, el usuario tiene la posibilidad de cambiar el valor de dicho coeficiente y estudiar cómo influye esta variación en la superficie del enfriador.

En el caso del sistema integrado, la temperatura de condensación se fija, como ya se ha dicho, y la única temperatura a calcular es la del flujo de orina saliente del enfriador. Esto es así porque, como ya se ha mencionado, la temperatura del flujo de aire saliente es igual a la de condensación (a causa del equilibrio). Las temperaturas del flujo de aire entrante y del flujo de orina entrante son también conocidas.

Así, fijada la temperatura del flujo de aire entrante en el enfriador y la temperatura de condensación, puesto que la temperatura del flujo de aire saliente es igual a la de condensación, únicamente la temperatura del flujo de orina saliente es la que tiene que ser definida.

Es necesario tener en cuenta que en el caso de un flujo de aire elevado, el sistema de enfriado podría no ser suficiente y así, en el modelo matemático, la temperatura del flujo de orina saliente sería mayor que la del flujo de aire entrante. Para resolver esto, se ha definido una función booleana de modo que, cuando ocurre esto, la temperatura del flujo de orina saliente se iguala a la temperatura del flujo de aire entrante; si no ocurre esto, la temperatura será la definida por la función descrita a continuación.

El balance de calor en el enfriador para el sistema integrado es como sigue:

$$Q_{\text{cooler}} := \left( \text{Gas}_{\text{out}_{Tf}} - Q_{\text{cout}_{Tf}} \right) \cdot Q_{\text{cout}_{\text{FLOW}}} \cdot \left[ C_{\text{pair}} + \text{AH} \left( Q_{\text{cout}_{Tf}} \right) \cdot \left( C_{\text{pwg}} - C_{\text{pair}} \right) \right] \dots \\ + q_{\text{cond}} \left( \text{Gas}_{\text{out}}, Q_{\text{cout}} \right) \cdot \left[ \Delta H \left( \text{Gas}_{\text{out}_{Tf}} \right) + \left( \text{Gas}_{\text{out}_{Tf}} - T_{\text{cond}} \right) \cdot C_{\text{pl}} \right]$$

Donde:

$\text{Gas}_{\text{out}_{Tf}}$ : temperatura del flujo de aire entrante en el condensador

$Q_{\text{cout}_{Tf}}$ : temperatura del flujo de aire saliente del condensador

$Q_{\text{cout}}$ : flujo de aire saliente del condensador

$C_{\text{pair}}$ : calor específico del aire

$\text{AH}$ : fracción molar del aire en función de la temperatura

$C_{\text{pwg}}$ : calor específico del vapor de agua

$q_{\text{cond}}$ : cantidad de agua condensada

$C_{\text{pl}}$ : calor específico del agua líquida

Del balance de calor, como función del flujo de orina, es posible calcular la temperatura del flujo de orina saliente:

$$\text{Urine}_{Tf} := \frac{Q_{\text{cooler}} \cdot M_{\text{urine}}}{C_{\text{purine}} \cdot A_0} + T_{\text{urine}}$$

$$T \left( \text{Urine}_{Tf} \right) := \text{if} \left( \text{Urine}_{Tf} > \text{Gas}_{\text{out}_{Tf}}, \text{Gas}_{\text{out}_{Tf}}, \text{Urine}_{Tf} \right)$$

Donde:

$\text{Urine}_{Tf}$ : temperatura del flujo de orina saliente

$Q_{\text{cooler}}$ : balance de calor en el condensador

$M_{\text{urine}}$ : masa molecular de la orina

$C_{\text{purine}}$ : calor específico de la orina

$A_0$ : superficie del condensador

$T_{\text{urine}}$ : temperatura del flujo de orina entrante

En el sistema a escala del laboratorio, el balance de calor es como sigue:

$$Q_{\text{cooler}} := \left( \text{Gas}_{\text{outTf}} - Q_{\text{coutTf}} \right) \cdot Q_{\text{coutFLOW}} \cdot \left[ C_{\text{pair}} + \text{AH} \left( Q_{\text{coutTf}} \right) \cdot \left( C_{\text{pwwg}} - C_{\text{pair}} \right) \right] \dots \blacksquare$$

$$+ q_{\text{cond}} \left( \text{Gas}_{\text{out}}, Q_{\text{cout}} \right) \cdot \left[ \Delta H \left( \text{Gas}_{\text{outTf}} \right) + \left( \text{Gas}_{\text{outTf}} - T_{\text{cond}} \right) \cdot C_{\text{pl}} \right]$$

$$Q_{\text{cooler}} := Q_{\text{AIR}} \blacksquare$$

Donde:

$\text{Gas}_{\text{outTf}}$ : temperatura del flujo de aire entrante en el condensador

$Q_{\text{coutTf}}$ : temperatura del flujo de aire saliente del condensador

$Q_{\text{coutFLOW}}$ : flujo de aire saliente del condensador

$C_{\text{pair}}$ : calor específico del aire

$\text{AH}$ : fracción molar del aire en función de la temperatura

$C_{\text{pwwg}}$ : calor específico del vapor de agua

$q_{\text{cond}}$ : cantidad de agua condensada

$C_{\text{pl}}$ : calor específico del agua líquida

$\Delta H$ : incremento de la entalpía, en función de la temperatura

En el caso del sistema integrado, el balance de calor para el flujo de aire es el mismo que en el sistema a escala de laboratorio. Pero para el flujo de orina, el balance de calor se define según la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{URINE}} := C_{\text{purine}} \cdot \left( U_{\text{coutTf}} - U_{\text{cinTf}} \right) \cdot U_{\text{cinFLOW}} \cdot \frac{1}{M_{\text{urine}}} \blacksquare$$

Donde:

$C_{\text{purine}}$ : calor específico de la orina

$U_{\text{coutTf}}$ : temperatura del flujo de orina saliente

$U_{\text{cinTf}}$ : temperatura del flujo de orina entrante

$U_{\text{cinFLOW}}$ : flujo de orina entrante

$M_{\text{urine}}$ : masa molar de la orina



La media logarítmica de la temperatura en el enfriador en el sistema integrado se define según la siguiente ecuación:

$$\Delta T_{\ln}(\text{Gas}_{\text{out}}, Q_{\text{cout}}, U_{\text{cin}}, U_{\text{cout}}) := \frac{(\text{Gas}_{\text{outTf}} - U_{\text{coutTf}}) - (Q_{\text{coutTf}} - U_{\text{cinTf}})}{\ln\left(\frac{\text{Gas}_{\text{outTf}} - U_{\text{coutTf}}}{Q_{\text{coutTf}} - U_{\text{cinTf}}}\right)}$$

Donde:

$\text{Gas}_{\text{outTf}}$ : temperatura del flujo de aire entrante en el condensador

$U_{\text{coutTf}}$ : temperatura del flujo de orina saliente del condensador

$Q_{\text{coutTf}}$ : temperatura del flujo de aire saliente del condensador

$U_{\text{cinTf}}$ : temperatura del flujo de orina entrante en el condensador

Al igual que en el caso del evaporador, el modelo matemático para el enfriador consta de varios ficheros. Concretamente, se trata de dos ficheros:

- Cooler
- Application cooler

#### 1. *Cooler*:

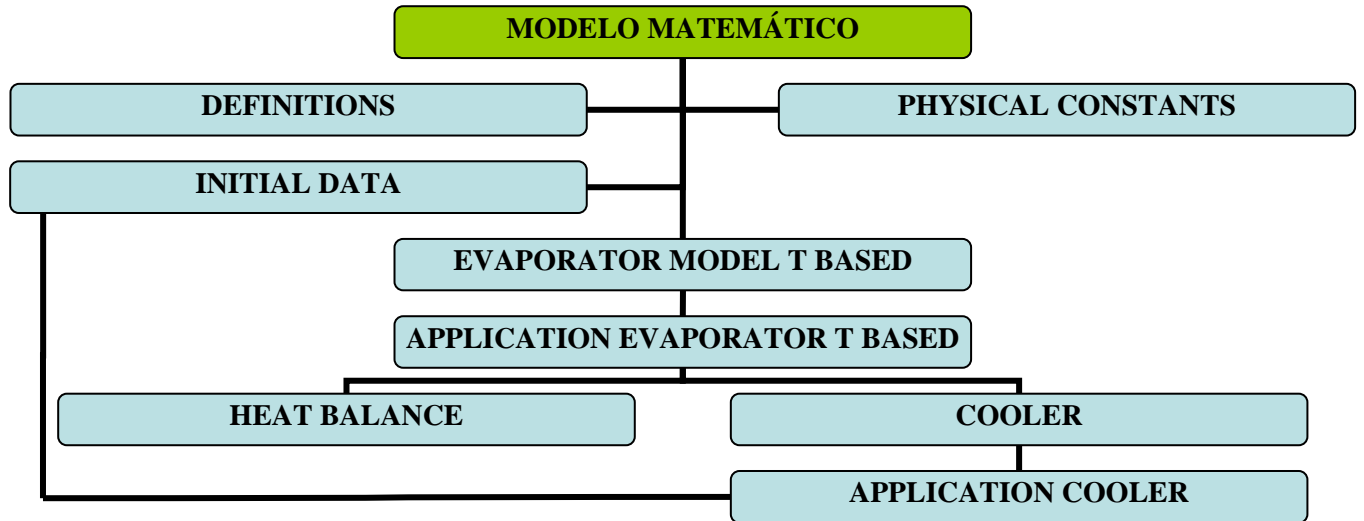
En este fichero se definen los distintos flujos presentes en el enfriador, así como el balance de calor en el mismo.

#### 2. *Application cooler*:

En este fichero se aplica lo definido en el fichero "Cooler" para poder estudiar la evolución de la temperatura de condensación en función de diversos parámetros. En el caso aplicado, el parámetro utilizado como variable es el flujo de aire entrante en el enfriador.

## DIAGRAMA DEL MODELO MATEMÁTICO

A continuación se presenta un esquema aclaratorio de las interrelaciones entre los distintos ficheros del modelo matemático:



## VALIDACIÓN DEL MODELO

### **Validación interna:**

Existen varios métodos o modos de chequear si el modelo matemático funciona correctamente.

El primer paso era chequear el modelo utilizando los balances de masa y calor en cada una de las unidades operacionales. De este modo es posible tener una primera idea de si el modelo está siendo desarrollado correctamente.

Con respecto a los balances de materia, estos han sido desarrollados para el evaporador y el enfriador. Es posible ver a continuación que dichos balances son correctos.

### **Evaporador:**

Balance de amoníaco (NH<sub>3</sub>):

$$Q_{in} \cdot G_{inNH_3} + F_u \cdot U_{inNH_3} - F_{pr} \cdot P_{outNH_3} \cdot \frac{1}{M_{urine}} = 0$$

Donde:

Q<sub>in</sub>: flujo de aire entrante en el evaporador

G<sub>inNH<sub>3</sub></sub>: fracción de amoníaco en el flujo de aire entrante

F<sub>u</sub>: flujo de orina entrante en el evaporador

U<sub>inNH<sub>3</sub></sub>: fracción de amoníaco en el flujo de orina

F<sub>pr</sub>: flujo de producto saliente del evaporador

P<sub>outNH<sub>3</sub></sub>: fracción de amoníaco en el producto saliente

M<sub>urine</sub>: masa molecular de la orina

Balance de agua:

$$F_u \cdot U_{inH_2O} + (F_{ac} \cdot Ac_{inH_2O} - F_{pr} \cdot P_{outH_2O}) \cdot \frac{1}{M_{H_2O}} + Q_{in} \cdot G_{inH_2O} - Gas_{outFLOW} \cdot Gas_{outH_2O} = 0$$

Donde:

$F_u$ : flujo de orina entrante en el evaporador

$U_{inH_2O}$ : fracción de agua en el flujo de orina

$F_{ac}$ : flujo de ácido nítrico

$Ac_{inH_2O}$ : fracción de agua en el ácido nítrico

$F_{pr}$ : flujo de producto saliente

$P_{outH_2O}$ : fracción de agua en el producto saliente

$M_{H_2O}$ : masa molecular del agua

$Q_{in}$ : flujo de aire entrante en el evaporador

$G_{inH_2O}$ : fracción de agua en el flujo de aire entrante

$Gas_{outFLOW}$ : flujo de aire saliente

$Gas_{outH_2O}$ : fracción de agua en el flujo de aire saliente

Balance de nitrato ( $NO_3$ ):

$$F_{ac} \cdot Ac_{inNO_3} - F_{pr} \cdot P_{outNO_3} = 0$$

Donde:

$F_{ac}$ : flujo de ácido nítrico

$Ac_{inNO_3}$ : fracción de nitrato en el ácido nítrico

$F_{pr}$ : flujo de producto saliente

$P_{outNO_3}$ : fracción de nitrato en el producto saliente

Balance de gases secos:

$$Q_{in} \cdot (G_{inN_2} + G_{inO_2} + G_{inCO_2} + G_{inNH_3}) - GAS_{out} \cdot (Gas_{outN_2} + Gas_{outO_2} + Gas_{outCO_2}) = 0 \blacksquare$$

Donde:

$Q_{in}$ : flujo de aire entrante en el evaporador

$G_{inN_2}$ : fracción de nitrógeno en el flujo de aire entrante

$G_{inO_2}$ : fracción de oxígeno en el flujo de aire entrante

$G_{inCO_2}$ : fracción de dióxido de carbono en el flujo de aire entrante

$G_{inNH_3}$ : fracción de amoníaco en el flujo de aire entrante

$GAS_{out}$ : flujo de aire saliente

$Gas_{outN_2}$ : fracción de nitrógeno en el flujo de aire saliente

$Gas_{outO_2}$ : fracción de oxígeno en el flujo de aire saliente

$Gas_{outCO_2}$ : fracción de dióxido de carbono en el flujo de aire saliente

**Enfriador:**

Es posible ver que el balance es correcto, puesto que es igual a cero. Esto es lo esperado, puesto que el enfriador es considerado un sistema cerrado, y así, lo que entra es igual a lo que sale.

$$Gas_{outFLOW} \cdot Gas_{outH_2O} - F_{condFLOW} \cdot \frac{1}{M_{H_2O}} - Q_{coutFLOW} \cdot Q_{coutH_2O} = 0 \blacksquare$$

Donde:

$Gas_{outFLOW}$ : flujo de aire saliente

$Gas_{outH_2O}$ : fracción de agua en el flujo de aire saliente

$F_{condFLOW}$ : flujo de agua condensada

$M_{H_2O}$ : masa molecular del agua

$Q_{coutFLOW}$ : flujo de aire saliente del condensador

$Q_{coutH_2O}$ : fracción de agua en el flujo de aire saliente

Todos los balances son iguales a cero. Por tanto, la primera parte de la validación está probada.

Para una comprobación más profunda hay que ir al modelo matemático, para ver en los diferentes archivos informáticos que están correctos, y así, que el primer paso de la validación ha sido superado.

En relación con los balances de calor, en el modelo se presenta lo que se ha hecho. Es mejor verlo en el modelo matemático.

**Validación del sistema a escala del laboratorio:**

El siguiente paso era comprobar la validez del modelo utilizando datos reales. En el caso de este trabajo de fin de carrera, estos datos proceden del sistema a escala del laboratorio (Intxausti, 2003). Como ya se ha mencionado anteriormente, los datos fueron recogidos del sistema y utilizados en el modelo. Con estos datos, fue posible comparar los resultados obtenidos ejecutando el modelo matemático con los obtenidos del laboratorio.

Para ello, los datos del laboratorio se importaron a una hoja Excel.

Se recogieron datos del laboratorio en dos ocasiones. En ambos casos se utilizaron los datos obtenidos para hacer las comprobaciones pertinentes del modelo matemático.

Desde el punto de vista de los procesos de transferencia de materia, se verificó que el modelo simula lo que ocurre en el sistema a escala del laboratorio con un elevado grado de exactitud.

Con respecto a la transferencia de calor fue posible comprobar la funcionalidad del modelo utilizando las medidas de temperatura en el sistema del laboratorio y verificando que el balance total de calor en cada una de las unidades era nulo.

A continuación se presenta la gráfica en la que se hace una comparativa entre los valores de la temperatura de evaporación, en función del flujo de recirculación de aire, obtenidos mediante el modelo matemático y los valores reales obtenidos de las mediciones realizadas en el sistema a escala del laboratorio (Intxausti, 2003).

Los resultados obtenidos pueden observarse en las figuras 6 y 7.

En la figura 6 se representan los valores de la temperatura calculados mediante el modelo matemático, así como los obtenidos de las medidas en laboratorio. Se observa que, en términos generales, los valores de temperatura del modelo y los reales se mueven dentro del mismo intervalo.

Las diferencias entre ambos parámetros se deben a que en el caso del evaporador, la temperatura en el laboratorio es prácticamente constante debido a la camisa de agua.

La figura 7 representa la variación del flujo de aire de recirculación en el sistema a escala del laboratorio.

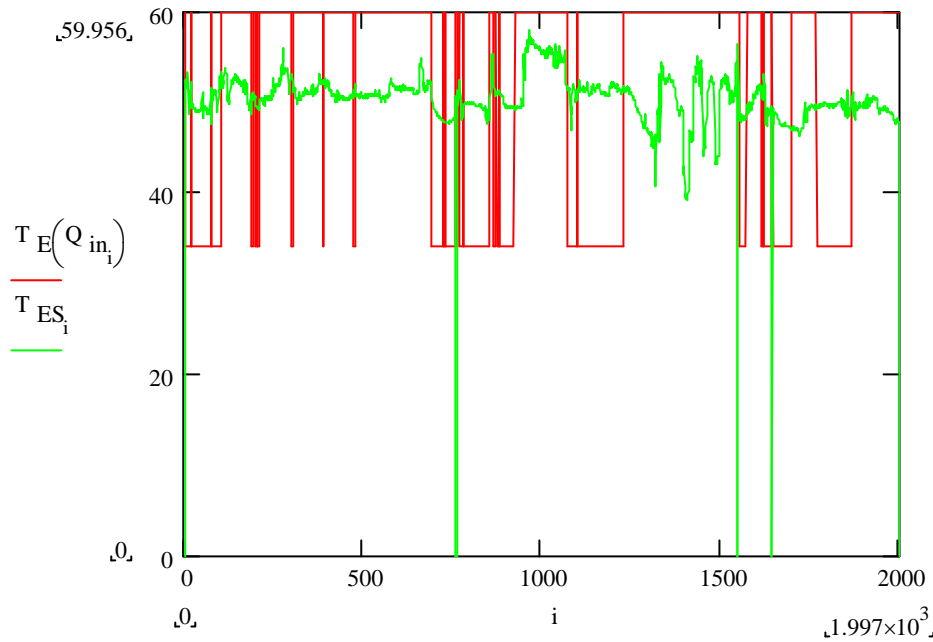


Figura 6: Comparación de los datos obtenidos para las temperaturas del modelo ( $T_E$ ) y del sistema a escala del laboratorio ( $T_{ES}$ )

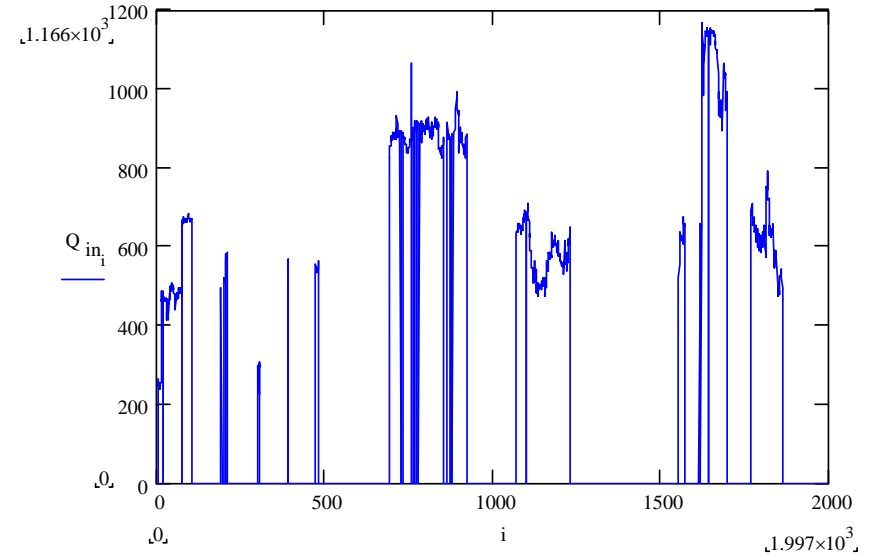


Figura 7: Variación del flujo de recirculación de aire en el sistema (Medidas del sistema del laboratorio)

# RESULTADOS Y DISCUSIÓN



## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Varias aplicaciones han sido desarrolladas con el modelo. Los resultados obtenidos se presentan a continuación.

### 1. Balance de calor en el evaporador:

La figura 8 representa la variación de la temperatura en el evaporador al variar el coeficiente global de transferencia de calor ( $K_G$ ). Como era de esperar, la temperatura aumenta al hacerlo el coeficiente  $K_G$ . El límite superior es la temperatura de la camisa de agua (60°C para el ejemplo).

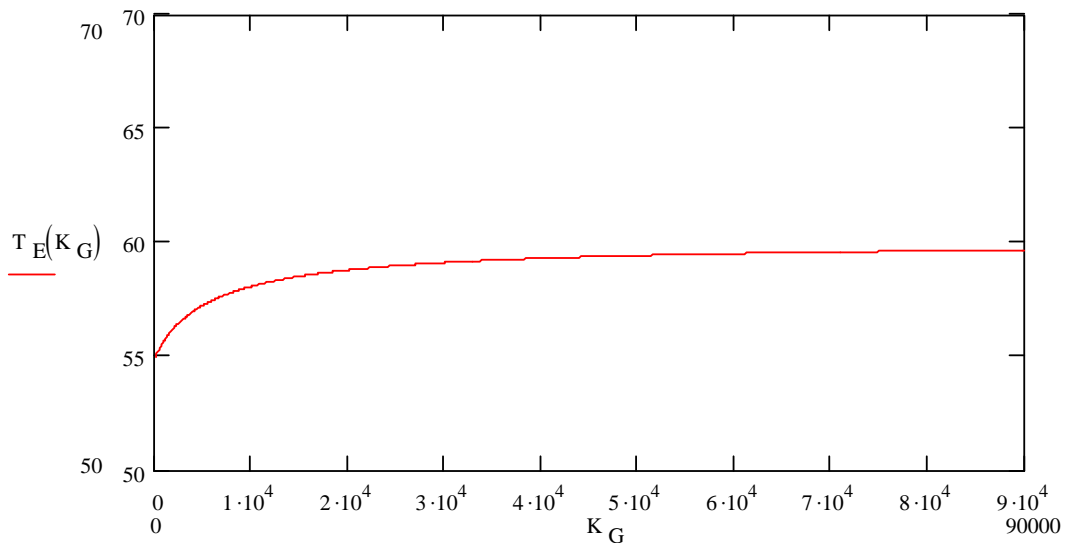


Figura 8: Evolución de la temperatura en el evaporador ( $T_E$ ) en función del coeficiente global de transferencia de calor.

Como es posible ver más abajo (Figura 9), la temperatura en el evaporador aumenta al aumentar la temperatura de la camisa de agua ( $T_{wj}$ ). La pendiente de la gráfica variará en función de  $K_G$ . El ejemplo de abajo está fijado para un valor hipotético de  $K_G$  de  $9000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ .

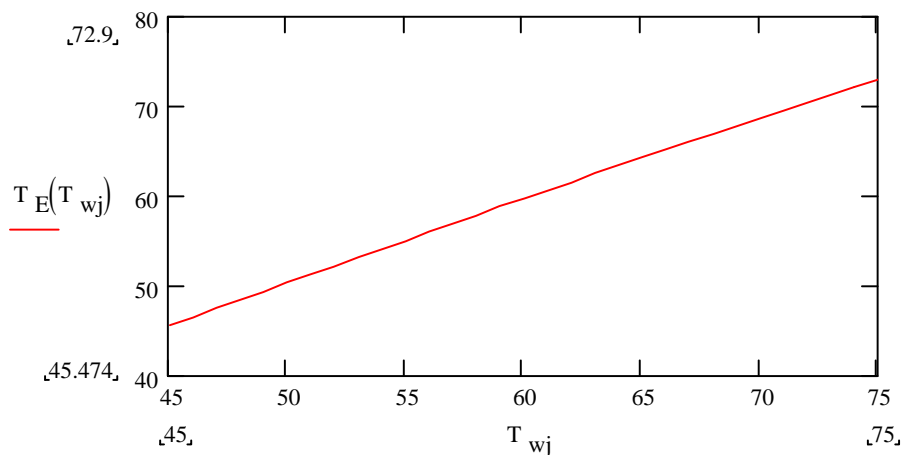


Figura 9: Evolución de la temperatura en el evaporador como función de la temperatura de la camisa de agua.

Cuando la superficie de contacto entre la camisa de agua y el líquido (orina) aumenta (Figura 10) la temperatura de evaporación ( $T_{\text{evap}}$ ) también aumenta (considerando que el resto de variables son constantes. Lo cual significa que incluso los flujos son fijos). Así, aumentar la superficie es lo mismo que aumentar el volumen del evaporador, pero sin utilizar ese volumen, puesto que los flujos son fijos.

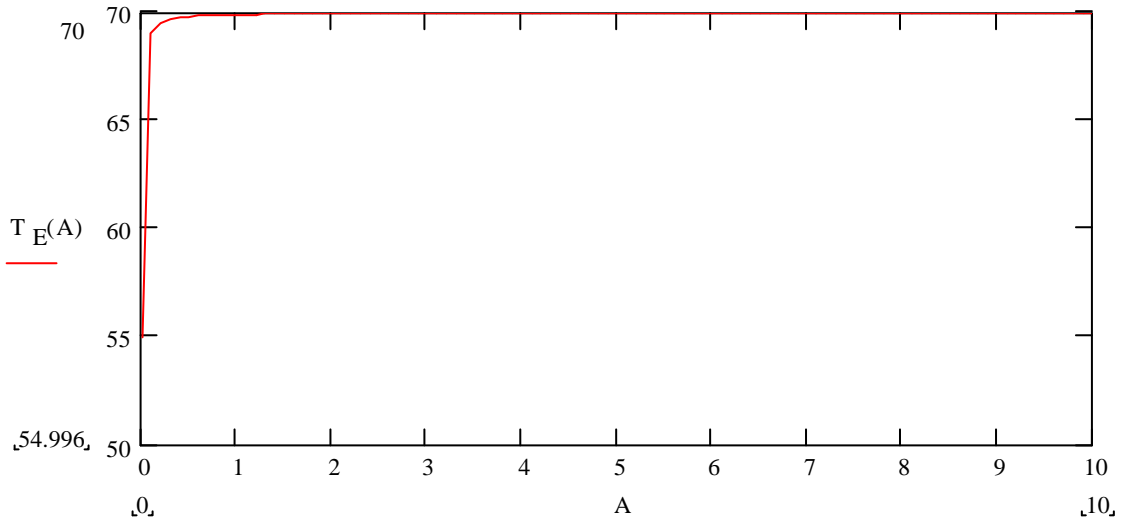


Figura 10: Evolución de la temperatura en el evaporador en función de la superficie del mismo.

La siguiente figura (Figura 11) representa la evolución de la temperatura en el evaporador en función del flujo de aire entrante de recirculación ( $Q_{\text{in}}$ ). Puesto que la temperatura del flujo de aire entrante es inferior a  $T_{\text{Wj}}$ , cuanto mayor es el flujo de aire, menor es la temperatura que alcanza el líquido (orina) en el evaporador. Esta evolución variará en función del valor de  $K_G$  y otras variables.

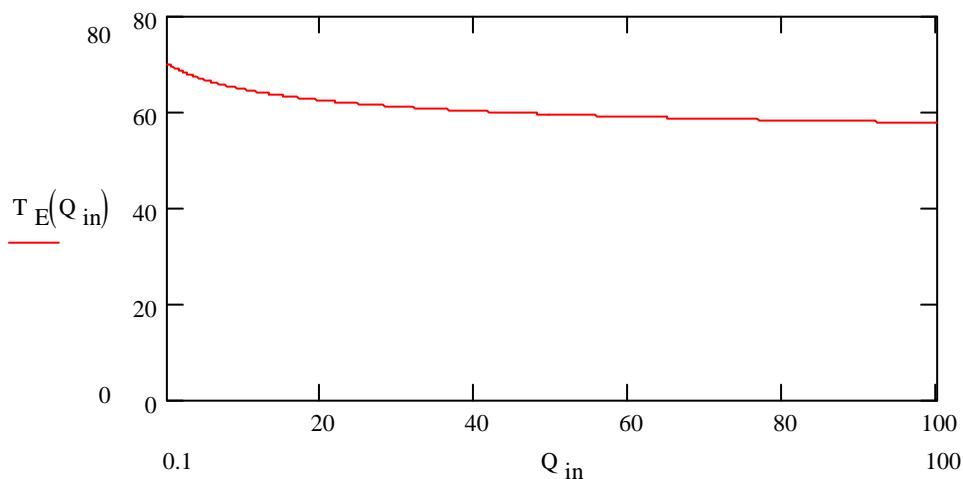
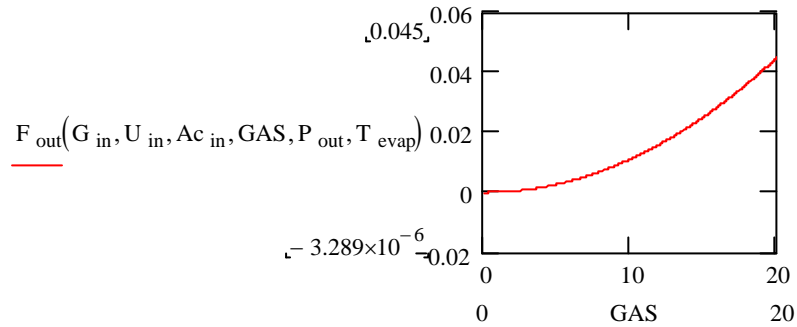


Figura 11 Evolución de la temperatura en el evaporador en función del flujo de aire.

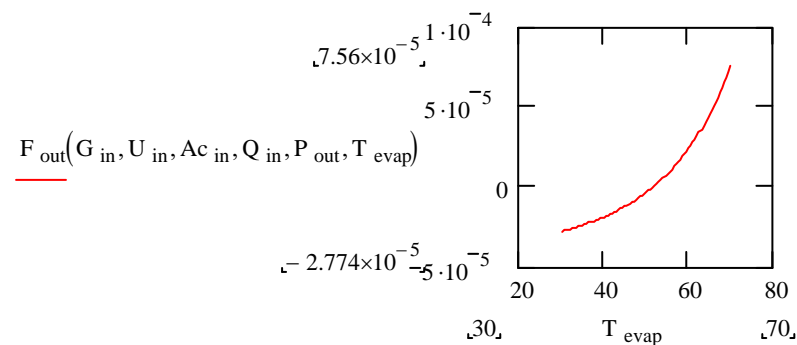
## 2. Balance de masa en el evaporador:

La siguiente figura (Figura 12) representa la evolución del flujo del fertilizante líquido producido (fertilizante rico en nitrógeno) en función del flujo de aire que sale del evaporador. Como era de esperar, la cantidad de líquido aumenta al aumentar el flujo de aire saliente, puesto que esto quiere decir que también el flujo de aire de recirculación es mayor.



**Figura 12 Evolución del flujo de líquido fertilizante en función del flujo de aire saliente del evaporador.**

La figura 13 representa la evolución de la cantidad de líquido fertilizante obtenida al variar la temperatura en el evaporador. A mayor temperatura, mayor cantidad de fertilizante producido, puesto que esto implica que el agua se evapora más rápidamente.



**Figura 13 Evolución del flujo de fertilizante líquido en función de la temperatura en el evaporador.**

# CONCLUSIONES

## CONCLUSIONES

El modelo ha sido construido basándose en la consideración de un sistema constituido por una serie de estados de equilibrio. Como tal, es una aproximación del sistema real a escala del laboratorio. Sin embargo se ha podido comprobar que el modelo se ajusta bastante a esta realidad (según se prueba en el chequeo del modelo).

El modelo matemático está basado principalmente en el establecimiento de diferentes balances de materia y calor en las diferentes unidades definidas. Esto podría considerarse la base del modelo, desde donde se ha ido desarrollando una especie de red entre los distintos ficheros informáticos, interrelacionados entre sí.

Así, para el desarrollo del modelo se han considerado y fijado varios supuestos.

Como ya se ha explicado, la idea es que, partiendo de un estado simple es posible desarrollar el modelo, y al mismo tiempo aumentar la complejidad del mismo para hacerlo cada vez más representativo del sistema integrado real. Esto implica que cada paso que se ha dado hacia una mayor complejidad ha conllevado la comprobación de la funcionalidad del paso anterior.

Puesto que la base del modelo es el establecimiento de los balances de materia y calor, esto implica que los flujos del sistema son extremadamente importantes.

En este sistema, los principales flujos son aquellos relacionados con los gases secos y el agua.

Como ya se ha explicado, es también importante, y por ello se han tenido en cuenta al construir el modelo, los flujos de amoníaco y ácido nítrico.

El hecho de que el modelo ha sido desarrollado de tal modo que presente una serie de niveles estructurados, implica que el modelo presenta, entre otras características, una estructura ampliable. Esto significa que es posible modificarlo y desarrollarlo con mayor profundidad para conseguir objetivos distintos o más complicados que los ya definidos en esta trabajo de fin de carrera.

Por ejemplo, podría desarrollarse el modelo aún con mayor profundidad teniendo en cuenta algunos parámetros que en el caso de este trabajo de fin de carrera han sido tratados como constantes, o fácilmente establecidos mediante diversas suposiciones.

Del mismo modo, podría desarrollarse el modelo aún con mayor profundidad insertando nuevas unidades operaciones, etc.

Lo expuesto es más fácil de conseguir ya que el modelo permite su estudio y modificación tan profundamente como queramos, de principio a fin.

Como ya se ha dicho, la principal herramienta utilizada para construir este modelo matemático, el corazón de la trabajo de fin de carrera, es el programa informático Mathcad. Este programa es bastante fácil de utilizar, realmente útil, y también presenta varias herramientas realmente interesantes para desarrollar un modelo manejable por el usuario.

Puesto que el modelo ha sido desarrollado no sólo para simular los procesos que ocurren en el sistema a escala del laboratorio, así como en el sistema integrado, sino también como una herramienta que el usuario puede usar para investigar muchos otros asuntos relacionados con los procesos que tienen lugar en el sistema, este modelo matemático se ha construido de modo que su manejo sea fácil.

El uso del denominado Libro electrónico permite conseguir esta característica de facilidad de manejo. El libro electrónico permite al usuario entrar en el modelo, tan al detalle como sea necesario, y encontrar respuesta a cualquier pregunta que se haga sobre el sistema que el modelo representa. Al mismo tiempo, es posible para el usuario modificar el modelo. Por lo que el modelo deja de ser algo estático y pasa a ser un elemento dinámico.

El modo en el que ha sido construido el modelo permite al usuario utilizarlo como una herramienta para comprobar los resultados del sistema global, pero al mismo tiempo es también posible ir bajando de niveles, hacia un mayor detalle.

Esto significa que el usuario puede no solo comprobar resultados globales, sino también estudiar con mayor profundidad balances (de materia y/o de calor), la estructura del modelo, etc.

Otra propiedad importante es la posibilidad que ofrece Mathcad de utilizar datos procedentes de muy diversas fuentes, incluso externas al programa.

Esto es de gran importancia, puesto que el modelo se ha construido con la idea de utilizar grupos de datos y de poder representar los resultados obtenidos con dichos datos. Así, los datos utilizados podrían proceder no sólo de la introducción manual del propio usuario, sino también de bases de datos.

Esta característica es además útil para conseguir el objetivo de la segunda parte del trabajo de fin de carrera, la validación del modelo. Como ya se ha dicho, los datos recogidos de las mediciones en el sistema a escala del laboratorio se han utilizado para validar el modelo. Estos datos se ordenaron en una hoja Excel, que Mathcad puede leer y utilizar en el modelo.

Como se ha dicho, el modelo ha sido comprobado en diferentes momentos del proceso y en todos ellos se ha demostrado que es capaz de representar lo que ocurre tanto en el sistema a escala del laboratorio como en el sistema integrado.

#### **Ventajas y desventajas del uso del Libro electrónico:**

- La facilidad con la que las ecuaciones, textos y gráficos pueden combinarse en un simple documento.
- Facilita el modo en que diferentes unidades pueden ser ligadas.
- Modo de uso interactivo.
- Fórmulas y números, estáticos en una página impresa, “cobran vida” en Mathcad. Así como los gráficos, que el usuario puede recalculas o modificar a su antojo.
- Facilidad para buscar información en el modelo.
- Permite copiar y pegar datos interesantes, o fórmulas, tanto en un mismo fichero como en otros archivos de Mathcad.

- La forma más fácil de utilizar el modelo.
- Requiere el uso de un ordenador. Dependiendo del modelo, podría ser tan complicado que los requerimientos del mismo podrían ser altos y así, la ejecución del modelo podría llegar a ser algo lenta, de utilizar un ordenador sin las características apropiadas.

# BIBLIOGRAFÍA



## REFERENCIAS

KROODSMA W, OGINK N.W.M., SATTER I.H.G. and WILLERS H.C, 1998. A technique for direct separation of pig excrements followed by on-farm treatment of the components. International conference on agricultural engineering, Oslo 24-27 August 1998, p. 213-214.

OUDENDAG, D.A., 1993. Reductie van ammoniakemissie: Mogelijkheden en kosten van beperking van ammoniakemissie op nationaal en regionaal niveau (Reduction of ammonia emissions: possibilities and costs). Onderzoeksverslag 102, LEI-DLO, 1993 The Hague, 82 pp.

PVVE, 1997. Livestock, Meat and Eggs in the Netherlands, 1997. Product Boards for Livestock, Meat and Eggs. Rijswijk, the Netherlands, 49 pp.

Mathcad, User's Guide 2000

COULSON, J.M. and J.F. RICHARDSON. 1998. Chemical Engineering. Vol 1 and 2. Butterworth&Heinemann

FOMA, 1994. Naar veehouderij en milieu in balans, samenvatting (Towards a balance between animal production and the environment, summary). In Dutch, Ministry of Agriculture, Nature Management and Fisheries, DLO, Wageningen, 55 pp.

HAMELERS, H.V.M. 2001. A Mathematical Model for Composting Kinetics. Wageningen University.

HEIJUNGS, R., 1992. Environmental Life Cycle Assessment of Products-I: Guide, -II Backgrounds. CML, Leiden.

HENDRIKS, H.J.M., 1997. Dutch Policy for Low Emission Housing Systems. In: Ammonia and Odour control from Animal Production Facilities. Proceedings of the International Symposium, October 6 – 10, 1997, Vinkeloord, The Netherlands, p.685-689.

HOBBS, P.J., T.H. MISSELBROOK and B.F. PAIN. 1996. Characterisation of Odorous Compounds and Emissions from Slurries Produced from Weaner Pigs Fed Dry Feed and Liquid Diets. Institute of Grassland and Environmental Research.

IOANNA MARI, CONSTANTINOS EHALIOTIS, MARIA KOTSOU, COSTAS BALIS, DIMITRIOS GEORGAKAKIS. 2002. Respiration Profiles in Monitoring the Composting of By-products from the Olive Oil Agro-industry. Biosource Technology.

LASARIDI, K.E, PAPADIMITRIOU and C. BALIS. 1996. Development and Demonstration of a Thermogradient Respirometer. Compost Science and Utilisation, Vol 4, No 3, pp 53-61.

MURPHY, D.N.P, N.W. PAGE and E.Y. RODIN. A Tool for Problem Solving in Engineering, Physical, Biological and Social Sciences. Mathematical Modelling. Pergamon Press.

NEUFVILLE, R and J.H. STAFFORD. System Analysis for Engineers and Managers. McGraw.Hill Book Company.

NICOLAI, R.E. and K.A. JANNI. 2001. Biofilter Media Mixture Ratio of Wood Chips and Compost Treating Swine Odors. Water Science and Technology, Vol 44, No 9, pp 261-267. Department of Biosystems and Agricultural Engineering, University of Minnesota.

OGINK, N.W.M., H.C. WILLERS, A.J.A. AARNINK and I.H.G. SATTER. Development of a new Pig Production System with Integrated Solutions for Emission Control, Manure Treatment and Animal Welfare Demands.

RULKENS, W.H, H. BRUNING. 1996. Lectures notes. Principles of Environmental Technology. Landbouwniversiteit. Wageningen

SINGH, R. P. 1993. Introduction to Food Engineering. 2nd. Edition. Academic Press.

TOLEDO, R. T. 1991. Fundamentals of Food Process Engineering. 2nd. Edition. Van Nostrand-Reinhold.

WEAST, R. C. 1978. CRC Handbook of Chemistry and Physics.

Base de datos de EUROSTAT:

<http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/agriculture/data/database>

# RESUMEN

## OBJETIVOS

El objetivo principal de este TFC es el desarrollo de un modelo matemático informático que será la base del que en una siguiente fase representará los procesos que tienen lugar en un sistema integrado de compostaje y evaporación de purines de una explotación porcina. Dicho sistema integrado recibe el nombre de Sistema Hércules (desarrollado en Holanda).

## INTERÉS SOCIOECONÓMICO

En Holanda, la producción de cerdo contribuye de manera sustancial a la economía nacional en términos de empleo y exportación de productos. En 2009, la población total de cerdos era de 12.108.000 cabezas. Existen unas 3.500 explotaciones porcinas (dato de Eurostat en 2007), concentradas en su mayoría en el este y sur del país.

Todo ello conlleva una serie de puntos a tener en cuenta que implican unos costes importantes:

- Producción excesiva de purines.
- Emisiones de amoníaco y malos olores.
- Control de la salud animal.
- Bienestar animal.

## INTERÉS TÉCNICO

Dado el amplio rango de problemas medioambientales y relacionados con los animales que existen actualmente, es necesario un enfoque integrado. En este sentido se ha desarrollado el denominado Sistema Hércules.

El objetivo general del proyecto Hércules es el desarrollo de un concepto innovador de granja para la producción porcina y la obtención de fertilizantes (uno sólido, rico en fósforo, y otro líquido, rico en nitrógeno).

El modelo matemático será capaz de representar lo que ocurre en el sistema de modo que podrá realizarse tantas pruebas como se requiera en un ordenador antes de pasar a la construcción del sistema real.

## NIVEL ACTUAL DE RESOLUCIÓN DEL PROBLEMA PLANTEADO

Partiendo de la situación actual en la que se encuentra el Sistema Hércules, se hace necesario llevar a cabo el desarrollo de este modelo matemático, que ayudará a continuar con el proyecto evitando la construcción innecesaria y la realización de pruebas reales que, mediante un ordenador, será posible simular fácilmente.

## RESUMEN DE LA METODOLOGÍA

Este TFC puede dividirse en dos partes principales:

1) *Modelado del sistema*: Desarrollar un modelo matemático para el sistema a escala del laboratorio utilizando como herramienta el software Mathcad. El modelo está basado principalmente en el establecimiento de los diferentes balances de materia y energía en las distintas unidades operacionales. Para ello, se establecerá un esquema estructurado en niveles:

Sistema→ Unidades Operacionales→ Balances→ Relaciones físicas

2) *Validación del modelo*: Comprobar que el modelo desarrollado es funcional, mediante el chequeo con los datos recopilados del sistema a escala de laboratorio. Esto a su vez presenta dos fases:

▪ *Validación interna*: Chequeo de cada una de las unidades operacionales utilizando los balances de materia y energía teóricos.

▪ *Validación del sistema a escala de laboratorio*: Chequeo del modelo utilizando datos reales. En el caso del TFC, estos datos se han obtenido del sistema a escala de laboratorio. Con estos datos, es posible comparar los resultados obtenidos ejecutando el modelo con los obtenidos en el laboratorio.