

Fecha de presentación del Informe: Día Mes Año

1. Datos generales del Proyecto

Código del proyecto: 2925			
Título del proyecto: Modelamiento, simulación y análisis termodinámico de equipos, operaciones y procesos de secado de productos agroalimentarios			
Facultad o Instituto Académico: Ingeniería			
Departamento o Escuela: Escuela de Ingeniería de Alimentos			
Grupo (s) de investigación: BioNovo			
Entidades: Universidad del Valle – Universidad de los Andes			
Palabras claves: secador asistido por bomba de calor, eficiencia energética			
Investigadores ¹	Nombre	Tiempo asignado	Tiempo dedicado
Investigador Principal	Juan Carlos Gómez Daza – UV	5 h/semana	5 h/semana
	Nicolás Ríos Ratkovich – UAndes	5 h/semana	5 h/semana
Coinvestigadores	Carlos Andrés Gómez Velasco-UV	20 h/semana	20 h/semana
	Miguel Andrés Daza Gómez-UAndes	24 h/semana	24 h/semana
	Juan David Benavides-UV	6.3 h/semana	7 h/semana
Otros participantes			

2. Resumen ejecutivo:

Los países necesitan optimizar el aprovechamiento de sus recursos y Colombia debe empezar a tener políticas claras en cuanto el uso racional de la energía y a la vez incrementar la producción de alimentos de buena calidad con un tiempo de vida útil aceptable dentro de los parámetros internacionales. Así, la pregunta de investigación

¹ Todas las personas relacionadas en el informe y que participen en el proyecto deben haber suscrito el acta de propiedad intelectual de acuerdo con los formatos establecidos.

es: ¿Hasta dónde es posible mejorar la eficiencia energética de los procesos de secado, mediante el modelamiento, simulación y análisis termodinámico?

Los objetivos **General**, Modelar, simular y analizar energéticamente equipos, operaciones y procesos de secado. **Específicos**: 1. Modelar y simular el proceso de secado asistido por bomba de calor modificado, para mejorar su desempeño. 2. Evaluar mediante simulación las condiciones del compresor del circuito de la bomba de calor original y modificado. 3. Rediseñar la cámara de secado del secador asistido por bomba de calor modificado. 4. Determinar las condiciones de operación de diferentes procesos de secado, tales como humedad relativa (temperatura), velocidad del aire y espesor de la muestra que permitan obtener mayores valores de DE, MER, SMER, DR y menores valores de SEC. 5. Evaluar desde el punto de vista termodinámico y validar energética y exergéticamente procesos de secado disponibles en Univalle y Uniandes.

Metodología objetivos específicos 1, 2 y 3: Se realizaron experimentos computacionales para determinar el efecto de la humedad relativa del aire sobre el contenido de humedad final del material. Se escogieron modelos básicos de la literatura (algunos reportados por el investigador principal de UV) para las condiciones de frontera. Se utilizó el paquete computacional ANSYS para el trabajo de pregrado, y STAR CCM+ para los trabajos de posgrado, ejecutados en máquinas virtuales disponibles en la Universidad de los Andes. Para validar la respuesta obtenida, se realizó un análisis de sensibilidad al mallado, el cual permitió confirmar el ajuste de los modelos. Se confirmó la independencia del resultado respecto al mallado, se procedió a aumentar el grado de detalle del modelo, logrando simular la cámara de secado en 3D.

Los tres primeros objetivos específicos se cumplieron a cabalidad, sin embargo, los objetivos específicos 4 y 5, dependen de la vinculación de un estudiante de doctorado, y parte la está desarrollando un estudiante de pregrado de ingeniería química, pero al momento de cerrar el proyecto, no ha entregado su documento. Entonces, se logró simular y rediseñar la cámara de secado (corazón del equipo), con hallazgos interesantes para mejoras adicionales. Se validó la hipótesis de la ubicación del compresor dentro del circuito de aire, algo que no tiene antecedentes en la literatura. Se lograron todos los productos propuestos, y en algunos ítems, mucho más.

A manera de conclusión, este tipo de iniciativas, alianzas, son en todos los aspectos, generadoras de ganancias académicas, fortalecen la capacidad institucional, y la dinámica investigativa de los participantes. El equipo de secado asistido por bomba de calor disponible, y el rediseñado, presentan características particulares, y de alguna manera superiores a los que se reportan en la literatura a nivel mundial, lo que podría direccionar una posible innovación tecnológica.

Executive Summary:

Countries need to optimize the use of their resources and Colombia must begin to have clear policies regarding the rational use of energy and at the same time increase the production of good quality food with an acceptable shelf life within international parameters. Thus, the research question: How far is it possible to improve the energy efficiency of drying processes, through modeling, simulation and thermodynamic analysis?

The objectives General, model, simulate and analyze equipment, operations and drying processes energetically. Specific: 1. Model and simulate the drying process assisted by modified heat pump, to improve its performance. 2. Evaluate by simulation the compressor conditions of the original and modified heat pump circuit. 3. Redesign the drying chamber of the dryer assisted by modified heat pump. 4. Determine the operating conditions of different drying processes, such as relative humidity (temperature), air velocity and sample thickness that allow obtaining higher values of DE, MER, SMER, DR and lower values of SEC. 5. To evaluate from the thermodynamic point of view and to validate energetically and exergetically drying processes available in Univalle and Uniandes.

Methodology specific objectives 1, 2 and 3: Computational experiments were carried out to determine the effect of the relative humidity of the air on the final moisture content of the material. Basic models of the literature (some reported by the UV principal investigator) were chosen for border conditions. The computerized package ANSYS was used for the undergraduate work, and STAR CCM + for the postgraduate work, executed in virtual machines available in the Universidad de los Andes. To validate the response obtained, a meshing sensitivity analysis was carried out, which confirmed the fit of the models. The independence of the result with regard to meshing was confirmed, and the degree of detail of the model was increased, thus simulating the 3D drying chamber.

The first three specific objectives were fully met, however, specific objectives 4 and 5, depend on the link of a PhD student, and part is being developed by an undergraduate student of chemical engineering, but at the time of closing the project, you have not delivered your document. Then, it was possible to simulate and redesign the drying chamber (heart of the equipment), with interesting findings for further improvements. The hypothesis of the location of the compressor within the air circuit was validated, something that has no history in the literature. All the proposed products were achieved, and in some items, much more.

As a conclusion, this type of initiatives, alliances, are in all aspects, generating academic gains, strengthen the institutional capacity, and the investigative dynamics of the participants. The available heat pump assisted drying equipment, and the redesigned one, present particular characteristics, and in some way superior to those reported in the

literature worldwide, which could lead to a possible technological innovation.

3. Síntesis del proyecto:

Tema

Nuestro país se caracteriza por tener una inversión para la investigación, muy por debajo de países homólogos de la región, por lo tanto, disponer de recursos financieros no siempre está garantizado. Así, el modelamiento y la simulación, en la práctica sólo dependen de la disponibilidad de buenos equipos de cómputo y de estudiantes que se apasionen en el tema, que son un número importante de acuerdo a las estadísticas generales de los posgrados.

El uso de "modelos" en Ingeniería está consolidado, pero la utilización de "modelos dinámicos" en vez de los "modelos de estado estacionario" es más reciente. Esto se refleja en la existencia en el mercado de potentes paquetes de software destinados a la simulación dinámica. El software actual posee herramientas matemáticas sofisticadas, las cuales pueden solucionar tanto la condición inicial de estado estacionario, así como los siguientes cambios dinámicos. A menudo, una aproximación simplificada puede ser muy útil en la clarificación de ideas preliminares antes de ir a paquetes de escala comercial.

En los secadores convencionales, el aire húmedo se expulsa a la atmósfera, lo que implica una pérdida del calor sensible y del calor latente de vaporización asociado a éste. Esta energía se puede recuperar usando secadores particulares. Una tecnología prometedora es el secado asistido por bomba de calor, que provee un ambiente controlable de secado (temperatura- humedad) para obtener productos de mejor calidad a bajo consumo de energía.

Por otro lado, el balance térmico de los secadores industriales muestra que en la mayoría de casos se consume 80% de la energía de secado para vaporizar agua contenida en el producto a secar y el 20% restante incluye las pérdidas térmicas, el calentamiento del producto y el calentamiento del aire frío exterior que penetra en el secador. Así, la eficiencia térmica del secado convectivo con aire caliente está entre 35-40 % mientras que para un secador tipo deshumidificador de bomba de calor (SBC) es de 95%, siendo su costo de operación moderado.

Los países necesitan optimizar el aprovechamiento de sus recursos y Colombia debe empezar a tener políticas claras en cuanto el uso racional de la energía y a la vez incrementar la producción de alimentos de buena calidad con un tiempo de vida útil aceptable dentro de los parámetros internacionales. La agroindustria hortofrutícola nacional, aunque es un sector industrial aun pequeño en la economía nacional, en los últimos años muestra una dinámica de crecimiento importante en algunas de sus líneas

de producción.

Para abordar algunos de los aspectos mencionados, específicamente el diseño, análisis y optimización de sistemas térmicos existe la herramienta del análisis termodinámico, en particular el análisis de exergía. El uso racional de la energía es un problema real en el mundo en general y en Colombia en particular. Ante el incremento en el costo de la energía y las regulaciones legislativas desde los años ochenta ha aparecido una demanda por nuevas tecnologías en métodos de secado y diseño de secadores. Por su eficiencia energética, el secador de bomba de calor es uno de los sistemas más apropiados para estar en coherencia con el concepto de desarrollo sostenible.

Todo lo anterior, permite concluir que el área aún tiene lagunas en el conocimiento y además, existen resultados contradictorios. Así, como punto de inicio, es válido el análisis termodinámico y se debe tratar de analizar la interacción entre el aire y el alimento cuando se integran en el SBC, empleando una herramienta de simulación (ej. COMSOL®, openFOAM, STAR CCM+ [CD-adapco]). Entonces, los problemas a resolver son de carácter científico (validar o rechazar algunas hipótesis), buscando generar conocimiento y explicar a un nivel macro la fenomenología del proceso; y de carácter tecnológico y energético-ambiental (al evaluar la tecnología), buscando aportar a la competitividad y desarrollo productivo del país.

Las preguntas de investigación que se buscaban resolver son:

Principal: ¿Hasta dónde es posible mejorar la eficiencia energética de los procesos de secado, mediante el modelamiento, simulación y análisis termodinámico?

¿Cuál es la diferencia en eficiencia térmica de los procesos de secado en un SBC modificado, respecto a los secadores convectivos clásicos?

¿Cuáles variables influyen de manera significativa en la operación de diferentes sistemas de secado?

¿Qué límites imponen los diferentes sistemas de secado al planteamiento del modelo matemático?

Objetivos: general y específicos

General

Modelar, simular y analizar energéticamente equipos, operaciones y procesos de secado.

Específicos

1. Modelar y simular el proceso de secado asistido por bomba de calor modificado, para mejorar su desempeño.
2. Evaluar mediante simulación las condiciones del compresor del circuito de la bomba de calor original y modificado.
3. Rediseñar la cámara de secado del secador asistido por bomba de calor modificado.
4. Determinar las condiciones de operación de diferentes procesos de secado, tales como humedad relativa (temperatura), velocidad del aire y espesor de la muestra que permitan obtener mayores valores de DE, MER, SMER, DR y menores valores de SEC.
5. Evaluar desde el punto de vista termodinámico y validar energética y exergéticamente procesos de secado disponibles en Univalle y Uniandes.

Metodología

Objetivos específicos 1, 2 y 3: Modelado y simulación

Se realizaron experimentos computacionales para determinar el efecto de la humedad relativa (temperatura) del aire sobre el contenido de humedad final del material.

Se escogió en primer lugar los modelos básicos reportados en la literatura para condiciones de frontera (incluidos los del investigador principal UV) y se especificaron en el simulador. Se utilizó el paquete computacional ANSYS para el trabajo de pregrado, y STAR CCM+ (CD-adapco) para los de posgrado. Se ejecutaron en PC propios y máquinas virtuales disponibles en la Universidad de los Andes.

Para validar la respuesta obtenida, se realizó un análisis de sensibilidad al mallado, el cual permitió confirmar el ajuste de los modelos. Confirmada la independencia del resultado respecto al mallado, se procedió a aumentar el grado de detalle del modelo y se incluyó el aire para sistemas de una muestra y multimuestras, este último equivalente a un modelo 3D de una bandeja.

Objetivos específicos 4 y 5: Aspectos termodinámicos

En caso de no disponer de datos experimentales, se utilizarán secadores como el asistido por bomba de calor (SBC) disponible en la Universidad del Valle, entre otros, y secadores disponibles en la Universidad de los Andes.

Para la evaluación de energía y exergía, se utilizarán las definiciones de SMER, SEC, DE, MER, DR.

Las propiedades para las condiciones del aire se obtendrán del software The PsychTool

o de la carta psicrométrica.

Resultados obtenidos

Se validó la hipótesis de que, el compresor ubicado en el circuito de aire, presenta un coeficiente de transferencia de calor convectivo, superior al que se obtiene en convección natural, que es como se ha venido trabajando.

La cámara de secado, se simuló en varias configuraciones, logrando tener aspectos de rediseño prometedores para aumentar la eficiencia de secado en este tipo de equipos, operaciones y procesos.

Lo anterior permite inferir que, se logró desarrollar completamente, y con aportes significativos, los tres primeros objetivos específicos.

Respecto a los objetivos específicos 4 y 5, sólo se avanzó parcialmente, ya que, por motivos ajenos a los investigadores, no se contó con un estudiante de doctorado. Por otro lado, un estudiante de pregrado de ingeniería química que, está participando del proyecto, está bajo la figura de la amnistía, y por cuestiones laborales, sólo tiene resultados parciales relativos a estos objetivos, pero no ha entregado su documento final a la fecha.

Principales conclusiones y/o recomendaciones

El modelamiento y la simulación son herramientas fundamentales para el avance de la ingeniería en general, y para este proyecto en particular. Así mismo, la sinergia entre grupos, y entre universidades son alianzas valiosas y prometedoras.

La ubicación del compresor de la bomba de calor, logra mejor desempeño al ser ubicado dentro del circuito de aire, pues permite aprovechar su calor generado, y presenta mejor coeficiente de transferencia de calor por convección. Esto es una innovación en la tecnología.

La cámara de secado original, presenta deficiencias que, fueron identificadas tanto en el trabajo de pregrado, donde se simuló con ANSYS, como en los trabajos de posgrado, donde se trabajó con simuladores comerciales potentes como el STAR CCM+.

Se avanzó en el nivel de detalle con que se han venido simulando el proceso de secado, ya que, hasta el momento, los reportes son para rodajas individuales, sin la cámara. Logrando con el proyecto, alcanzar un mejor panorama analítico respecto a lo que está sucediendo en la cámara de secado y, con muchas muestras.

La recomendación principal es, seguir escalando en el nivel de detalle de la simulación, a partir de la integración de más estudiantes a la línea de trabajo, y seguir buscando

recursos que permitan apalancar el trabajo.

4. Impactos actual o potencial:

Académico

Con el equipo rediseñado y construido en el proyecto, se puede realizar **trabajo docente** en temas como:

Sicrometría

Termodinámica (Ciclo de bomba de calor aplicado)

Operaciones de secado

Vida útil de materiales sensibles a la temperatura

En cuanto a **formación de recursos humanos**, se logró:

Terminar un trabajo de grado en ingeniería mecánica (no estaba proyectado).

Dos trabajos de investigación de maestría (uno por cada universidad).

Investigativo

En divulgación de resultados, se tiene:

Presentación de trabajo en un evento internacional Artículo en la página del congreso (Proceedings): **Numerical analysis of a convective drying chamber from drying air velocity and temperatura perspective**

[http://avestia.international-](http://avestia.international-aset.com/MHMT2018_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT_134.pdf)

[aset.com/MHMT2018_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT_134.pdf](http://avestia.international-aset.com/MHMT2018_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT_134.pdf)

Se presentó un póster en un evento nacional: V seminario internacional de investigaciones agroindustriales- SiiA 2018, SENA Buga.

Artículo en Journal JFFHMT: **3D computational fluid dynamics analysis of a convective drying chamber**. Está pendiente trámite de pago publicación.

Se sometió al Journal of Food Process Engineering, el artículo: **Heat transfer in compressor-air flow of a modified heat pump dryer**.

Desarrollos futuros

Al validarse la ubicación del compresor dentro del circuito del aire, además del sistema de control por humedad relativa, se logra una innovación respecto a los equipos actualmente en operación.

Hace un tiempo la OTRI realizó un estudio de vigilancia tecnológica e inteligencia de mercados, pero no ha reportado a los investigadores, qué estado tenía la tecnología. A futuro, contando con nuevos estudiantes, se continuará en la evolución del rediseño, apuntando a la simulación total del equipo, lo que permitiría alcanzar niveles de detalle únicos en el área.

Se adjunta copia de todos los productos citados.

5. Productos:

Tabla No. 1. **Cantidad y tipo de productos pactados en el Acta de Trabajo y Compromiso y productos finalmente presentados**

TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS				No. de PRODUCTOS PRESENTADOS			
	Q1	Q2	Q3	Q4	Q1	Q2	Q3	Q4
Productos de nuevos conocimientos								
Artículo en revista ISI-SCOPUS:								
Artículo completo publicado en revistas indexadas	A1	A2	B	C	A1	A2	B	C
	1				2			
Libros de autor que publiquen resultados de investigación								
Capítulos en libros que publican resultados de investigación								
Productos o procesos tecnológicos patentados o registrados								
• Prototipos y patentes	0				1			
• Software								
Productos o procesos tecnológicos usualmente no patentables o protegidos por secreto industrial								
Normas basadas en resultados de investigación								
Formación de recursos humanos	No. de estudiantes vinculados	No. de tesis			No. De estudiantes Vinculados	No. De tesis		
Estudiantes de pregrado	0				2	2		
Semillero de Investigación								



TIPO DE PRODUCTOS	No. de PRODUCTOS PACTADOS		No. de PRODUCTOS PRESENTADOS	
	Estudiantes de maestría	2	2	2
Estudiantes de doctorado	1		1	
Joven investigador				
Productos de divulgación				
Publicaciones en revistas no indexadas				
Ponencias presentadas en eventos (congresos, seminarios, coloquios, foros)	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales	No. de ponencias nacionales	No. de ponencias internacionales
Propuesta de investigación	1	1	1	1
Propuestas presentadas en convocatorias externas para búsqueda de financiación.		1	1	1

Tabla No. 2. Detalle de productos

Para cada uno de los productos obtenidos y relacionados en la tabla anterior, indique la información solicitada para cada uno, anexando copia de las respectivas constancias. Como anexo a este formato encontrará el instructivo para instructivo para la revisión de informes finales y productos

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Numerical analysis of a convective drying chamber from drying air velocity and temperatura perspective
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Budapest, Hungría, abril 12-14, 2018



Participantes:	Miguel Andrés Daza Gómez, Carlos Andrés Gómez Velasco, Nicolás Ratkovich, Juan Carlos Gómez Daza
Sitio de información:	http://avestia.international-aset.com/MHMT2018_Proceedings/files/paper/ICMFHT/ICMFHT_134.pdf
Formas organizativas:	BioNOvo, UV – GDPP, UAndes

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	3D computational fluid dynamics analysis of a convective drying chamber
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	JFFHMT20180919-01
Participantes:	Miguel Andrés Daza Gómez, Carlos Andrés Gómez Velasco, Juan Carlos Gómez Daza, Nicolás Ratkovich
Sitio de información:	
Formas organizativas:	BioNOvo, UV – GDPP, UAndes

Tipo de producto:	Artículo
Nombre General:	Heat transfer in compressor-air flow of a modified heat pump dryer
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Recién sometido
Participantes:	Benavides-Rodríguez Juan, Gómez-Daza, Juan, Daza-Gómez, Miguel, Ratkovich, Nicolás
Sitio de información:	
Formas organizativas:	BioNOvo, UV – GDPP, UAndes



Tipo de producto:	Póster
Nombre General:	Análisis en CFD de una cámara convectiva de secado
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Guadalajara de Buga, 2018
Participantes:	Juan David Benavides-Rodríguez, Juan Carlos Gómez-Daza, Miguel Andrés Daza-Gómez, Nicolás Ratkovich
Sitio de información:	
Formas organizativas:	BioNOvo, UV – GDPP, UAndes

Tipo de producto:	Prototipo Industrial
Nombre General:	Secador Asistido por Bomba de Calor
Nombre Particular:	Escribir el nombre del producto generado. Ejemplo: Artículo Rorippa curvisiliqua (Cruciferae), nueva en Europa
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, 24 noviembre 2018
Participantes:	Juan Carlos Gómez-Daza, Dartico, SAS
Sitio de información:	Laboratorio Fenómenos de Transporte, Escuela de Ingeniería de Alimentos, Edificio 32, Universidad del Valle
Formas organizativas:	BioNovo, UV.

Tipo de producto:	Tesis de Maestría
Nombre General:	Simulación del comportamiento de un secador asistido por bomba de calor mediante STAR CCM+
Nombre Particular:	



Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, marzo de 2019
Participantes:	Carlos Andrés Gómez Velasco, Juan Carlos Gómez Daza
Sitio de información:	Biblioteca Central Mario Carvajal, Archivo EIA.
Formas organizativas:	BioNovo

Tipo de producto:	Trabajo de Grado Pregrado en Ingeniería Mecánica
Nombre General:	Análisis y optimización con fines de rediseño de los componentes de un secador asistido por bomba de calor (HPD)
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, junio 2018
Participantes:	Juan David Benavides Rodríguez, Juan Carlos Gómez Daza
Sitio de información:	Biblioteca Central Mario Carvajal, Centro de Documentación EIME.
Formas organizativas:	BioNovo.

Tipo de producto:	Trabajo de Grado Pregrado Ingeniería Química
Nombre General:	Efecto de la variación de la humedad relativa del aire de secado y su incidencia en la conservación de nutrientes de tomate en un secador asistido por bomba de calor
Nombre Particular:	
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, marzo de 2019
Participantes:	José Alberto Campo Núñez, Juan Carlos Gómez Daza
Sitio de información:	Biblioteca Central Mario Carvajal, Centro de Documentación EIQ.
Formas organizativas:	BioNovo



Tipo de producto:	Propuesta a Convocatoria Externa
Nombre General:	Modelamiento, simulación y análisis termodinámico de equipos de procesos de secado aplicados en la industria cafetera
Nombre Particular:	Convocatoria para proyectos de Ciencia, Tecnología e Innovación y su contribución a los retos del país - 2018
Ciudad y fechas:	Santiago de Cali, junio 2018
Participantes:	Nicolás Ríos Ratkovich, Juan Carlos Gómez Daza
Sitio de información:	SICOP
Formas organizativas:	BioNovo, UV, GDPP, UAndes

La presente versión del informe contiene las observaciones de los evaluadores:

Firma del investigador principal

VoBo. Vicedecano de Investigaciones