

INGENIERÍA CONCURRENTE APLICADA AL DISEÑO DE UN SECADOR DE BANDEJAS

CONCURRENT ENGINEERING APPLIED TO THE DESIGN OF A TRAY DRYER

Wilmer Cruz Guayacundo

Universitaria Agustiniiana – Uniagustiniana, Colombia
wilmer.cruz@uniagustiniana.edu.co

Hugo Fabian Lobaton Garcia

Universitaria Agustiniiana – Uniagustiniana, Colombia
hugo.lobaton@uniagustiniana.edu.co

Recepción: 3/noviembre/2021

Aceptación: 8/marzo/2022

Resumen

Los equipos de secado normalmente son diseñados con correlaciones empíricas que no dan cuenta de todos los fenómenos de transporte asociados con el secado, por lo cual el objetivo de este trabajo es aplicar la ingeniería concurrente para diseñar un secador. El proceso de diseño empieza con la definición del producto mediante la función de calidad QFD, luego se generan diferentes bocetos siguiendo la metodología de desarrollo de concepto y usando matrices de decisión se realiza la selección del concepto solución, finalmente, en el diseño de detalle se obtienen los dibujos de distribución general e individual, así como las memorias de cálculo. Empleando las herramientas de diseño para la fabricación y el montaje DFMA, para la calidad DFQ y para el entorno DFE se evalúa el desempeño del secador. El producto obtenido se ubica en la categoría de los secadores tipo bandeja que utilizan aire caliente como medio de secado.

Palabras Clave: Diseño mecatrónico, Ingeniería concurrente, secador.

Abstract

Drying equipment is normally designed with empirical correlations that do not account for all the transport phenomena associated with drying, so the objective of this work is to apply concurrent engineering to design a dryer. The design process

begins with the definition of the product through the quality function QFD, then different sketches are generated following the concept development methodology and using decision matrices the selection of the solution concept is made, finally, in the detailed design, they have obtained drawings of general and individual distribution, as well as calculation memories. Using the design tools for manufacturing and assembly DFMA, for quality DFQ, and for the environment DFE the performance of the dryer is evaluated. The product obtained is located in the category of tray-type dryers that use hot air as the drying medium.

Keywords: *Mechatronic design, concurrent Engineering, dryer.*

1. Introducción

Colombia es un país agrícola, productor de gran variedad de frutas, hortalizas, plantas medicinales y recientemente productos nutraceuticos, destinados para consumo local o de exportación. Esta actividad está concentrada principalmente en zonas rurales, donde la infraestructura vial y energética no es la adecuada, conllevando a la reducción y deterioro acelerado de los atributos de calidad de los productos agrícolas. A estos factores se adiciona el hecho de difícil acceso económico a nuevas tecnologías de conservación, lo cual, limita las opciones para los campesinos y sus productos. Operaciones de secado, cadenas de frío, desinfección microbiana, entre otros procesos postcosecha son necesarios para aumentar la vida útil de los materiales biológicos una vez estos son cosechados [Kilcast, 2010].

Sin embargo, debido a diseños no óptimos de equipos agroindustriales, el gasto energético de estas operaciones es alto y la calidad del producto final se ve comprometida [Nwakuba, 2017].

Normalmente el diseño de equipos agroindustriales para alargar la vida útil de productos biológicos se realiza a partir de las correlaciones empíricas o simplemente de los conocimientos prácticos que, si bien son significativos, muchas veces omiten fenómenos que son importantes. Por ende, estos equipos son ineficientes tanto energéticamente, como en el rendimiento de la operación unitaria [Precoppe, 2015].

Con el surgimiento de nuevas tecnologías computacionales, ahora es posible el uso de diversas herramientas ingenieriles CAE para resolver problemas que involucran las ecuaciones de transporte de masa, energía y momento durante la etapa de diseño [Parpas, 2018]. Aunque las herramientas CAE han sido ampliamente usadas en la industria automotriz y aeroespacial, su uso se ha visto limitado en la industria agroindustrial.

El secado por convección en bandejas es el método más utilizado para frutas y verduras [Román, 2018], según [Nema, 2015], cerca del 85% de los secadores industriales son de tipo convectivo con aire caliente como medio de secado, en estos secadores el aire ingresa bajo la primera bandeja y atraviesa las demás; La configuración de estos secadores ocasiona problemas en la homogeneidad de la humedad final de los productos que se secan [Darabi, 2015].

En el secado convectivo, la tasa de deshidratación tiene una relación directa con la temperatura y la velocidad del aire que se utiliza en el proceso [Darabi, 2015], sin embargo, el flujo y la velocidad del aire son difíciles de medir durante el funcionamiento del equipo [Martínez, 2014]. Una alternativa para predecir variables de proceso de difícil medición es utilizar las herramientas CAE.

La disminución del porcentaje de humedad alarga la vida útil de los productos, reduciendo significativamente la acción de microorganismos y enzimas dentro de la matriz biológica [Sanghi, 2018]. Así mismo, se ven favorecidos los costos asociados a la cadena de suministro, como el transporte y almacenamiento, debido a que a menor humedad menor es el volumen de los productos.

El presente trabajo se concentra en el diseño óptimo de un secador empleando la ingeniería concurrente [Riba, 2002], para posteriormente extrapolar la metodología a otro tipo de equipos e instalaciones agroindustriales usadas en postcosecha.

2. Métodos

El diseño del secador se lleva a cabo considerando cuatro etapas. En primer lugar, se realizó la definición del producto a partir de la función de calidad QFD [Hauser, 1988], en segunda instancia se generan diferentes bocetos siguiendo la metodología de desarrollo de concepto [Ulrich, 2004], en tercer lugar, mediante el

uso de matrices de decisión se realiza la selección del concepto solución y la cuarta etapa corresponde al diseño de detalle.

Definición del producto

El desarrollo de la función de calidad QFD [Hauser, 1988], es el método empleado para determinar las especificaciones del secador o los aspectos principales del mismo, este método recoge la voz del cliente y la transforma en especificaciones técnicas. Para obtener información sobre sistemas de secado se consultaron dos grupos de interés, los clientes o potenciales usuarios y los fabricantes de equipos industriales. Los grupos de interés cuantificaron el nivel de importancia de 1 a 10 siendo 10 el requerimiento con mayor importancia y 1 el de menor importancia. Los requerimientos expresados por los clientes, el nivel de importancia y la categoría a la cual pertenecen, se presentan en la tabla 1.

Tabla 1 Requerimientos del cliente.

Número RC	Requerimientos del cliente RC	Nivel de importancia	Categoría
1	Capacidad del secador	8	Funcionalidad
2	Sistema de alimentación (variable)	9	Funcionalidad
3	Sistema de potencia (mecánico y eléctrico)	7	Funcionalidad
4	Sistema estructural	6	Seguridad
5	Cámara de secado (homogeneidad)	10	Funcionalidad
6	Medir las variables de operación	5	Funcionalidad
7	Costo del secador	7	Costos
8	Costo de operación	7	Costos
9	Materiales industriales	6	Manufactura
10	Mantenimiento mínimo	5	Manufactura

Las especificaciones técnicas presentadas en la tabla 2 se establecen como respuesta a los requerimientos del cliente y se les asigna un valor objetivo hacia el cual se encaminan los esfuerzos del equipo de diseño. La dificultad relativa se obtiene al comparar la dificultad de realizar una característica técnica respecto a otra (0 = fácil de lograr y 10 = extremadamente difícil de lograr) y promediar los valores obtenidos para cada comparación.

En la figura 1 se muestra la matriz asociada al QFD, donde se relacionan los requerimientos del cliente con las características técnicas que los satisfacen.

Tabla 2 Especificaciones técnicas.

Número RC	Especificaciones técnicas ET	Valor objetivo	Dificultad
1	Cámara de secado (Área de secado)	500 kg de matriz	10
2	Sistema flexible (disposición de la matriz)	3 posiciones	8
3	Potencia (mecánica y eléctrica)	Sistema regulable	5
4	Resistencia a la fluencia de los materiales	9,81 kN	5
5	Aislamiento térmico, recirculación de aire	Homogeneidad	10
6	Sistema de adquisición de datos	Registrar T y H	6
7	Prototipo a escala	COP \$ 10.000.000	10
8	Sistema de operación inteligente	Consumo de kW/h	7
9	Materiales acordes a la industria	Acero inoxidable	7
10	Tiempo de mantenimiento	1 h/mes	4

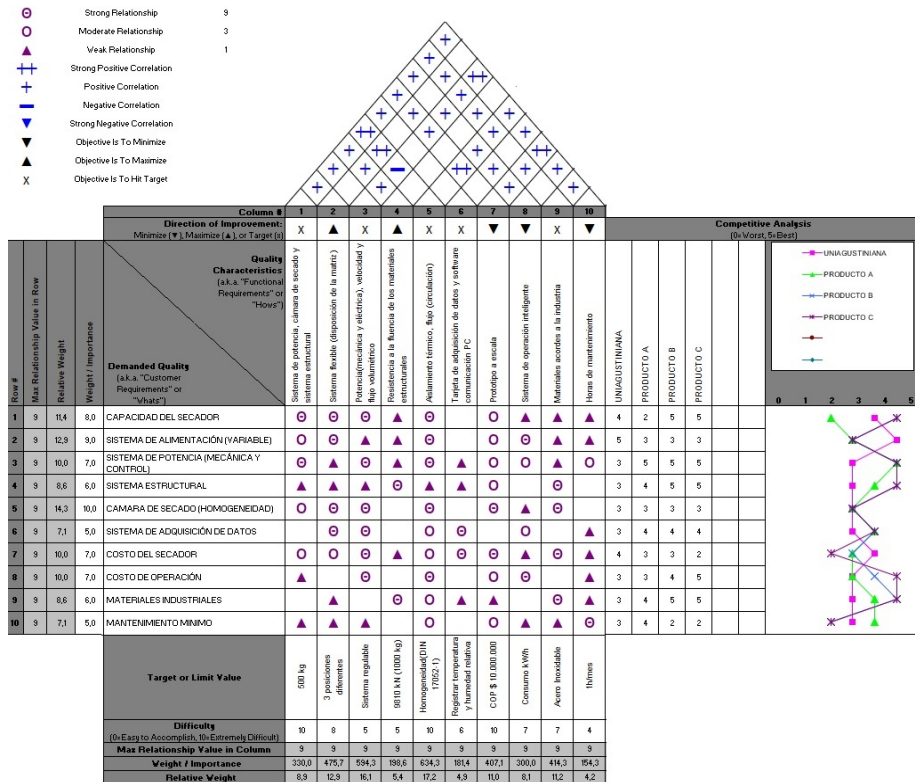


Figura 1 QFD para el secador.

El producto por desarrollar tiene dos ventajas frente a la posible competencia en los requerimientos "Sistema de alimentación variable y el costo del secador". Las características funcionales "Sistema de potencia, cámara de secado y sistema estructural, aislamiento térmico, flujo de aire (circulación) y prototipo a escala", presentan mayor dificultad para cumplirlas. Así mismo, las especificaciones técnicas

5, 3, 2, 9 y 7 representan el 68% de la contribución para satisfacer los requisitos del cliente y sobre esta información, se realiza el diseño conceptual del secador.

Diseño conceptual

El diseño conceptual realiza una descripción aproximada de la tecnología, los principios de trabajo y la forma del secador. Para generar los conceptos se aplicó la metodología presentada por [Ulrich, 2004], la cual se muestra en la figura 2.

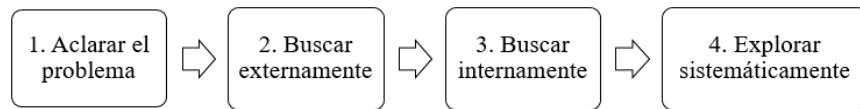


Figura 2 Método de generación de conceptos.

Para aclarar el problema es necesario dividirlo en subproblemas y para ello se utiliza la descomposición funcional, que consiste en representarlo como una caja negra que opera en flujos de material, energía y señales, figura 3.



Figura 3 Diagrama de caja negra.

La caja negra se divide en subproblemas para crear una descripción detallada de lo que debe realizar cada elemento para implementar la función general del secador, figura 4.

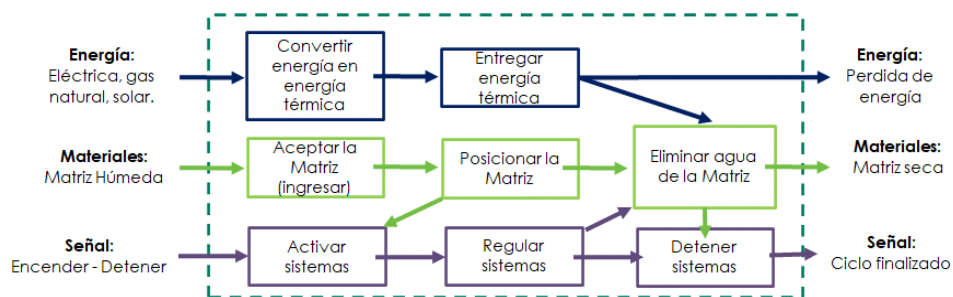


Figura 4 Diagrama funcional del secador.

La búsqueda externa se presenta en la tabla 3 y se concentra en identificar los conceptos empleados por productos existentes con funcionalidad similar al secador. Empleando la técnica creativa denominada lluvia de ideas y la experiencia de los integrantes del equipo de diseño, se realiza la búsqueda interna y se listan los conceptos de solución para los subproblemas críticos en la tabla 4.

Tabla 3 Comparación de conceptos solución.

Especificaciones técnicas ET (Valor objetivo)	Competidor A	Competidor B	Competidor C
Sistema flexible, disposición de la matriz (3 posiciones)	Estante fijo (1 posición)	Estante fijo (1 posición)	Bandeja sobre banda transportadora
Potencia mecánica y eléctrica (sistema regulable)	Sistema mecánico y eléctrico (sistema regulable)	Sistema mecánico y eléctrico (sistema regulable)	Sistema mecánico y eléctrico (sistema regulable)
Aislamiento térmico, flujo de aire (Homogeneidad)	Secado por aire con aislamiento	Secado por aire con aislamiento	Secado por microondas con aislamiento
Prototipo a escala (COP \$10.000.000)	60 x 50 x 80 cm (COP \$12.000.000)	143 x 135 x 210 cm (COP \$25.000.000)	1250 x 160 x 220 cm (COP \$100.000.000)
Materiales acordes a la industria (Acero inoxidable)	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304	Acero inoxidable 304

Tabla 4 Conceptos de solución a subproblemas críticos.

Subproblema 1: Convertir energía en energía térmica	Subproblema 2: Entregar energía térmica	Subproblema 3: Eliminar agua de la Matriz
Combustión de combustibles	Ondas electromagnéticas	Secado por aspersión
Colector solar	Contacto físico	Secado por bandeja
Efecto termoelectrónico	Trasladar moléculas – natural	Secado continuo (túnel)
Fricción – rozamiento	Trasladar moléculas - forzada	Secado rotatorio

La exploración sistemática se efectúa a través de la herramienta Árbol de conceptos. Las figuras 5 y 6 presentan los conceptos de solución organizados y sintetizados para los subproblemas críticos 1 y 2.

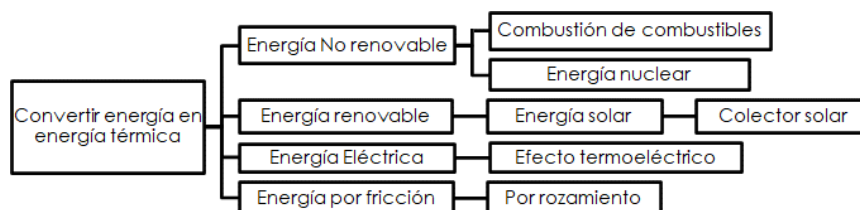


Figura 5 Árbol de clasificación para los conceptos del subproblema 1.

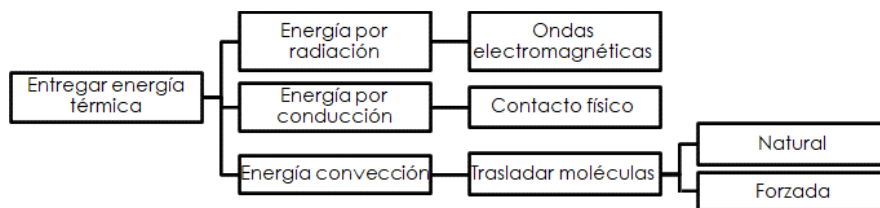


Figura 6 Árbol de clasificación para los conceptos del subproblema 2.

En la figura 7 se muestran las posibles soluciones para realizar el proceso de secado.

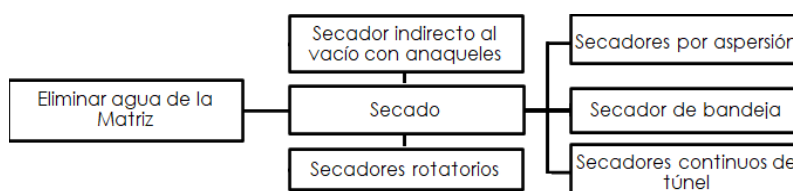


Figura 7 Árbol de clasificación para los conceptos del subproblema 3.

Las soluciones potenciales al problema general se forman al combinar las posibles soluciones encontradas en la búsqueda externa e interna, así como en la exploración sistemática para los tres subproblemas considerados. De las 64 posibles soluciones se consideran las tres más prometedoras.

En el concepto de solución A, figura 8, el aire frío ingresa por el costado izquierdo y atraviesa un sistema de resistencias que aumentara su temperatura, el aire ya caliente pasa por la cámara de secado que contiene las bandejas con matriz húmeda. El diseño contempla sensores que registran la temperatura, la humedad relativa y la masa en la cámara de secado.

Subproblema	Concepto de solución	
Convertir energía en energía térmica	Efecto termoeléctrico	
Entregar energía térmica	Trasladar moléculas - forzada	
Eliminar agua de la matriz	Secado por bandeja	

Figura 8 Combinación de conceptos y concepto solución A.

En el concepto de solución B, figura 9, las bandejas con matriz húmeda se desplazan mediante un movimiento rotatorio, durante la trayectoria la matriz se somete a un chorro de aire caliente emanado por ductos y el aumento de la temperatura del aire se logra en la parte externa del secador.

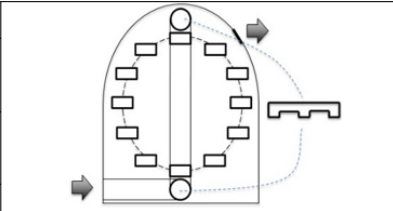
Subproblema	Concepto de solución	
Convertir energía en energía térmica	Efecto termoeléctrico	
Entregar energía térmica	Trasladar moléculas - forzada	
Eliminar agua de la matriz	Secado rotatorio	

Figura 9 Combinación de conceptos y concepto solución B.

En el concepto de solución C, figura 10, el secado de la matriz se realiza en una cabina, dentro de la cabina se hace fluir aire caliente en sentido perpendicular al movimiento de las bandejas. El sistema de secado cuenta con sensores para registrar la temperatura y la humedad relativa.

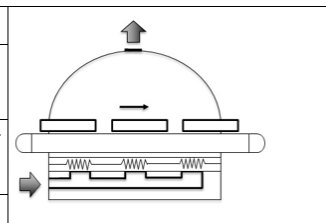
Subproblema	Concepto de solución	
Convertir energía en energía térmica	Efecto termoeléctrico	
Entregar energía térmica	Trasladar moléculas - forzada	
Eliminar agua de la matriz	Secado continuo (túnel)	

Figura 10 Combinación de conceptos y concepto solución C.

Selección del concepto

La selección del concepto de solución se realiza mediante matrices de decisión, la primera matriz, ver tabla 5, corresponde a los juicios de factibilidad.

Tabla 5 Matriz de juicio de factibilidad.

Juicios de factibilidad	Concepto A	Concepto B	Concepto C
¿Es posible que funcione el concepto?	SI	SI	SI
¿Es atractivo el concepto para el equipo de diseño?	SI	SI	SI
¿Alguna norma impide el uso del concepto?	NO	NO	NO

Dado que los tres conceptos de solución cumplen con los aspectos evaluados, pasan a una segunda matriz de revisión sobre la tecnología necesaria y los resultados se muestran en la tabla 6.

Tabla 6 Matriz de revisión sobre la tecnología necesaria.

Tecnología necesaria	Concepto A	Concepto B	Concepto C
¿Puede obtenerse la tecnología requerida con procesos conocidos y existentes?	SI	SI	SI
¿Se conocen los valores límites de los parámetros?	SI	SI	SI
¿Han sido identificados los modos de falla?	SI	SI	SI
¿Es controlable la tecnología durante el ciclo de vida?	SI	SI	SI
¿Están demostrados los ítems anteriores?	SI	SI	SI

En la tercera matriz, ver tabla 7, las funciones se evalúan de 0 a 10, siendo 0 el valor que refleja el no cumplimiento de la función y 10 el valor que refleja el cumplimiento pleno de la función.

Tabla 7 Matriz de revisión del cumplimiento de las funciones.

Funciones	Concepto A	Concepto B	Concepto C
Convertir energía eléctrica en térmica	10	6	10
Entregar energía térmica	9	3	9
Aceptar la matriz	10	9	10
Posicionar la matriz	8	10	7
Eliminar agua de la matriz	8	8	8
Activar sistemas	10	10	10
Regular sistemas	7	7	7
Detener sistemas	10	10	10
Puntuación Total	72	63	71

Finalmente, en la cuarta matriz, ver tabla 8, se evalúan los conceptos de solución respecto a los requerimientos del cliente.

Una vez se evalúa de 0 a 10 (0 = no cumple y 10 = cumple) el cumplimiento de los requerimientos para cada concepto, se calcula el puntaje total para cada concepto, sumando las evaluaciones ponderadas, acorde a la ecuación 1.

$$T_j = \sum_{i=1}^n C_{ij}N_i \quad (1)$$

Tabla 8 Matriz de revisión del cumplimiento de los requisitos del cliente.

Requerimientos del cliente RC	NI	C		
	Nivel de importancia	Concepto A	Concepto B	Concepto C
Capacidad del secador	8	7	8	7
Sistema de alimentación (variable)	9	7	6	5
Sistema de potencia (mecánico y eléctrico)	7	10	9	10
Sistema estructural	6	9	9	9
Cámara de secado (homogeneidad)	10	9	8	7
Medir las variables de operación	5	8	8	8
Costo del secador	7	9	7	9
Costo de operación	7	8	6	8
Materiales industriales	6	9	9	9
Mantenimiento mínimo	5	9	8	9
Puntuación Total Ponderado (T)		588	540	557

Donde

C_{ij} : evaluación de fila del concepto j para el i -ésimo requerimiento.

N_i : ponderación del i -ésimo requerimiento.

n : número de requerimientos.

T_j : puntaje total para el concepto j .

La calificación más alta la obtiene el concepto de solución A, siendo el seleccionado para desarrollar a nivel de detalle.

Diseño de detalle

El método para la generación detallada del secador [Arzola, 2011], se describe a continuación:

Encontrar componentes normalizados, los fabricantes de este tipo de componentes cuentan con la experiencia y las máquinas herramientas adecuadas para lograr un componente con las especificaciones necesarias para emplearse en el secador, este es el caso de la turbina y sus accesorios, los elementos de unión, la perfilería, las láminas para forrar el secador, el aislante térmico y por supuesto los sensores y la tarjeta de adquisición de datos.

Seleccionar materiales y las técnicas de producción, basados en la disponibilidad, el costo de la materia prima, el volumen de producción y la experiencia, se

selecciona el material y el proceso de fabricación para cada uno de los componentes del diseño y se presentan en la tabla 9.

Definir las restricciones espaciales, el secador tiene 1 m de ancho, 1.5 m de alto y 0.65 m de profundidad y es necesario disponer de 1.3 m² libres, además se debe ubicar en un lugar cubierto (bajo techo) con un ambiente libre de polvo excesivo y cerca de una fuente de 220 V.

Tabla 9 Materiales y técnicas de producción.

Componente	Material	Técnica de producción
Sistema estructural	Tubo de 38.1 mm x 2 mm en Acero HR (Estructura)	Corte, unión por soldadura y pintura
	Tubo de 25.4 mm x 2 mm en Acero HR con vidrio templado de 2 mm (Puerta).	Corte, unión por soldadura, pintura y pegado de vidrios
Cámara de secado	Lámina de acero inoxidable 304 cal 22 (Forrado)	Corte, doblado, unión por remaches
	Fibra de vidrio (Aislante)	Corte y unión con adhesivo
Sistema de alimentación	Ángulo de 25.4 mm x 3.175 mm en acero inoxidable 304. (Portabandejas)	Corte y unión por soldadura
	Malla con perforaciones en acero inoxidable 304 cal 16 (Bandejas)	Corte, doblado y unión por soldadura

Identificar los componentes independientes, en la figura 11 se presenta la arquitectura del secador que contempla un sistema estructural (a), una cámara de secado (b), un sistema de adquisición de datos y control (c), un sistema de potencia mecánica y eléctrica (d), un sistema de alimentación (e) y la interfaz con el usuario (f), sin embargo, el sistema de potencia concentra la mayor atención, teniendo en cuenta que es allí donde se produce el aumento de velocidad y temperatura del aire.

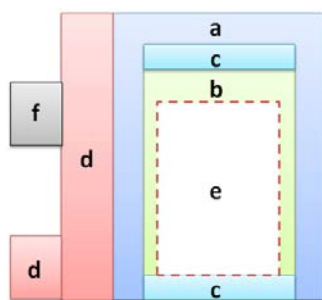


Figura 11 Arquitectura del secador.

Crear y definir las interfaces donde se desarrollan las funciones y conectarlas con los factores críticos de diseño, en la tabla 10 se describe la forma como se va a satisfacer cada una de las funciones del secador, además de identificar el parámetro crítico de diseño.

Tabla 10 Interfaz funcional y factor crítico de diseño.

Función	Concepto	Interfaz	Factor de diseño
Convertir energía eléctrica en térmica	Sistema de potencia (mecánica y eléctrica)	Resistencias eléctricas	Potencia eléctrica necesaria
Entregar energía térmica	Cámara de secado	Convección forzada de aire caliente	Flujo de aire necesario y cte.
Aceptar la matriz	Sistema de alimentación	Puerta del secador	Área necesaria para permitir el paso libre del estante
Posicionar la matriz	Sistema de alimentación	Estante con bandejas	Capacidad y disposición de las bandejas
Eliminar agua de la matriz	Cámara de secado	Secado por bandejas	Hermeticidad y permitir el flujo libre del aire
Activar sistemas	Sistema de adquisición de datos y control	Accionamiento de un pulsador	Normatividad asociada
Regular sistemas	Sistema de adquisición de datos y control	Regulador de potencia eléctrica y mecánica	Margen de maniobra (+/-)
Detener sistemas	Sistema de adquisición de datos y control	Accionamiento de un pulsador	Normatividad asociada

3. Resultados

La funcionalidad, las características, el tamaño, los acabados superficiales y las dimensiones del concepto solución, se documentan a través de un modelo desarrollado en un software CAD 3D y se muestra en la figura 12.

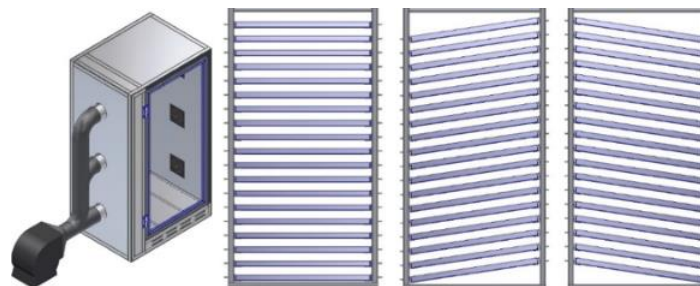


Figura 12 Modelo del secador.

La estructura del secador está formada por tubería cuadrada en acero estructural con 345 MPa de límite de fluencia, el forrado se realiza con acero inoxidable y se utiliza la fibra de vidrio como aislante. La puerta cuenta con vidrios templados y un sistema de cierre hermético. El flujo de aire está a cargo de una turbina centrífuga con potencia de 0.07 kW a 984 rpm, alcanzando un flujo volumétrico de 1230 m³/h en vacío. Las resistencias tienen una capacidad de 20 kW y permite elevar la temperatura del aire hasta 343 K. El sistema de alimentación puede configurarse para ubicar las bandejas en 3 posiciones diferentes. El portabandejas permite ubicar 19 bandejas de forma simultánea, cada bandeja con dimensiones de 0.55 m x 0.55 m tiene la capacidad de soportar hasta 20 kg de matriz con un factor de seguridad de 9 y una deformación elástica de 0.00099 m, figura 13.

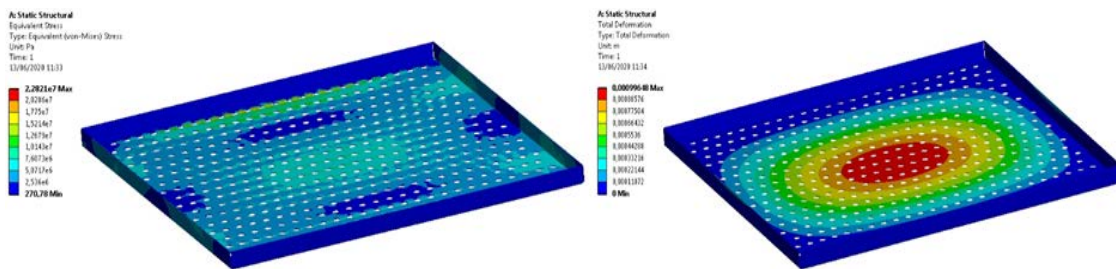


Figura 13 Bandejas del sistema de alimentación.

El sistema de adquisición de datos consta de sensores de temperatura y humedad, celdas de carga y un microcontrolador, figura 14. El sistema de control regula la velocidad de la turbina y la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado, el consumo eléctrico se estima en 25 kW/h.

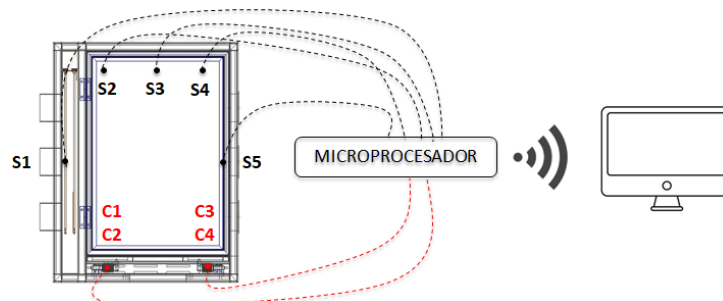


Figura 14 Diagrama esquemático de la disposición de los sistemas de medición.

4. Discusión

En la tabla 11 se presenta la evaluación de desempeño del diseño.

Tabla 11 Evaluación de desempeño del diseño de solución.

Especificaciones técnicas ET	Valor objetivo	Respuesta lograda por el diseño	% de diferencia	Obs.
Cámara de secado	500 kg de matriz	380 kg	-24%	A
Sistema flexible (disposición de la matriz)	3 posiciones	3 posiciones de alimentación	0%	
Potencia (mecánica y eléctrica)	Sistema regulable	Sistema regulable	0%	
Resistencia de los materiales	9.81 kN	95.91 kN (Resistencia a la fluencia del acero)	878%	B
Aislamiento térmico, flujo de aire (circulación)	Homogeneidad	Aislamiento térmico y circulación de aire	0%	
Sistema de adquisición de datos	Registrar Tempe. y humedad relativa	Diseño con sensores de T, H y Peso.	0%	
Prototipo a escala	COP \$ 10.000.000	COP \$ 16,392.000	64%	C
Sistema de operación	Consumo de kW/h	Consumo de 25 kW/h	No aplica	D
Materiales	Acero inoxidable	Acero inox. y estruc.	0%	
Tiempo de mantenimiento	1 h/mes	1 h/mes	0%	E

Observaciones:

- El área de la cámara de secado es similar a la de los equipos ofertados comercialmente, sin embargo, la separación entre bandejas es un factor relevante dentro de la homogeneidad en el secado y limitante en la capacidad del secador.
- Al ser un parámetro crítico en cualquier diseño mecánico, es indispensable que los materiales empleados para construir la estructura del secador cuenten con un límite de fluencia mucho mayor al valor objetivo.
- El costo final del diseño sobrepasa considerablemente al estimado en la etapa inicial, principalmente por la técnica de fabricación y por los altos precios de la materia prima.
- El consumo eléctrico es similar al de un sistema de calefacción, pero muy inferior al de un horno de panadería, lo cual lo mantiene dentro del rango de electrodomésticos de uso cotidiano.
- El secador cuenta con un sistema de mantenimiento preventivo que se fundamenta en revisiones al sistema de potencia, de control y de adquisición

de datos, con una periodicidad de un mes y un tiempo por rutina inferior a una hora.

Evaluación del secador en cuanto a la fabricación (DFM) y ensamble (DFA)

A partir de los materiales y las técnicas de producción anteriormente descritas, se estima el costo de fabricación en COP \$16,391,561. La evaluación de los aspectos que influyen en los costos de ensamble contempla encontrar el número mínimo teórico de componentes, calcular el potencial de mejoramiento, ver ecuación 2 y establecer la calidad del diseño con respecto a la ensamblabilidad.

Potencial de mejoramiento

$$= \frac{\# \text{componentes actual} - \# \text{mínimo teórico componentes}}{\# \text{Componentes actual}} \times 100 \quad (2)$$

El diseño de solución inicialmente tenía 586 componentes, sin embargo, las uniones mecánicas se cambiaron por remaches y soldadura disminuyendo la cantidad de componentes hasta 151 unidades. Usando la ecuación 2 se obtuvo un potencial de mejoramiento de 74%, resultado aceptable para el diseño del prototipo que invita a seguir tomando acciones respecto a la ensamblabilidad.

Evaluación del secador en cuanto a la calidad (DFQ) y el entorno (DFE)

Analizando la función de cada componente se logró determinar los posibles modos de fallo, las causas, los efectos y la criticidad, lo que permite anticiparse a dichos eventos e incorporar mejoras en el secador. Estas mejoras se presentan en la figura 15.

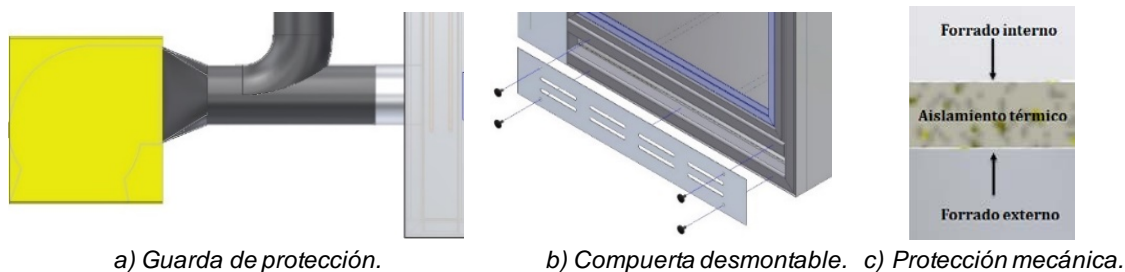


Figura 15 Incorporaciones en el secador.

A continuación, se describen las acciones tomadas durante el proceso de diseño para minimizar los posibles efectos del secador en el ambiente, priorizando el menor uso de los recursos materiales y de energía.

- Desarrollo de nuevos conceptos, el secador no solo permite eliminar el agua de la matriz si no también el de productos con características similares, convirtiéndolo en un producto de uso compartido.
- Selección de materiales de bajo impacto, los materiales empleados en el diseño son duraderos, requieren poco mantenimiento y pueden reutilizarse una vez finalice el ciclo de vida del secador.
- Reducción del uso de materiales, el secador contempla los elementos mínimos necesarios para su correcto funcionamiento.
- Optimización de las técnicas de producción, la fabricación del secador se proyecta con técnicas de producción que requieren de menor energía y generan pocos residuos respecto a los procesos de manufactura tradicionales.
- Reducción del impacto ambiental durante su uso, el secador cuenta con un sistema de control que aprovecha eficientemente el recurso energético y no se requieren materiales consumibles durante su operación.
- Optimización del fin de vida del sistema, cada uno de los componentes del secador puede ser reutilizado en diferentes máquinas industriales previo reacondicionamiento o simplemente puede ser fundido para la fabricación de nuevos elementos.

5. Conclusiones

Luego de aplicar la metodología de diseño, se puede evidenciar la facilidad con la cual se obtiene el modelo conceptual, ya que esta técnica explora sistemáticamente las posibles soluciones para cada una de las funciones del producto y las transforma en los componentes básicos, que a su vez satisfacen los requerimientos del usuario final.

Empleando las herramientas para el diseño concurrente que se fundamentan en nuevos métodos (diseño para fabricación y el montaje DFMA, para la calidad DFQ

y para el entorno DFE), nuevas herramientas TIC (herramientas asistidas por ordenador, diseño CAD, ingeniería CAE, fabricación CAM e Internet) y nuevas formas organizativas (equipos pluridisciplinarios) se puede lograr la integración de los requerimientos con las especificaciones técnicas para generar productos integrales y amigables con el medio ambiente.

El diseño resultante satisface en mayor proporción los requerimientos establecidos por el usuario final, sin embargo, el costo de fabricación del secador es elevado en relación con el presupuesto inicial y por lo tanto se deberá contemplar un rediseño que involucre principalmente los materiales debido a su impacto en el costo final.

El sistema de alimentación flexible o multiposicional de las bandejas es sencillo y práctico, lo cual permitirá innovar en los equipos de secado. La condición de velocidad de 1230 m³/h permite un modelo de contacto aire-superficie-matriz en flujo horizontal o transversal, haciendo que la operación no sea agresiva y minimizando los cambios desfavorables que una operación de secado puede ocasionar.

6. Bibliografía y Referencias

- [1] Arzola de la Peña N., (2011). Metodología de diseño para ingeniería. Universidad Nacional de Colombia. 1:470.
- [2] Darabi, H., Zomorodian, A., Akbari, M. H., & Lorestani, A. N., (2015). Design a cabinet dryer with two geometric configurations using CFD. *Journal of Food Science and Technology*. Doi:10.1007/s13197-013-0983-1.
- [3] Hauser J., et al., (1988). The House of Quality. *Harvard Business Review*, 66:63-73.
- [4] Kilcast, D., & Subramaniam, P., (2010). The stability and shelf-life of food. *The stability and shelf-life of food*. Woodhead Publishing Limited. doi:10.1533/9781855736580.
- [5] Martínez Z. N., & Menacho P. Z., (2014). Food loss in a hungry world, A problem? *Agronomía Colombiana*, 32, 283–293.
- [6] Román, F., Mbuge, D. O., & Hensel, O., (2018). Modeling the effect of a superabsorbent polymer material as desiccant in maize drying using CFD. *Drying Technology*, 1–13. doi:10.1080/07373937.2018.1504063.

- [7] Nema, P., Kaur, B., & Mujumdar, A., (2015). Drying Technologies for Foods: Fundamentals and Applications. Doi:10.13140/RG.2.1.1839.5687.
- [8] Nwakuba, N., Asoegwu, S., & Nwaigwe, K., (2017). Energy consumption of agricultural dryers: An overview, 18.
- [9] Parpas, D., Amaris, C., & Tassou, S. A., (2018). Investigation into air distribution systems and thermal environment control in chilled food processing facilities. *International Journal of Refrigeration*, 87, 47–64. Doi:10.1016/J.IJREFRIG.2017.10.019.
- [10] Precoppe, M., Janjai, S., Mahayothee, B., & Müller, J., (2015). Batch uniformity and energy efficiency improvements on a cabinet dryer suitable for smallholder farmers. *Journal of Food Science and Technology*, 52(8), 4819–4829. doi:10.1007/s13197-014-1544-y.
- [11] Riba C., (2002). *Diseño Concurrente*. Edicions UPC, 1:140-198.
- [12] Sanghi, A., Ambrose, R. P. K., & Maier, D., (2018). CFD simulation of corn drying in a natural convection solar dryer. *Drying Technology*, 36(7), 859–870. doi:10.1080/07373937.2017.1359622.
- [13] Ulrich K. et al, (2004). *Diseño y Desarrollo de Productos. Enfoque Multidisciplinario*. McGraw Hill, 5:119-143, 2004.