

Universidad Pública de Navarra

Nafarroako Unibertsitate Publikoa

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE INGENIEROS AGRÓNOMOS**

***NEKAZARITZAKO INGENIARIEN
GOI MAILAKO ESKOLA TEKNIKO***

**MODELIZACIÓN DE UN SISTEMA DE COMPOSTAJE Y EVAPORACIÓN
DE PURINES DE CERDO**

.....

presentado por

AGUSTÍN SÁNCHEZ ORTEGA

**INGENIERO TÉCNICO AGRÍCOLA EN INDUSTRIAS AGRARIAS Y ALIMENTARIAS
NEKAZARITZAKO INGENIARI TEKNIKO *NEKAZARITZA ETA ELIKADURA INDUSTRIAK***

Febrero, 2011

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.

ÍNDICE

	Página
INTRODUCCIÓN	2
FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA HÉRCULES	4
PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA HÉRCULES	7
MODIFICACIONES PROPUESTAS	8
DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO	9
COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA	10
REACTOR PILOTO DE LABORATORIO PARA TESTAR EL CONCEPTO DE REACTOR INTEGRADO	11
UN MODELO MATEMÁTICO	17
OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO	18
ALCANCE	19
DISEÑO DEL MODELO	21
EVAPORADOR	22
MODELO DEL EVAPORADOR	25
ENFRIADOR	33
DIAGRAMA DEL MODELO MATEMÁTICO	39
VALIDACIÓN DEL MODELO	40
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	46
CONCLUSIONES	49
REFERENCIAS	52

ANTECEDENTES Y OBJETIVOS

INTRODUCCIÓN

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. Según la base de datos agrícolas de Eurostat, el número de explotaciones porcinas en Holanda ha ido descendiendo gradualmente desde el año 2000 (6.510 explotaciones). Los datos más actuales corresponden a 2007, para entonces la cifra estaba en 3.500 explotaciones porcinas (Eurostat, 2007), concentradas en su mayoría en el este y sur del país.

La producción porcina ha sido sometida a frecuentes debates en los últimos años, a consecuencia de los problemas medioambientales, así como en relación a la salud y bienestar de los animales. Dos principales asuntos medioambientales y dos temas relacionados directamente con los animales han jugado un importante papel en la producción porcina holandesa durante los últimos años (FOMA, 1994).

1.1 *Producción excesiva de purines:*

La producción porcina se basa principalmente en la importación de alimentos y el uso de subproductos procedentes de la industria alimentaria. La mayor parte de los minerales contenidos en estos alimentos terminan en las excreciones de los cerdos. La fuerte concentración de las explotaciones de cerdos y la escasez de terreno donde aplicar abonos orgánicos provocaron que se abusara del abonado con purines (MANF, 1997). La consecuente contaminación del suelo y del agua subterránea con nitrógeno y fósforo indujo la aplicación de una estricta regulación en el uso de los purines como abono, y forzó a los ganaderos a transportar los purines a otras regiones. Esta regulación ha reducido la aceptación de los purines por los agricultores y ha aumentado el coste de la gestión de los purines.

1.2 *Emisiones:*

La producción de cerdo es responsable de aproximadamente un tercio de las emisiones totales de amoníaco en Holanda (Oudendag, 1993).

Los efectos negativos de las emisiones de amoníaco en el ambiente, provocando la acidificación y eutrofización de los ecosistemas, ha llevado a la implantación de una legislación cuyo principal objetivo es reducir las emisiones de las explotaciones ganaderas hasta un 70% en 2005, tomando como referencia las emisiones de 1980.

Además del amoníaco, las emisiones de olores procedentes de las explotaciones de cerdos están causando molestias en las zonas residenciales próximas, lo cual genera una menor aceptación por la sociedad de las explotaciones ganaderas a gran escala.

1.3 Control sanitario del ganado

La estructura de la producción porcina holandesa se caracteriza por altas concentraciones de explotaciones y frecuentes transportes entre centros especializados en producción y engorde (PVVE,1997). Esto causa importantes pérdidas económicas a consecuencia de los impuestos de exportación y los costes de erradicación de enfermedades.

1.4 Calidad de vida de los animales:

La conciencia pública sobre el bienestar animal en el caso de la producción porcina arrancó en 1997 a consecuencia del brote de fiebre porcina. Esto centró la atención en las explotaciones porcinas a gran escala con elevadas concentraciones de cerdos. Estos hechos llevaron a la introducción de nuevas regulaciones en calidad de vida animal (Hendriks, H.J.M, 1997).

La normativa se enfocó en el aumento del espacio mínimo disponible por animal así como en satisfacer sus necesidades mínimas, mediante la regularización del sistema de estabilización de cerdos y el uso de camas de paja en los corrales de engorde.

Se cree que el sector porcino holandés sólo mantendrá su situación actual si consigue modificar sus métodos de producción hacia sistemas sostenibles y socialmente aceptables. Dado el amplio rango de problemas medioambientales y aquellos relacionados con la calidad de vida de los animales que tienen que resolverse, es necesario un enfoque integrado.

Es necesario enfocar los problemas a resolver de modo que se alcance una solución integrada, en lugar de abordar cada problema de manera aislada.

El sistema Hércules de producción porcina tiene como objetivo alcanzar esta solución integrada.

FUNCIONALIDAD DEL SISTEMA HÉRCULES

Un proyecto de investigación multidisciplinario comenzó en 1998, en el cual tres centros de investigación y seis compañías privadas colaboran con el objetivo de crear un anteproyecto del sistema en el año 2000.

A continuación se presenta un resumen del concepto básico adoptado, métodos de desarrollo y algunos resultados de investigaciones que apoyan el proceso de diseño.

El corazón del proyecto Hércules es la cadena que va desde la alimentación de los cerdos pasando por la digestión de los mismos en un ambiente adecuado (respecto a los resultados de crecimiento, salud y bienestar) hasta la producción de fertilizantes a partir de la separación de las heces y la orina (Kroodsma W, Okingk N.W.N., Setter I.H.G and Willer H.C., 1998).

El objetivo general del proyecto Hércules es el desarrollo de un concepto innovador de explotación porcina y fertilizantes de calidad, incluyendo:

- una mejora importante de la sostenibilidad comparado con los sistemas convencionales de producción porcina
- gestión de los excrementos dirigida a la producción de fertilizantes en la propia explotación
- reducción al mínimo de las emisiones de amoníaco y malos olores¹
- uso de subproductos orgánicos en la dieta de los cerdos
- creación de estándares de mejora de las condiciones de vida y salud de los cerdos

Los principales aspectos innovadores de este concepto son:

1. mejora de la calidad de vida de los animales mediante el uso de suelos de cemento (en lugar de suelos enrejillados) y camas de paja
2. Reducción del consumo energético
3. uso de subproductos de la industria alimentaria como alimento para los animales; así, reduciendo la importación de alimentos de otros países
4. tratamientos separados de las fases sólida y líquida de los excrementos

En el concepto del proyecto Hércules, los excrementos de los cerdos son separados en una fase sólida y otra líquida. La fase sólida está constituida principalmente por heces, contaminada con cierta fracción de orina; la fase líquida es predominantemente orina, con algo de heces. Ambas fases pueden obtenerse mediante el uso de una cinta transportadora.

¹ Los cuatro grupos principales de compuestos que producen malos olores están identificados como sulfhidrilos, ácidos grasos volátiles, fenoles e indoles. La mayoría de estos compuestos se degradan a metano. Un desequilibrio entre la formación de ácidos grasos volátiles y metano lleva a la acumulación de los primeros, lo cual contribuye al mal olor. El nitrógeno orgánico es el principal productor de malos olores.

Dieta del cerdo con subproductos de la industria agroalimentaria:

Varios subproductos orgánicos procedentes de la agricultura y de la industria alimentaria pueden utilizarse como parte de la dieta del cerdo. En este sentido, los cerdos juegan un papel muy útil en la degradación de dichos subproductos. El uso de estos subproductos en la dieta porcina tiene varias ventajas tanto medioambientales como económicas: reduce de manera importante el uso de energía requerida para el transporte de alimentos, evita la necesidad de caros tratamientos de residuos como por ejemplo la incineración o el compostaje, además de la ventaja económica que supone en las explotaciones como sustituto del consumo de alimentos secos. El sistema de alimentación preferido está basado por tanto una instalación automática de alimentación líquida.

Recolección por separado de las fases sólida y líquida de los excrementos:

Todos los pasos del proceso de obtención de los fertilizantes a partir de las excreciones de los cerdos se basan en la recolección directa y separada de heces y orina. La recolección por separado se considera indispensable para el proceso de obtención de los fertilizantes, así como para la comercialización de los mismos.

La recolección por separado facilita la concentración y estabilización de ambos productos y aumenta el potencial comercial al aislar prácticamente todo el fósforo excretado en la fracción sólida y el nitrógeno no orgánico en el fertilizante líquido. Un sistema bajo la zona de defecación asegura dicha separación. Uno de los sistemas que ha probado su eficacia separadora de la orina y las heces es la cinta transportadora (Kroodsma *et al.*, 1998). Las heces (fracción sólida) caen a través del suelo enrejillado a la cinta transportadora, mientras la orina pasa a un sistema colector. La eliminación frecuente de las heces se asegura con el continuo movimiento del transportador. La recolección por separado de las heces y la orina, así como la rapidez del proceso mejoran las condiciones ambientales e higiénicas en el área de estancia de los cerdos. Además, este tipo de tratamiento de los excrementos posibilita el uso de paja en las camas para mejorar la calidad de vida animal, ya que puede ser fácilmente eliminada por el transportador.

Concentración y estabilización de las heces:

Las heces se someten a un proceso de degradación aeróbica en un reactor de compostaje. Mediante el proceso de compostaje se obtiene un producto estable con un 70% de materia seca, utilizando el propio calor procedente del proceso de compostaje. Sin embargo, en el proceso se produce la evaporación de grandes cantidades de amoníaco. El amoníaco sale del reactor con el flujo de aire y se disuelve en la fase líquida que hay en el evaporador por el que pasa el flujo de aire.

La porosidad de las heces frescas es demasiado baja para su compostaje directo.

La adición de ciertos materiales que aumentan la porosidad de la mezcla y el presecado son necesarios para asegurar la aireación. En el sistema Hércules, la paja se suministra a los cerdos para mejorar las condiciones de vida de los mismos. Dicha paja sirve también para aumentar la porosidad de la mezcla de heces.

Concentración y estabilización de la orina:

La orina de cerdo contiene alrededor de un 40% del nitrógeno excretado y prácticamente nada de fósforo. Mediante un proceso de concentración de la orina se obtiene un fertilizante rico en nitrógeno y potasio. En el sistema Hércules, la orina es concentrada mediante la evaporación del agua que contiene. La fuente de calor utilizada para la evaporación es el flujo de aire de recirculación que procede, en su inicio, de la propia explotación porcina, donde, como consecuencia del propio metabolismo de los animales sufre un incremento de temperatura.

Reducción de emisiones:

La emisión de amoníaco y polvo (incluyendo potenciales agentes patógenos) se eliminará en su mayoría. Experimentos realizados han mostrado una reducción en la emisión de amoníaco en el rango entre 75 y 95%. Dada la frecuencia de retirada de los excrementos de los compartimentos de estabulación, se consigue igualmente una reducción de los olores. Todo el aire saliente de la zona de estancia de los cerdos es dirigido a través de un corredor central para permitir el tratamiento de filtración del aire.

A continuación se presenta un diagrama general del sistema Hércules:

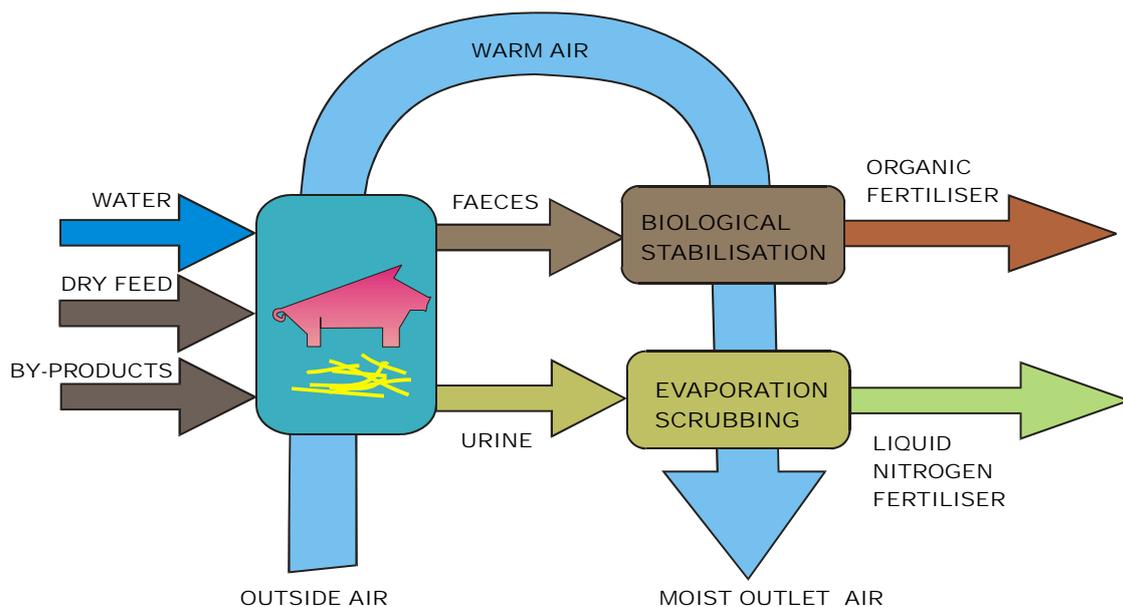


Figura 1: Diagrama general del sistema Hércules

PROBLEMÁTICA DEL SISTEMA HÉRCULES

En el Departamento de tecnología medioambiental, se desarrollan tecnologías para el tratamiento de las dos fases (sólida y líquida) de los excrementos porcinos para obtener fertilizantes de calidad así como productos que mejoren la calidad del suelo con las siguientes restricciones:

- Bajo consumo de energía
- Costes mínimos
- Impacto medioambiental mínimo
- Los productos cumplen las demandas del mercado

Los principales problemas que surgieron durante la primera fase del proyecto fueron los siguientes:

- Se observaron emisiones con altos niveles de olores en el flujo de aire que sale del evaporador (compuestos orgánicos volátiles)
- La energía calorífica aportada por el flujo de aire era insuficiente para conseguir evaporar la cantidad de agua requerida en la fracción líquida.
- Elevadas emisiones de amoníaco del reactor de compostaje (por encima del 50-60% del nitrógeno total inicial); la mayor parte del amoníaco se disolvía en el agua condensada, pero no hay posibilidad de reutilizar este agua
- El fertilizante líquido producido aún presenta un alto nivel de olor, que dificulta su comercialización

MODIFICACIONES PROPUESTAS

Un nuevo concepto de reactor integrado se ha diseñado para solventar estos problemas. Las unidades integradas contienen los siguientes elementos innovadores:

1. Mediante la combinación física del evaporador y el compostador, el calor producido en el compostador puede utilizarse en el evaporador para evaporar el agua de la orina. Mediante el uso de una bomba de calor, la energía puede ser reutilizada varias veces, mejorando así la eficacia del proceso
2. Los compuestos olorosos que arrastra el flujo de aire que atraviesa el evaporador, son degradados en el reactor durante la recirculación. Esto da como resultado un flujo de aire y un fertilizante líquido con un menor nivel de olores
3. El amoníaco arrastrado por el flujo de aire a través del compostador pasa a la fracción líquida en el evaporador, reduciendo así la emisión de amoníaco y aumentando al mismo tiempo la riqueza en nitrógeno del fertilizante líquido

La aplicación de este sistema integrado implica que el aire de ventilación no tiene que tratarse nunca más. De este modo se solventa el problema de malos olores que pudiera provocar la explotación porcina.

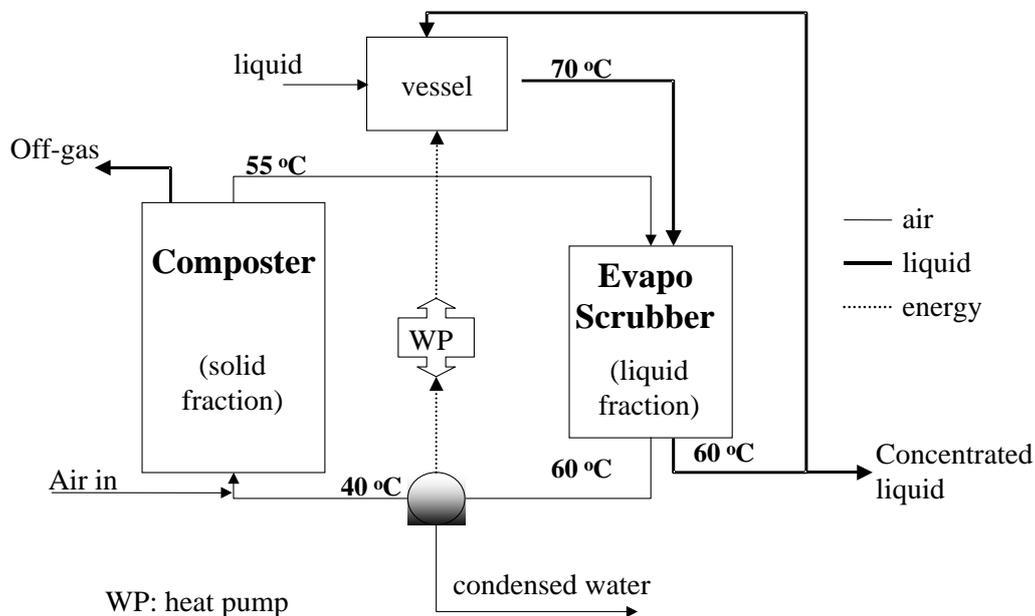


Figura 2: Representación esquemática del sistema integrado del reactor

DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA INTEGRADO

El sistema está representado esquemáticamente en la figura 2. En el compostador, la materia orgánica de la fracción sólida es degradada aeróbicamente, se consume oxígeno y se produce agua, dióxido de carbono, amoníaco y calor. El suministro del oxígeno se realiza mediante la entrada de un flujo de aire. El aire caliente es recirculado a través del evaporador. Después del evaporador, el aire es enfriado en una bomba de calor (o cambiador de calor) donde se produce agua condensada. El calor robado al aire en la bomba de calor es transferido al evaporador para aumentar la temperatura del líquido. Utilizando la bomba de calor es posible reutilizar el calor producido en el compostador para evaporar el agua de la orina. Una cierta cantidad de aire sale del sistema integrado.

El sistema integrado está diseñado de tal modo que se producen los siguientes flujos:

- Se produce una pequeña cantidad de aire que sale del sistema, pobre en amoníaco y malos olores
- Se produce un líquido altamente concentrado (principalmente NH_4NO_3), libre de malos olores, que puede utilizarse en la agricultura como fertilizante nitrogenado
- Se produce una fracción sólida (compost) que puede utilizarse en la agricultura como mejorante de la calidad del suelo y que además es rico en fósforo (y pobre en nitrógeno)
- Se produce un condensado de agua pobre en contaminantes que puede ser reutilizado (por ejemplo, como agua de limpieza) o bien puede pasar al sistema de alcantarillado sin problemas

Se examinará el funcionamiento del sistema integrado a pequeña escala.

METODOLOGÍA EMPLEADA

COMPLEJIDAD DEL PROBLEMA

Debido a la complejidad del sistema integrado, ha sido necesario simplificarlo a escala de laboratorio de manera que, aunque más simple que el sistema original, aún es representativo del mismo.

Construir un modelo es bastante complicado y requiere tener en cuenta muchos puntos.

Un modo de facilitar el proceso es desarrollar un modelo suponiendo varias hipótesis y fijando varios factores que son difíciles de definir en el sistema real. Una vez desarrollado y validado el modelo, es posible modificarlo y hacerlo aún más complejo, paso a paso.

Esta es la idea que se ha desarrollado en la tesis.

Primero, empezando un sistema más fácil, el sistema a escala de laboratorio, explicado abajo.

Este sistema es una sencilla representación del sistema integrado. Mediante el chequeo de este modelo es posible comprobar si el sistema integrado funciona o no.

El modelo desarrollado evolucionará del original, que representa el sistema a escala de laboratorio, al modelo que representa al sistema integrado.

Como se explica más abajo, el sistema a escala de laboratorio ha sido construido de tal manera que la mayoría de los elementos, y por tanto el proceso, están totalmente controlados.

Haciendo esto, el sistema se ha reducido a tres principales unidades de operación: compostador, evaporador y condensador.

De estas tres unidades se han modelizado el evaporador y el condensador. En el caso del reactor de compostaje, éste se ha considerado como una caja negra, en el que todo se considera estabilizado y es el aire de recirculación el único factor variable durante el proceso.

Posteriormente, los modelos de cada unidad de operación se han vinculado entre sí para representar el proceso a escala de laboratorio, y finalmente chequearlo.

Una vez hecho esto, el siguiente paso sería desarrollar un modelo que represente una aproximación al sistema integrado. Pero esto sería parte de otro TFC.

REACTOR PILOTO DE LABORATORIO PARA TESTAR EL CONCEPTO DE REACTOR INTEGRADO

El concepto de reactor integrado ha sido simulado físicamente a pequeña escala. De este modo, se ha preparado un sistema constituido por un compostador con capacidad para 80 litros, acoplado a un evaporador de columna de 10 litros de capacidad. No era técnicamente viable instalar una bomba de calor para simular la transferencia de calor entre compostador y evaporador. El balance de calor se ha simulado en el modelo informático desarrollado para esta tesis. El agua condensada producida en la bomba de calor es generada enfriando el aire de recirculación, caliente y saturado, en un intercambiador de calor. En la figura 3 se presenta un esquema del modelo a escala de laboratorio.

La fracción sólida de estiércol porcino se mezcla con basura orgánica (agente que mejora la porosidad y permeabilidad de la materia a compostar) y se composta en el reactor. Una camisa de agua, así como una resistencia alrededor del reactor, controlan la temperatura del mismo. El contenido de oxígeno dentro del compostador se controla fijando la cuantía y regulando la entrada de flujo de aire en función de la medida del oxígeno en el flujo de aire que sale del reactor.

El aire de recirculación que sale del reactor se pasa a través del evaporador. El pH del líquido en el evaporador se fija en alrededor del valor de 4, para así conseguir robar el amoníaco del flujo de aire. El líquido en el evaporador se mantiene a una temperatura elevada, gracias al flujo de aire procedente del reactor, de modo que se consigue evaporar parte del agua del líquido en el evaporador. La fracción líquida se descarga del evaporador cuando se alcanza la concentración deseada, para alcanzar la calidad del producto (fertilizante rico en nitrógeno) buscado. Esto se controla instantáneamente mediante la medición de la conductividad de la solución. Constantemente se está introduciendo líquido en el evaporador. En este caso, el flujo de recirculación se controla manualmente.

Existen varios parámetros de control en el proceso:

- Nivel de oxígeno en el reactor.
- Temperatura del reactor.
- Flujo de recirculación (aire).
- Temperatura en el evaporador.
- Temperatura del intercambiador de calor para condensar el agua.

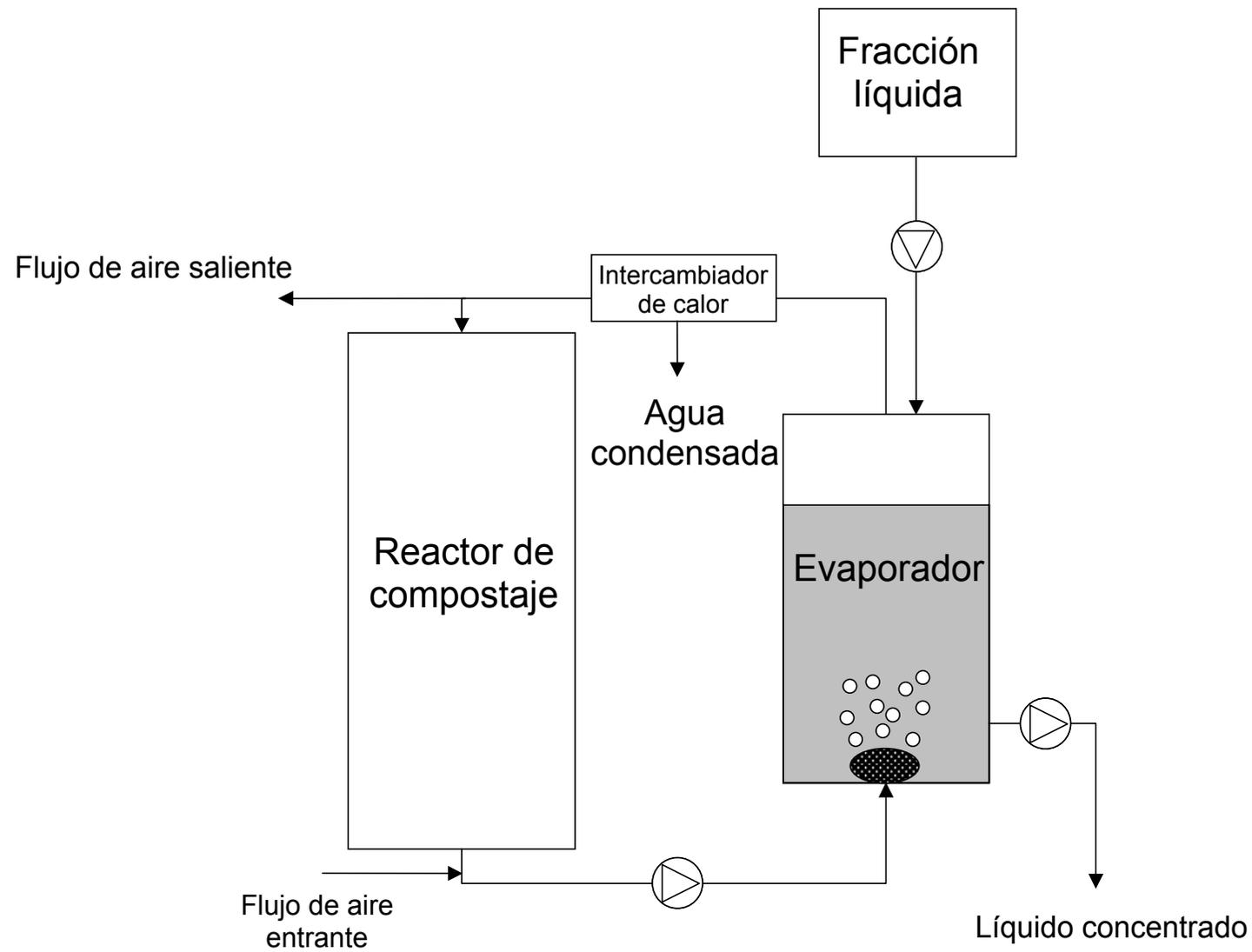


Figura 3: Esquema simplificado del simulador a escala de laboratorio del Sistema integrado

El diseño del reactor y la formulación de los objetivos fueron testados en su momento mediante un trabajo de experimentación (Intxausti, 2003).

El funcionamiento del sistema integrado será testado mediante la medición de los parámetros presentados en la tabla 1:

Tabla 1: Parámetros medidos en el sistema a escala de laboratorio

Flujo de aire entrante	Flujo de aire saliente	Fracción sólida que entra al sistema	Compost producido	Líquido entrante	Líquido concentrado (fertilizante rico en N)	Agua condensada	Entrada de ácido
Flujo (m ³ /h)	Flujo (m ³ /h)	Cantidad (kg)	Cantidad (kg)	Cantidad (kg)	Cantidad (kg)	Cantidad (kg)	Cantidad (kg)
O ₂	O ₂	TS	TS	pH	pH	pH	NO ₃
CO ₂	CO ₂	VS	VS	EC	EC	EC	
	Olores	N-total	N-total	COD	COD	COD	
		NH _{3/4}	NH _{3/4}	VFA	VFA	VFA	
		NO ₃	NO ₃	N-total	N-total	N-total	
		P	P	NH _{3/4}	NH _{3/4}	NH _{3/4}	
		K	K	NO ₃	NO ₃	NO ₃	
		pH	pH	Olores	Olores	Olores	
		Nivel de respiración	Nivel de respiración				
		Olores	Olores				

Donde²:

- TS: sólidos totales
- VS: sólidos volátiles
- EC: conductividad eléctrica
- COD: demanda de oxígeno
- VFA: ácidos grasos volátiles

² Las iniciales corresponden a la terminología en inglés.

UNA EXPLICACIÓN MÁS DETALLADA DEL SISTEMA A ESCALA DE LABORATORIO

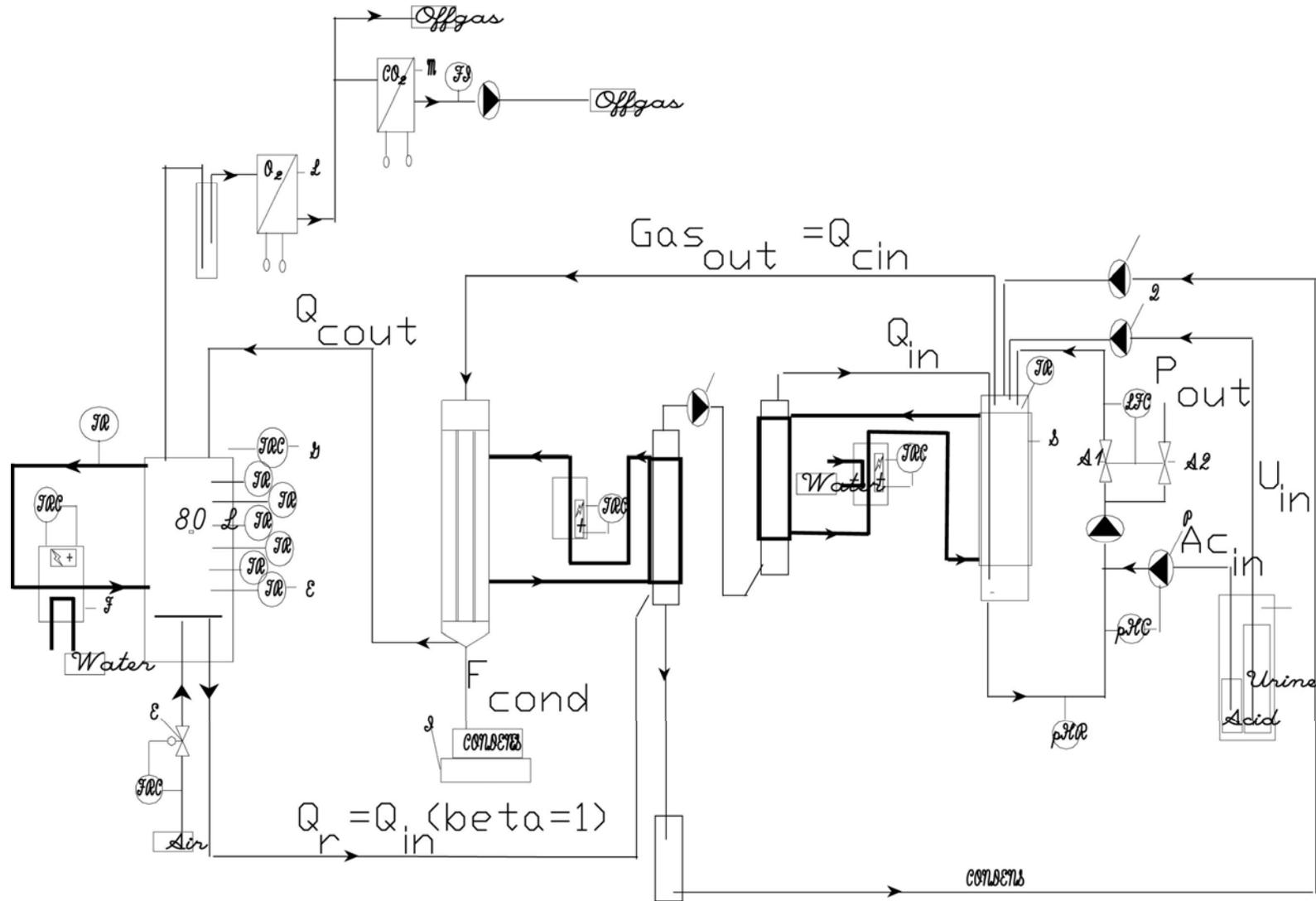


Figura 4: Esquema del sistema a escala del laboratorio

El flujo de aire (aire de recirculación) que pasa a través del reactor se calienta y aumenta su humedad a causa de las reacciones de compostaje que tienen lugar en el interior del reactor. Una vez que sale del reactor, el flujo de aire entra al evaporador. Para ello, se utiliza una bomba. Debido a algunos problemas en la bomba a causa de la humedad del aire, fue necesario tratar el aire antes de entrar al evaporador. Así, primeramente, el flujo de aire es secado utilizando un enfriador, y el agua condensada se adiciona al evaporador. A causa de este tratamiento, el aire es enfriado. Por tanto, antes de entrar al evaporador es necesario volver a calentar el aire. Para ello se utiliza un calentador. Este calentador aumenta la temperatura del flujo de aire, y al mismo tiempo mantiene la temperatura en el evaporador. Como agente calentador se utiliza aceite.

En el evaporador, el flujo de aire atraviesa la fracción líquida. Como ya se ha explicado anteriormente, debido a las condiciones establecidas en el interior del evaporador, el amoníaco contenido en el flujo de aire pasa a la fracción líquida.

Una vez que el flujo de aire sale del evaporador y antes de volver a entrar en el reactor de compostaje, pasa a través de un enfriador para disminuir su temperatura. Este enfriador utiliza un refrigerante diferente al agua, y está relacionado con el enfriador anterior (destinado a eliminar el agua del flujo de aire saliente del reactor). Existen varios problemas con estos dos enfriadores, debido a que ambos están controlados por el mismo sistema, y existen diferencias en las temperaturas que se necesitan en ambos. Debido a esto, el flujo de aire que entra en la bomba puede contener cierta cantidad de humedad, lo cual, como ya se ha mencionado anteriormente, es un problema.

Elementos:

- *Reactor de compostaje:*

El reactor está rodeado por una cubierta que mantiene la temperatura en su interior.

Hay un flujo de aire desde la parte superior a la inferior del reactor, procedente del evaporador. Pero al mismo tiempo, hay una tubería en la base del reactor que introduce aire del exterior del sistema en el reactor. El aire fluye desde la base hacia la parte superior.

El pH está por encima de 7. Aunque al principio podría ser inferior, pasado un tiempo, el pH aumenta hasta 7.

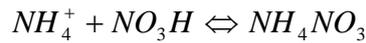
Por el momento, las medidas son:

Temperatura: dividiendo el reactor longitudinalmente en 6 zonas y midiendo la temperatura en cada una de las zonas. El objetivo es mantener una temperatura homogénea en todo el reactor. Esto se consigue recirculando el aire.

Flujo de aire: existen dos flujos que salen del reactor. Uno sale totalmente del sistema; el otro es el flujo de aire de recirculación. Se miden la cuantía del flujo, así como su composición.

- *Evaporador.*

El pH en el evaporador ronda el valor 4. Esto se consigue mediante la adición de ácido nítrico a la orina antes de entrar en el evaporador y mediante la monitorización de la recirculación. La función de mantener un pH bajo es facilitar la eliminación del amoníaco del flujo de aire. Esto es así ya que un medio acidificado desplaza el equilibrio amonio-amoniaco hacia la forma amonio:



- *Enfriador.*

El flujo de aire procedente del evaporador es enfriado antes de entrar en el reactor.

En el sistema a escala de laboratorio, el enfriamiento del aire se consigue mediante el uso de un refrigerante externo al sistema, y por tanto, sin ninguna otra relación con el sistema más que la de enfriar el aire.

En el sistema integrado (real), el refrigerante es el propio flujo de orina. Así, al mismo tiempo que el flujo de aire es enfriado, el flujo de orina es calentado antes de entrar al evaporador. De este modo, la eficiencia del sistema aumenta de manera importante.

- *Diferentes sistemas de medida:*

Conectado al reactor hay un sistema de medición de la temperatura a diferentes alturas del mismo, desde la base hasta la parte superior. En concreto, hay 6 puntos de control de temperatura.

Medidores de pH tanto en el reactor como en el evaporador.

Un sistema de medida de la concentración en la orina.

Un medidor de CO₂ en el reactor.

Un medidor del flujo de aire a través del reactor.

Un sistema de medida del nivel de líquido en el evaporador.

- *Sistema informático de almacenamiento de datos:*

Un programa de ordenador guarda los datos medidos por cada uno de los sistemas de medición. Estos datos son posteriormente tratados y exportados a un archivo de Excel.

UN MODELO MATEMÁTICO

Como ya se ha mencionado, uno de los objetivos de este trabajo de fin de carrera era desarrollar un modelo matemático (utilizando el programa Mathcad), que representa, primero el sistema a escala de laboratorio, y después, el sistema integrado.

Partiendo de lo más básico hasta lo más complejo, se ha ido construyendo este modelo matemático, de modo que ahora está listo para representar el sistema en estudio.

La base del sistema la constituyen los diferentes balances de materia y energía en cada una de las unidades de operación. Un nivel superior representa las unidades en sí. Finalmente, la representación del sistema global.

Del mismo modo, el modelo se compone de ecuaciones que representan cada uno de los balances de materia y de energía de las diferentes unidades. Dichas ecuaciones están interconectadas para representar lo que ocurre en cada una de las unidades. Del mismo modo, el modelo interrelaciona las ecuaciones de las diferentes unidades para representar el sistema completo (a escala de laboratorio y el sistema integrado).

Para cada una de las unidades de operación, y en algunos casos diferenciando entre los balances de materia y los de energía, se han creado diferentes archivos informáticos. Así, estos archivos son la base del modelo, y enlazando dichos archivos se ha desarrollado el modelo completo.

Sobre el programa Mathcad (Mathcad, User's guide 2000):

Mathcad es una solución para la aplicación de matemáticas y provee de un ambiente de cálculo técnico.

Construido en una intuitiva interface, Mathcad reúne dos procesos tradicionalmente separados – diseño de fórmulas y documentación.

Mathcad es la herramienta principal en este trabajo de fin de carrera. En realidad, es la base de todo el trabajo de fin de carrera, puesto que el modelo matemático está creado con este programa informático.

OBJETIVO Y ALCANCE DEL ESTUDIO

El primer paso ha sido el desarrollo del sistema a escala de laboratorio. Con este sistema se pretende probar si el sistema integrado es o no factible.

El objetivo de este trabajo de fin de carrera es desarrollar un modelo matemático que simule los procesos que tienen lugar en el sistema a escala de laboratorio. Un siguiente paso, motivo de otro TFC, sería el desarrollo del modelo para que sea capaz de simular el sistema integrado.

Se podría decir también que el objetivo principal ha sido desarrollar un programa de fácil uso que puede ser utilizado por otros investigadores. La idea es que el usuario pueda utilizar el modelo al nivel más alto, pero que a la vez tenga la posibilidad de entrar en los aspectos más básicos.

Una vez desarrollado el modelo, los datos recogidos en laboratorio se utilizaron para comprobar la funcionalidad del modelo y así comprobar su eficiencia y la representatividad de la realidad.

En este sentido, el papel de este trabajo de fin de carrera puede dividirse en dos partes:

- *Modelización del sistema:*

Desarrollar un modelo matemático para el sistema estudiado estableciendo un esquema estructurado en niveles:

Sistema → Unidades de operación → Balances → Relaciones físicas

- *Validación del modelo:*

Probar que el modelo creado es funcional mediante la comparación de los valores obtenidos teóricamente con los obtenidos de las medidas en el sistema a escala de laboratorio.

ALCANCE

Para desarrollar el modelo, primero fue necesario establecer ciertas condiciones. En este caso, el sistema se ha estudiado de modo que los procesos que tienen lugar en el mismo se han considerado desde un punto de vista de estado de equilibrio. Así, se considera que existe un equilibrio en cada una de las unidades operacionales y de este modo se establecen las ecuaciones que representan los procesos.

Desde el punto de vista de las unidades operacionales, es posible distinguir tres componentes principales: reactor de compostaje, evaporador de columna y enfriador.

En el caso de este trabajo de fin de carrera, la unidad correspondiente al reactor de compostaje no se ha desarrollado como modelo; sino que en su lugar, una serie de condiciones han sido preestablecidas, en función del flujo de aire de recirculación. La principal razón es que sería necesario un estudio más profundo de todos los procesos que tienen lugar en el reactor de compostaje. Esto sería tema para otro trabajo de fin de carrera. Por tanto, podemos considerar en el modelo matemático al reactor de compostaje como una caja negra en la que sabemos lo entra y lo que sale, pero no lo que ocurre en su interior.

Desde el punto de vista de los factores implicados en los diferentes procesos que ocurren en el sistema estudiado, el calor, el agua y los gases son los más importantes. Otros, que podrían ser considerados como factores secundarios, aunque también importantes, son el amoníaco y el ácido nítrico.

Como se ha mencionado anteriormente, uno de los principales objetivos para este trabajo de fin de carrera ha sido desarrollar un modelo matemático que simule los procesos que tienen lugar en el sistema a escala de laboratorio, primero, y en el sistema integrado, finalmente.

Es igualmente importante tener en cuenta que este trabajo de fin de carrera se ha enfocado también en el desarrollo de un programa (informático) de fácil uso, para otra gente, diferente a la gente involucrada en su desarrollo.

Para ello, era importante el papel de Mathcad, puesto que este software proporciona herramientas muy útiles para conseguir este objetivo. Por ejemplo, Mathcad cuenta con el libro electrónico. Se trata de una colección de ficheros interactivos ligados entre sí, que se presentan como pantallas en el ordenador. En el libro electrónico, fórmulas y números, estáticos en una página impresa, “toman vida” en Mathcad. Lo mismo ocurre con los gráficos de las ecuaciones, de modo que el usuario puede modificar el tamaño, recalcular y modificarlos en general.

La manera en que el modelo ha sido desarrollado permite al usuario utilizarlo como una herramienta para comprobar los resultados obtenidos del sistema global; pero también es posible para el usuario utilizarlo de manera más profunda y así pasar de un nivel al siguiente inferior en la estructura del modelo. Esto quiere decir que el usuario tiene la posibilidad no sólo de chequear resultados globales, sino también los correspondientes a los balances específicos (de masa y energía), la estructura en la que está construido el modelo, etc.

Es importante reseñar el hecho de que existe la posibilidad de ampliar el modelo. Esto significa que, aunque el modelo ha sido desarrollado hasta un límite fijado, es posible desarrollarlo aún más, en función de las necesidades. Por ejemplo, podría ser posible desarrollar el modelo aún más teniendo en cuenta algunos parámetros que en este trabajo de fin de carrera han sido tratados como constantes o establecidos fácilmente fijando algunas condiciones. Del mismo modo, podría ampliarse el modelo insertando nuevas unidades operaciones, etc.

Mathcad permite utilizar datos obtenidos de otras fuentes externas, incluso de manera automática.

Esto es útil también para llevar a cabo la segunda parte del trabajo de fin de carrera, esto es, la validación del modelo matemático (con los datos recogidos del modelo a escala de laboratorio).

DISEÑO DEL MODELO

El modelo ha sido desarrollado de modo que presenta varios niveles estructurados.

Desde el nivel superior al inferior, los niveles son:

Sistema → Unidades operacionales → Varios balances → Relaciones físicas

Así, el modelo está constituido por varios ficheros, que representan la estructura establecida para el sistema. A continuación se presenta un esquema de la estructura:

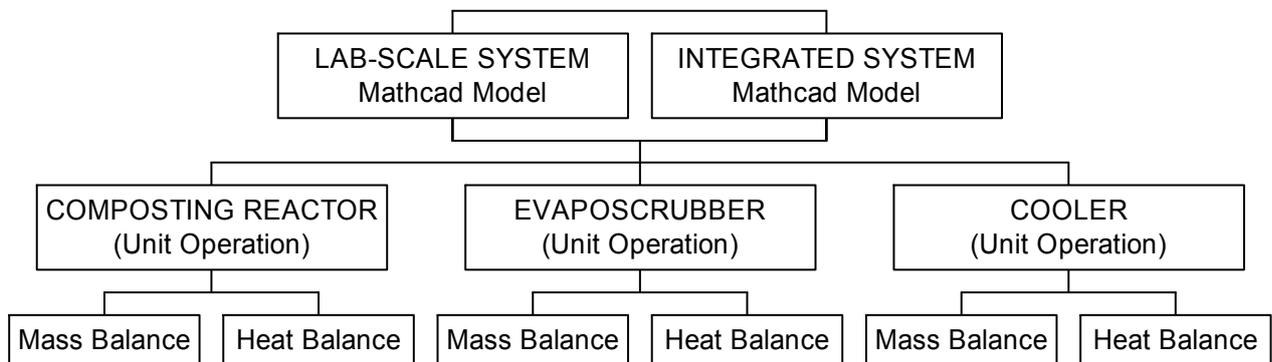


Figura 5: Esquema de la estructuración del modelo

Las relaciones físicas son la base de la estructura. Todos los ficheros están basados en principio en estas relaciones físicas.

Se han creado dos ficheros principales, comunes para el modelo, a los que están ligados el resto de ficheros (en función de las necesidades):

1. *Definitions*³:

En este fichero, los distintos parámetros son definidos de tal modo que es posible utilizarlos en cualquier otro fichero del modelo.

Los parámetros son aquellos relacionados con la composición de cada flujo.

Para establecer estos parámetros se ha creado un vector. En este vector, cada uno de los elementos representa cada uno de los parámetros definidos.

Así, para cada uno de los flujos, existe un vector que define la composición, cantidad de flujo y temperatura de dicho flujo.

Este vector podría ser modificado si fuera necesario en un siguiente paso del desarrollo del modelo. De esta manera podrían tenerse en cuenta aún más factores en el proceso.

³ Los archivos informáticos del modelo están nombrados todos en inglés (idioma original del trabajo de fin de carrera).

A continuación se presenta el vector a utilizar en el modelo:

$$\begin{pmatrix} \text{FLOW} \\ T \\ N_2 \\ CO_2 \\ NH_3 \\ O_2 \\ H_2O \\ NO_3 \\ VOC \\ \lambda \end{pmatrix}$$

2. *Physical constants:*

Este fichero es una aplicación de varias fórmulas físicas y constantes necesarias en muchos modelos como el aquí desarrollado.

Por tanto, este fichero puede utilizarse como una herramienta común para cualquier modelo que se desarrolle en el que estas constantes físicas sean requeridas.

Desde el punto de vista de la estructura del modelo, este fichero es la base del mismo. Todos los demás ficheros están relacionados a éste, puesto que contiene cualquier propiedad física o constante necesaria.

Entre los parámetros definidos en este fichero están: la presión de saturación del agua (en función de la temperatura); la entalpía de evaporación; el calor latente de evaporación; el volumen de un gas (en función de la temperatura); la gravedad; la masa molar del agua; etc.

A estos dos ficheros hay que sumar un tercero, denominado "Initial data".

Este fichero define los valores que serán utilizados por el resto de ficheros como valores de partida para los cálculos. Entre los valores están:

- Temperatura del evaporador
- Temperatura de la camisa de agua del evaporador
- Coeficiente global de transferencia de calor
- Temperatura de condensación
- Dimensiones del evaporador
- Vectores de cada uno de los flujos: en dicho vector, como ya se ha mencionado anteriormente, se refleja la cantidad de flujo, la proporción de cada uno de los componentes y la temperatura.

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 medio⁴, 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.

⁴ 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 (NH_4NO_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 (NH₃):

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

donde:

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

G_{inNH₃}: fracción de amoníaco en el flujo de aire entrante

F_u: flujo de orina que entra en el evaporador

U_{inNH₃}: fracción de amoníaco en la orina

F_{pr}: flujo de producto que sale del evaporador

P_{outNH₃}: fracción de amoníaco en el flujo de producto saliente

Balance de agua (H₂O):

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

donde:

F_u: flujo de orina que entra en el evaporador

U_{inH₂O}: fracción de agua en la orina

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

G_{inH₂O}: fracción de agua en el flujo de aire entrante

F_{ac}: flujo de ácido nítrico que entra al evaporador

Ac_{inH₂O}: fracción de agua en el flujo de ácido nítrico

F_{pr}: flujo de producto que sale del evaporador

P_{outH₂O}: fracción de agua en el flujo de producto saliente

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

Gas_{outH₂O}: fracción de agua en el aire saliente

Balance de nitrato (NO₃):

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

donde:

F_{ac}: flujo de ácido nítrico que entra al evaporador

Ac_{inNO₃}: fracción de nitrato en el flujo de ácido nítrico

F_{pr}: flujo de producto que sale del evaporador

P_{outNO₃}: 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.

Del mismo modo, se ha definido la función que representa la cantidad de agua evaporada en el sistema. Igualmente, es posible estudiar la variación de esta función al variar los parámetros relacionados.

$$W_E := \left(\frac{P_{out_{NH_3}} - \frac{1}{c_2} \cdot G_{in_{NH_3}}}{U_{in_{NH_3}}} \cdot U_{in_{H_2O}} + \frac{P_{out_{NO_3}}}{Ac_{in_{NO_3}}} \cdot Ac_{in_{H_2O}} - 1 \right) \cdot c_2 \cdot Q_{in}$$

Donde:

W_E : agua evaporada

$P_{out_{NH_3}}$: fracción de amoníaco en el flujo de producto saliente

$G_{in_{NH_3}}$: fracción de amoníaco en el flujo de aire entrante

$U_{in_{NH_3}}$: fracción de amoníaco en la orina entrante en el evaporador

$U_{in_{H_2O}}$: fracción de agua en la orina entrante en el evaporador

$P_{out_{NO_3}}$: fracción de nitrato en el flujo de producto saliente

$Ac_{in_{NO_3}}$: fracción de nitrato en el agua condensada

$Ac_{in_{H_2O}}$: fracción de agua en el agua condensada

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

c_1 y c_2 son dos parámetros definidos como sigue:

$$c_2(Ac_{in}, U_{in}, G_{in}, T_{evap}, P_{out}) := \frac{G_{in_{H_2O}} \cdot U_{in_{NH_3}} - G_{in_{NH_3}} \cdot U_{in_{H_2O}} - c_1(T_{evap}, G_{in}) \cdot U_{in_{NH_3}}}{P_{out_{H_2O}} \cdot U_{in_{NH_3}} - P_{out_{NH_3}} \cdot U_{in_{H_2O}} - \frac{P_{out_{NO_3}}}{Ac_{in_{NO_3}}} \cdot U_{in_{NH_3}}}$$

$$c_1(T_{evap}, G_{in}) := \frac{G_{in_{N_2}} + G_{in_{O_2}} + G_{in_{CO_2}}}{1 - AH(T_{evap})}$$

Modelo del evaporador (transferencia de calor):

Para simular los procesos de transferencia de calor que ocurren en el evaporador, se ha desarrollado un archivo informático en Mathcad, basado también en el ya desarrollado modelo para los balances de materia en el evaporador. Su nombre, "Heat balance".

Utilizando las ecuaciones de balance de calor que representan el proceso en el evaporador ha sido posible desarrollar esta parte del modelo.

Las transferencias de calor que tienen lugar son las siguientes:

- Desde la camisa de agua al fluido dentro del evaporador:
 - Convección desde la camisa de agua
 - Conducción a través del cristal del evaporador
 - Convección hacia el fluido

- Desde el fluido a las burbujas de aire: para el modelo, se ha supuesto que la transferencia de calor del líquido a las burbujas de aire es lo suficientemente rápido como para poder equiparar las temperaturas en ambos medios.

Esta parte del modelo permite al usuario calcular la temperatura de evaporación y estudiar la evolución de dicha temperatura en función de una serie de variables.

Es necesario definir el coeficiente global de transferencia de calor para la camisa de agua del evaporador. Esto es posible teniendo en cuenta los diferentes procesos de transferencia de calor que tienen lugar entre la camisa de agua y el líquido dentro del evaporador. Conociendo los diferentes coeficientes de transferencia de calor es posible definir el coeficiente global:

$$K(r_1, r_2, L, k_{\text{glass}}, h_{\text{water}}, h_{\text{urine}}, A_e, A_i) := \frac{1}{\left(\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot k_{\text{glass}}} + \frac{1}{h_{\text{water}} \cdot A_e} + \frac{1}{h_{\text{urine}} \cdot A_i} \right)} \cdot \pi \cdot L \cdot (r_1 + r_2)$$

donde:

K: coeficiente global de transferencia de calor

r₁: radio interno de la pared de cristal del evaporador

r₂: radio externo de la pared de cristal del evaporador

L: longitud del evaporador

h_{water}: coeficiente de transferencia de calor del agua

h_{urine}: coeficiente de transferencia de calor de la orina

k_{glass}: coeficiente de transferencia de calor de la pared de cristal

A_i: superficie interna de la pared del evaporador

A_e: superficie externa de la pared del evaporador

La ecuación que define la temperatura de evaporación en el evaporador, como función de los parámetros relacionados, es la siguiente:

$$f(T_{\text{evap}}) := F_{\text{pr}} \cdot c_{\text{purine}} \cdot (T_{\text{evap}} - U_{\text{inTf}}) + Q_{\text{out}}(G_{\text{in}}, T_{\text{evap}}, Q_{\text{in}}) \cdot c_{\text{pgas}} \cdot (T_{\text{evap}} - G_{\text{inTf}}) \dots \blacksquare \\ + Q_{\text{out}}(G_{\text{in}}, T_{\text{evap}}, Q_{\text{in}}) \cdot AH(T_{\text{evap}}) \cdot H_{\text{vap}} - Q_{\text{in}} \cdot G_{\text{inH}_2\text{O}} \cdot H_{\text{vap}} - K_G \cdot A \cdot (T_{\text{wj}} - T_{\text{evap}})$$

Donde:

T_{evap} : temperatura en el evaporador

C_{purine} : coeficiente específico de la orina

F_{pr} : flujo de producto

U_{inTf} : temperatura de la orina

Q_{out} : flujo de aire saliente

Q_{in} : flujo de aire entrante

G_{in} : temperatura del aire entrante

C_{pgas} : coeficiente específico del flujo de aire

AH : fracción molar del aire en función de la temperatura

H_{vap} : entalpía de evaporación estándar

K_G : coeficiente global de transferencia de calor

A : superficie del evaporador

T_{wj} : temperatura de la camisa de agua

Una vez desarrollado el modelo matemático que representa los procesos de transferencia de calor, se estudió la evolución de la temperatura de evaporación como función de la variación de diversos parámetros:

- Coeficiente global de transferencia de calor
- Temperatura de la camisa de agua
- Superficie del evaporador
- Flujo de aire entrante

En el modelo existen varios gráficos que representan dicha evolución.

El usuario puede utilizar el modelo para encontrar respuesta a sus propias preguntas relacionadas con los procesos de transferencia de calor en el evaporador.

Discusión de los resultados obtenidos en el modelo matemático del evaporador:

- Coeficiente global de transferencia de calor:

Como es de esperar, la temperatura en el interior del evaporador será similar a la de la camisa de agua, y al final, al aumentar el coeficiente global de transferencia de calor, será la misma.

- Temperatura de la camisa de agua:

Al aumentar la temperatura de la camisa de agua, también aumenta la temperatura en el interior del evaporador. La relación entre ambas variables es prácticamente proporcional.

Puesto que esta proporción depende también del valor de otras variables, como por ejemplo el coeficiente global de transferencia de calor, se han presentado varias posibilidades. De este modo, estudiando el cambio de la temperatura en el interior del evaporador como una función de la variación de la temperatura de la camisa de agua, variando al mismo tiempo el coeficiente global de transferencia de calor, se ha comprobado, como era de esperar, que cuanto mayor es el valor del coeficiente global de transferencia de calor, más sensible es la temperatura en el interior del evaporador al cambio de temperatura en el camisa de agua.

- Superficie del evaporador:

Cuando la superficie de contacto entre la camisa de agua y el líquido interior (orina) aumenta, la temperatura en el interior del evaporador aumenta, tendiendo al valor de la temperatura de la camisa de agua (manteniendo constantes el resto de variables).

- Flujo de aire entrante:

Puesto que la temperatura del aire de recirculación es inferior a la de la camisa de agua, a mayor flujo, menor es la temperatura que alcanza la orina.

Esta relación variará con el valor del coeficiente global de transferencia de calor, así como con otras variables.

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:

Gas_{out} : flujo de aire entrante al condensador

T_{cond} : temperatura en el condensador

V_{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_{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_{cout} : flujo de aire saliente del condensador

C_{pair} : calor específico del aire

AH : fracción molar del aire en función de la temperatura

C_{pwg} : calor específico del vapor de agua

q_{cond} : cantidad de agua condensada

C_{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:

Urine_{Tf} : temperatura del flujo de orina saliente

Q_{cooler} : balance de calor en el condensador

M_{urine} : masa molecular de la orina

C_{purine} : calor específico de la orina

A_0 : superficie del condensador

T_{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_{coutTf} : temperatura del flujo de aire saliente del condensador

Q_{coutFLOW} : flujo de aire saliente del condensador

C_{pair} : calor específico del aire

AH : fracción molar del aire en función de la temperatura

C_{pwwg} : calor específico del vapor de agua

q_{cond} : cantidad de agua condensada

C_{pl} : calor específico del agua líquida

ΔH : 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_{purine} : calor específico de la orina

U_{coutTf} : temperatura del flujo de orina saliente

U_{cinTf} : temperatura del flujo de orina entrante

U_{cinFLOW} : flujo de orina entrante

M_{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_{coutTf} : temperatura del flujo de orina saliente del condensador

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

U_{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*:

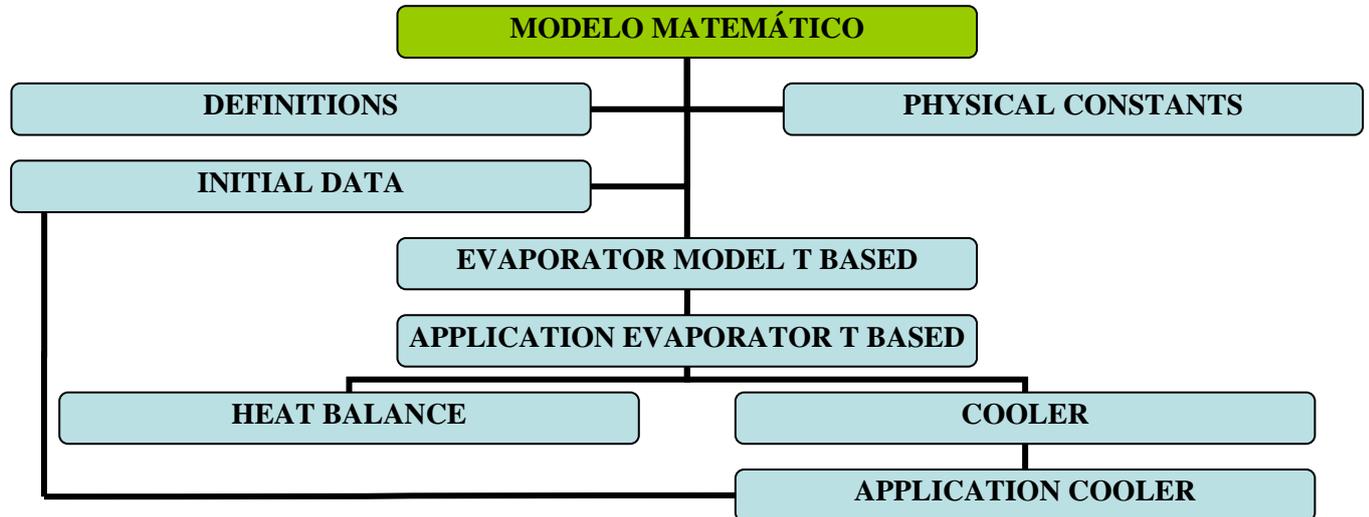
En este fichero se definen los distintos flujos presentes en el enfriador, así como el balance de calor en el mismo.

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_3):

$$Q_{in} \cdot G_{in\text{NH}_3} + F_u \cdot U_{in\text{NH}_3} - F_{pr} \cdot P_{out\text{NH}_3} \cdot \frac{1}{M_{urine}} = 0$$

Donde:

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

$G_{in\text{NH}_3}$: fracción de amoníaco en el flujo de aire entrante

F_u : flujo de orina entrante en el evaporador

$U_{in\text{NH}_3}$: fracción de amoníaco en el flujo de orina

F_{pr} : flujo de producto saliente del evaporador

$P_{out\text{NH}_3}$: fracción de amoníaco en el producto saliente

M_{urine} : 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.

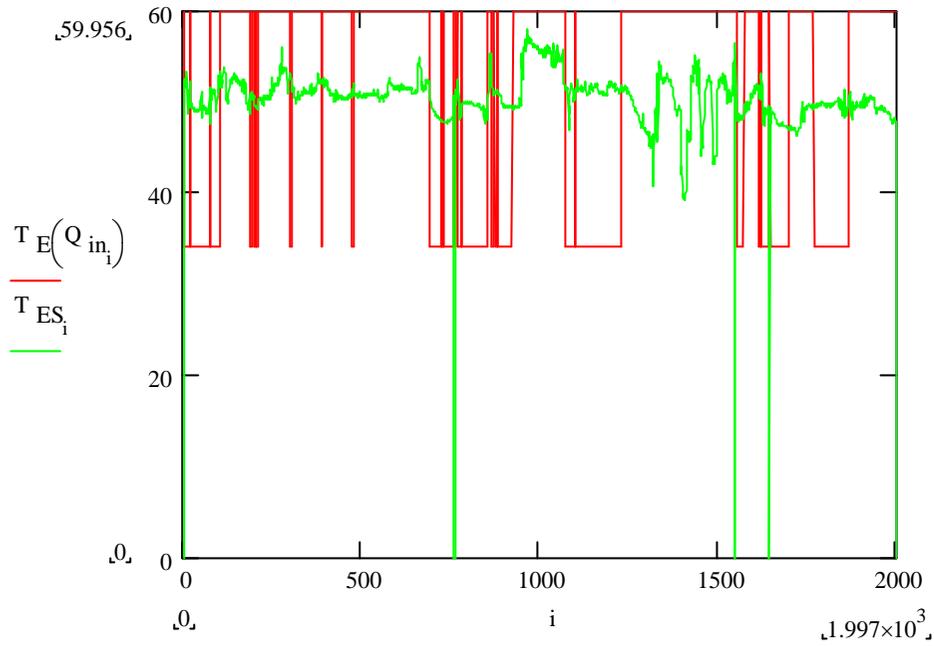


Figura 6: Comparación de los datos obtenidos para las temperaturas del modelo (T_E) y del sistema a escala del laboratorio (T_{ES})

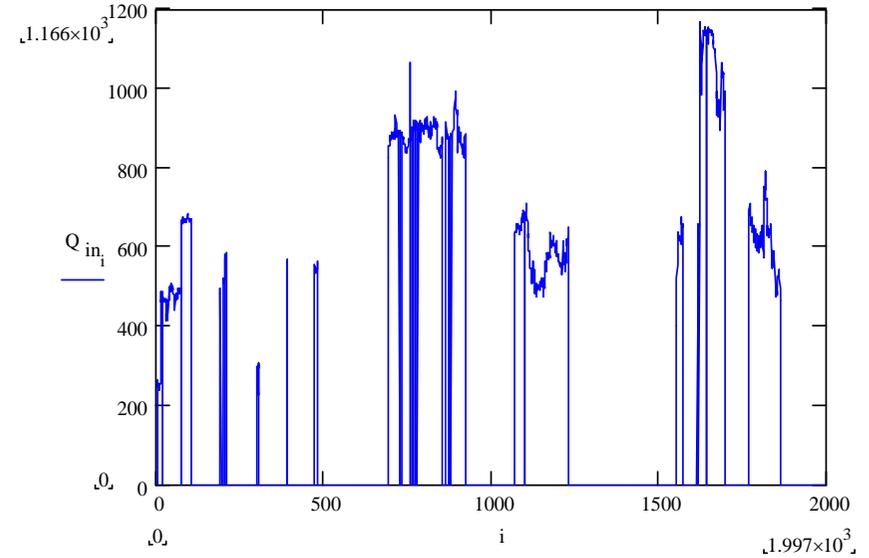


Figura 7: Variación del flujo de recirculación de aire en el sistema (Medidas del sistema del laboratorio)

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).

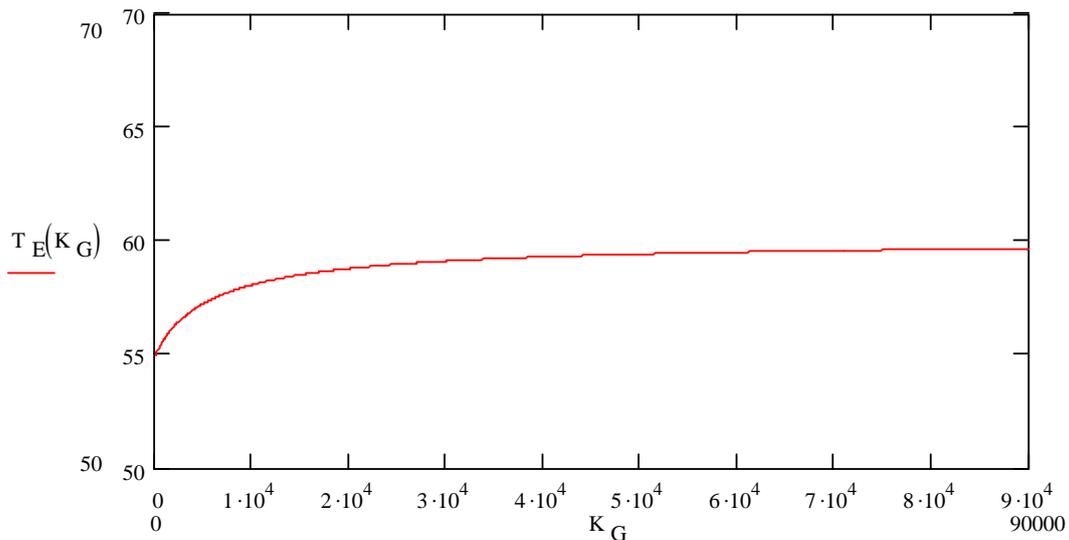


Figura 8: Evolución de la temperatura en el evaporador (T_E) en función del coeficiente global de transferencia de calor.

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 $9000 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$.

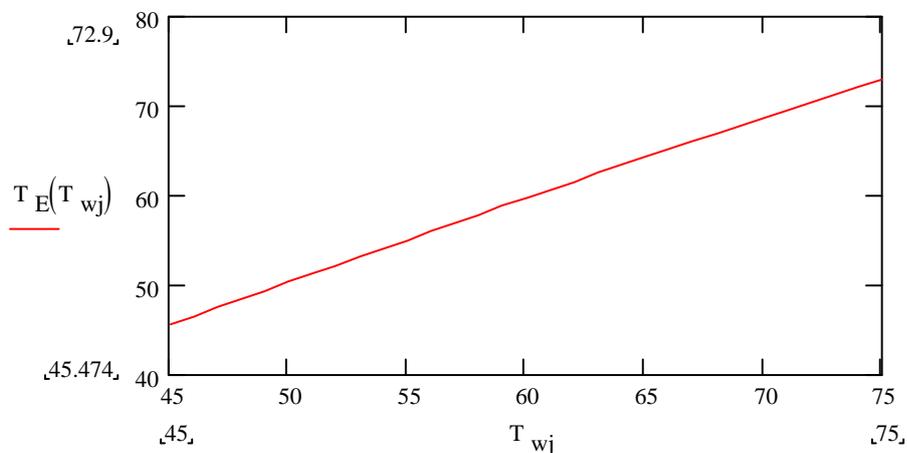


Figura 9: Evolución de la temperatura en el evaporador como función de la temperatura de la camisa de agua.

Cuando la superficie de contacto entre la camisa de agua y el líquido (orina) aumenta (Figura 10) la temperatura de evaporación (T_{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.

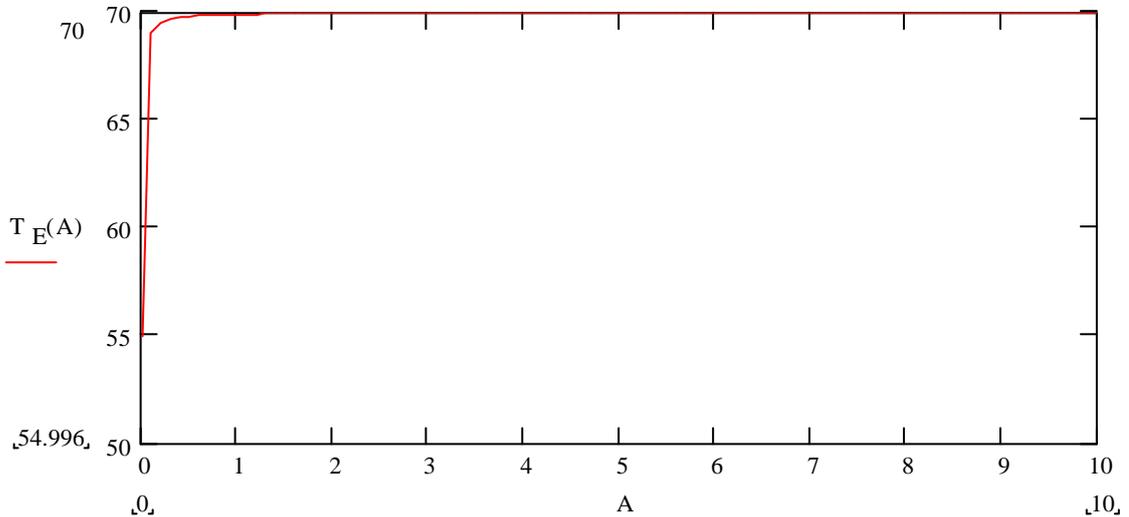


Figura 10: Evolución de la temperatura en el evaporador en función de la superficie del mismo.

La siguiente figura (Figura 11) representa la evolución de la temperatura en el evaporador en función del flujo de aire entrante de recirculación (Q_{in}). Puesto que la temperatura del flujo de aire entrante es inferior a T_{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.

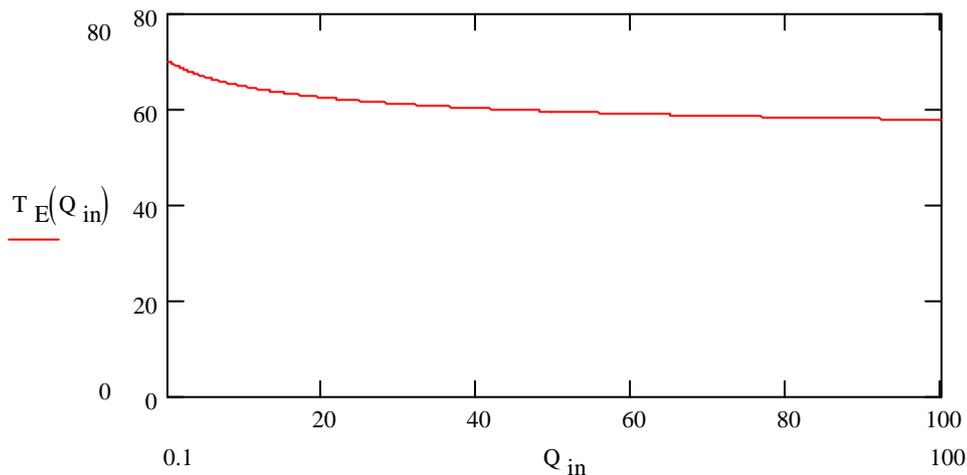


Figura 11 Evolución de la temperatura en el evaporador en función del flujo de aire.

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.

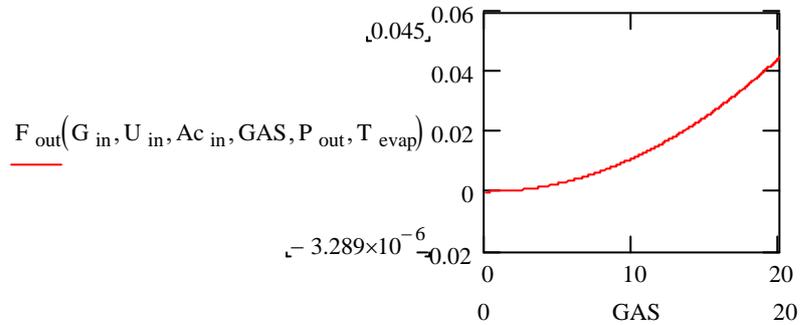


Figura 12 Evolución del flujo de líquido fertilizante en función del flujo de aire saliente del evaporador.

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.

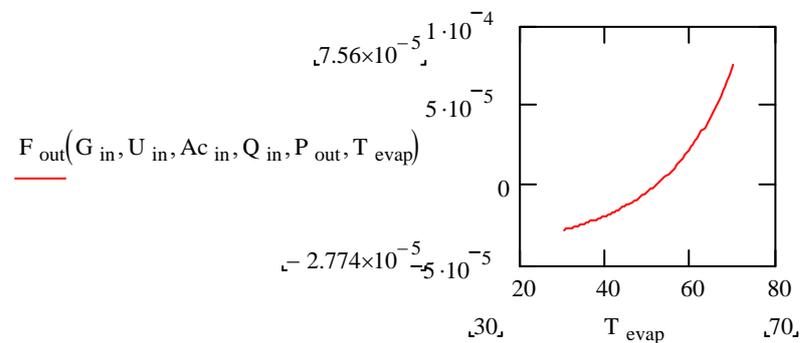


Figura 13 Evolución del flujo de fertilizante líquido en función de la temperatura en el evaporador.

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 recalculan 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.