

Diseño, construcción y evaluación de un secador solar de cámara para textiles

Design, construction and evaluation of a solar-dryer chamber for textiles

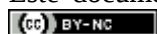
Angel Dandy Cajahuanca Paita^{1,*}, Alejandro Benjamín García Ortiz¹, Enzo Martin Casimiro Soriano²

¹Facultad de Ingeniería Mecánica. Universidad Nacional del Centro del Perú. Av. Mariscal Castilla 3909. Provincia de Huancayo. Región Junín. Perú.

²Instituto General de Investigación. Universidad Nacional del Centro del Perú, Perú.

*Autor de correspondencia: dac1841adcp@gmail.com

Este documento posee una [licencia Creative Commons Reconocimiento/No Comercial 4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)



Recibido: 1 junio 2020 **Aceptado:** 8 julio 2020 **Publicado:** 13 julio 2020

Resumen

Se diseñó y construyó un secador solar de cámara para textiles con colectores solares de aluminio, aletas posteriores y revestimiento exterior metálico de color negro y una cámara de calentamiento. En el desarrollo del producto se empleó la metodología VDI 2222 y su variante 2221. Para la demostración de las propiedades del diseño se realizó una investigación sistémica de tipo tecnológico, nivel experimental, realizando la prueba de hipótesis con un diseño experimental unifactorial, comparándose con el método de secado por exposición al aire libre y un secador eléctrico con inducción de calor. Los resultados mostraron que el secador solar diseñado redujo el tiempo de secado en comparación con la exposición al aire libre de 3,75 horas a 3,00. Por otra parte, la potencia consumida equivalente para un secado de 5 Kg de ropa fue en promedio de 2,46 kW, menor que el secado por inducción de calor con una potencia de 5 kW. El costo mensual aproximado por gasto de energía se redujo de 6,00 USD a 0,29 USD. El espacio de trabajo del secador solar fue de 0,54 m³, menor al empleado por el secado al aire libre con promedio de 3,00 m³.

Palabras clave: secado, energía solar, energía térmica, temperatura, transferencia de calor

Abstract

A solar chamber dryer for textiles was designed and built with aluminum solar collectors, rear fins, black metallic outer lining, and a heating chamber. In the development of the product, the VDI 2222 methodology and its variant 2221 was used. For the demonstration of the design properties, systemic investigation of a technological type, experimental level, was carried out, testing the hypotheses with a unifactorial experimental design and comparing it with the drying method by exposure to the open air and an electric dryer with heat induction. Results show that the designed solar dryer reduced drying time compared to outdoor exposure from 3.75 hours to 3. On the other hand, the equivalent consumed power for a drying of 5 Kg of textiles was on average 2.46 kW, less than the drying by heat induction with a power of 5 kW. The approximate monthly cost of energy expenditure was reduced from six USD to 0.29 USD. The working space of the solar dryer was 0.50 m³, less than that used for outdoor drying with an average of 3 m³.

Keywords: drying, solar energy, thermal energy, temperature, heat transfer

1. Introducción

El proceso de secado de ropa es una actividad importante en higiene del ser humano, especialmente relacionado con el cuidado de la salud y estética. En la actualidad, los métodos de secado de ropa más utilizados son: (1) al aire libre con tiempos prolongados de exposición a la radiación solar, fenómenos atmosféricos, aves e insectos, así como el uso de espacio considerable; (2) secado por calentamiento con un alto consumo de energía eléctrica y no recomendado para todo tipo de prendas [1,2]. Una secadora de ropa eléctrica típica consume aproximadamente 1 MWh por año, convirtiéndose en el segundo mayor consumidor de electricidad entre electrodomésticos en los Estados Unidos [2]. En este contexto, existe la necesidad de desarrollar tecnologías que permitan disminuir el tiempo, costo y espacio necesarios para el secado de prendas tras el lavado; además deben brindar seguridad, eficacia, ser eco-amigables en el consumo de energía eléctrica y preservación de recursos naturales. En ese sentido, se ha estado desarrollando una generación de electrodomésticos más eficientes y ecológicos [2]. Una tecnología que se ha venido utilizando desde hace algunos años es el secado solar en cámara, especialmente aplicado en la deshidratación de alimentos, pero potencialmente extensible al secado de ropa. Los modelos estándar de secadores solares implican una máquina que utiliza los principios de la termodinámica y la transferencia de calor, al captar energía solar a través de colectores de radiación de armazón metálico (generalmente aluminio o acero) y cediéndola a los objetos en su interior.

La estructura general de los secadores de cámara se constituye de: (1) un compartimento cerrado de secado con aletas posteriores, (2) un revestimiento exterior metálico (algunas veces pintados de color negro) y (3) un sistema de ventilación que permita el flujo de calor, así como la liberación del vapor de agua [3]. El sistema permite transferir, mediante convección, la energía calorífica al aire que se encuentra en el interior de la cámara de secado al elevar la temperatura [4,5]. Posteriormente, el agua contenida en los objetos de deshidratación se evapora y es conducida por los canales de ventilación. Los tiempos de secado varían, dependiendo de la cantidad de energía captada y transferida [6].

Algunos trabajos recientes en este campo demuestran que el secado solar es una alternativa energética y ambiental simultáneamente [7,8]. En la escala regional, Bergues [1] señala que existe una tendencia a construir secadores prismáticos en cámara cerrada, revestidos de planchas metálicas de color negro y planchas de material transparente, alcanzando una eficiencia en la acumulación-trasferencia de calor entre 30 a 50% solo con convección natural. Así mismo estos secadores presentan un volumen mínimo de 3 m³ siendo multifuncionales para el secado de variedad de productos y textiles [1].

Considerando los problemas expuestos y las soluciones presentadas por otros autores, el presente trabajo tiene como objetivo el diseño, construcción y evaluación de una cámara de secado solar para textiles que sea eficiente, rápida, poco voluminosa y amigable con el medioambiente.

2. Materiales y Métodos

Para la demostración de las propiedades del diseño en cuanto al tiempo, costo y espacio se realizó una investigación sistémica, siendo la investigación de tipo tecnológico, de nivel experimental, realizando un diseño experimental unifactorial.

2.1. Proceso de diseño del prototipo

Para el desarrollo del prototipo se utilizó como referencia la metodología de diseño VDI 2221 de acuerdo a la ingeniería de diseño con enfoque sistémico que presenta G. Pahl and W. Beitz [9,10].

Esta metodología se basa en siete etapas y, por cada una de ellas, se tiene un resultado particular. Las etapas son: Definición de la tarea, Definición de funciones y estructura, Búsqueda de soluciones, Estructura del modelo, Arreglos, Diseño definitivo y Realización.

2.1.1. Fundamentos en el diseño del secador

Para la obtención de energía calorífica de la radiación solar se utilizaron colectores solares térmicos, los cuales son elementos con buenas propiedades de conductividad y concentración de calor [3]. La cantidad de calor que absorbe la superficie se determina partir de la radiación [11,12] que incide sobre la superficie y el índice de absorptividad (α) del colector [4]. El criterio utilizado para determinar la variación de temperatura en el colector solar y el aire por transferencia de calor, considera un sistema cerrado estacionario donde ocurre trabajo a través de su frontera [4]. Para determinar el intercambio de calor por convección entre la superficie no extendida del colector solar con aletas, las planchas de acero inoxidable del revestimiento y el aire en movimiento (fluido) mediante un sistema de ventilación natural, se tiene la razón de transferencia de calor expresada por la ley de Newton del enfriamiento mostrada en la Ecuación 1.

$$\dot{Q}_{conveccion} = hA_s(T_s - T_{\infty}) \quad (1)$$

Siendo: Coeficiente de transferencia de calor por convección del fluido h , área superficial donde tiene lugar la transferencia calor A_s , temperatura de la superficie T_s y temperatura del fluido T_{∞} .

Se calculó la transferencia de calor en las superficies extendidas o aletas posteriores del colector solar utilizando el criterio de pérdida de calor despreciable en la punta de la aleta. Esto se realizó considerando como aislado el extremo final de la aleta (aleta de punta adiabática) [4], para lo cual se utilizaron las Ecuaciones 2, 3 y 4.

$$\dot{Q}_{P. aislada} = \sqrt{P \times h \times K \times A_c} \times (t_o - t_e) \times \tanh(mL_c) \quad (2)$$

$$m = \sqrt{\frac{P \times h}{K \times A}} \quad (3)$$

$$L_c = L + \frac{A_c}{P} \quad (4)$$

Dónde: perímetro la sección de la aleta P , coeficiente de convección del fluido circundante h , coeficiente de conductividad térmica del material de la aleta K , área corregida de la sección de la aleta A_c , variación de la temperatura ($t_o - t_e$), módulo de sección m , longitud corregida de la aleta L_c , área inicial de la aleta A y longitud inicial de la aleta L .

2.1.2. Estructura del secador solar

El secador solar se construyó según las características técnicas especificadas en la Tabla 1. La estructura contempló 2 colectores de radiación solar fijados en el techo de la cámara mediante soldadura y 2 ventilas para el ingreso de aire, ubicadas en cada pared del secador. La base del secador fue elaborada con mallas que permitiesen el goteo de los textiles y el escape del vapor.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del secador solar

Especificaciones Técnicas		
Ítem	Característica	Especificación
1	Estructura de soporte Acero Inoxidable	AISI 304
2	Revestimiento con Acero Inoxidable	AISI 304
3	Colector solar de Aluminio	1060
4	Fuente de energía	Solar
5	Temperatura de trabajo	40°C
6	Potencia neta	307,5 W
7	Capacidad Volumétrica	0,3854 m ³
8	Peso total del secador	39,6 kg

Otras cualidades que se observaron fueron su resistencia por efecto del recubrimiento de acero, espacioso interiormente, compacto por fuera, alcanzando un volumen total de 0,504 m³ de acuerdo a las dimensiones representadas en la Figura 1. Asimismo, el sistema de colección solar, estuvo compuesto por un revestimiento externo con planchas de acero y unos colectores solares convexos con aletas posteriores, elaborados con aluminio y pintados de negro, como se puede observar en el plano de la Figura 1 (b), con sus dimensiones en milímetros. Todos los elementos fueron ensamblados sobre la estructura de soporte y protección como se muestra en el plano de montaje de la Figura 2.

2.2. Proceso de experimentación

El trabajo de investigación realizado fue de tipo tecnológico, nivel experimental y diseño experimental-cuasi experimental, debido a que no se tuvo control total de las variables intervinientes en la experimentación, como el nivel de radiación solar y el viento [10]. Por su parte, la unidad de observación, el secador solar para textiles, se compuso de tres sistemas principales: sistema colector solar, sistema de ventilación y la cámara de secado.

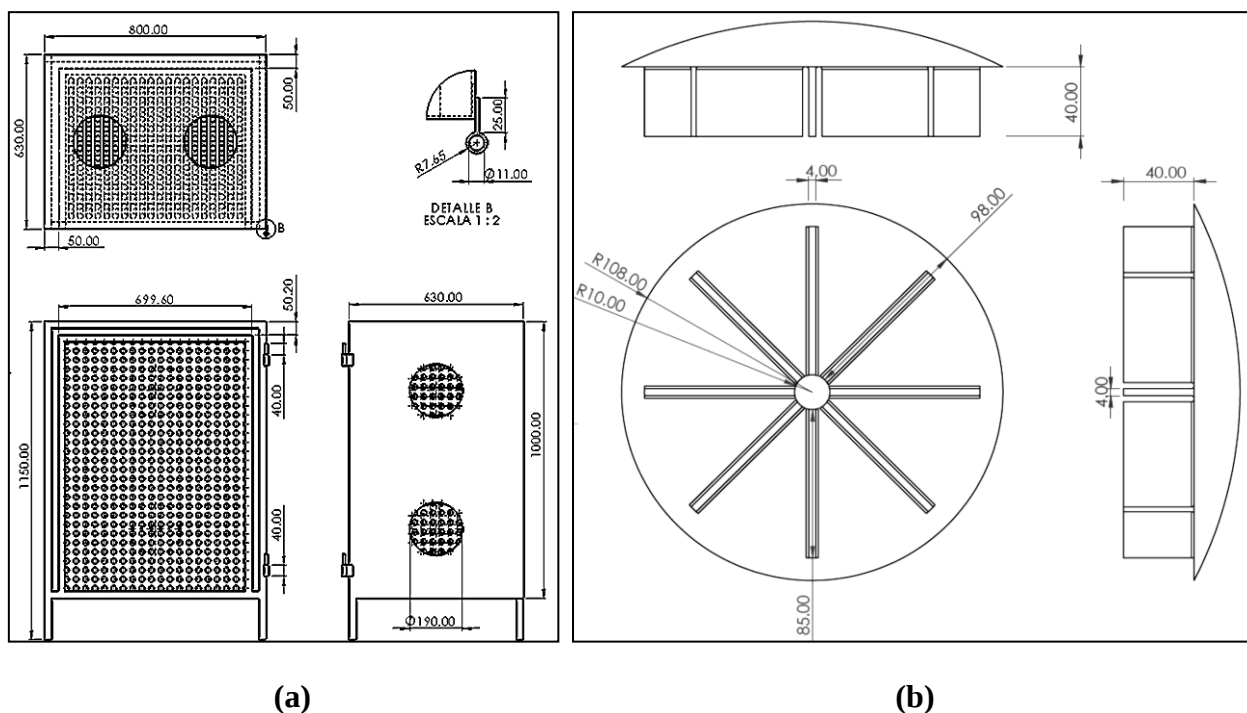


Fig.1 (a) Plano de la estructura del secador solar con medidas en milímetros y (b) colector solar convexo con medidas en milímetros

Para la prueba de hipótesis se utilizó el diseño de experimentos unifactorial para determinar las diferencias significativas mediante análisis de varianza entre los tiempos de secado de tres métodos distintos con seis pruebas cada uno [13,14], como se muestra en la Tabla 2. Cada elemento u_{ij} representa el resultado obtenido para cada ensayo de tiempo de secado y variación de masa húmeda de textil. Esto permitió realizar comparaciones y determinar la eficacia de esta alternativa tecnológica. El objetivo de las pruebas realizadas con el prototipo fue conocer el efecto del tiempo, costo y espacio de secado en relación con otros métodos. Los tres procesos comparados fueron: (1) el secado al aire libre, (2) secado eléctrico por inducción de calor y (3) el secador solar desarrollado.

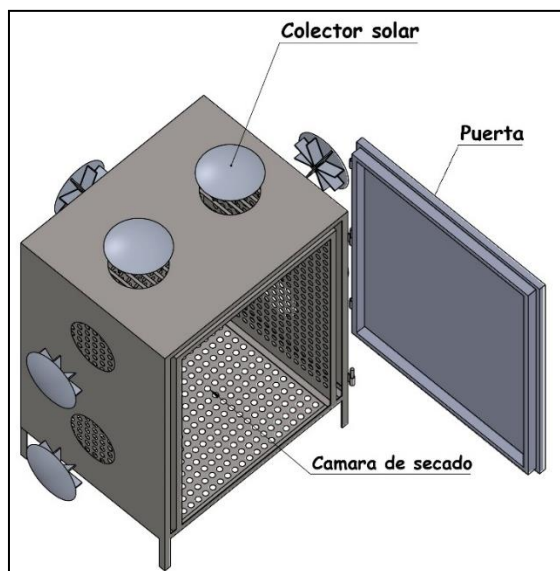


Fig.2 Plano de montaje, despiece del secador

Para el desarrollo de los experimentos se estandarizaron las condiciones de los textiles a tratar. Se trabajó con 5 kg en condición mojado (peso seco de 2,4 Kg) fabricados en base de algodón. Las pruebas de secado se efectuaron en las mismas condiciones ambientales, durante un tiempo soleado, cielo despejado y 20°C de temperatura ambiente inicial.

Tabla 2. Diseño de experimentos unifactorial para el tiempo de secado

Método	Variación de masa en el tiempo					
	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Prueba 4	Prueba 5	Prueba 6
Al aire libre	u_{11}	u_{12}	u_{13}	u_{14}	u_{15}	u_{16}
Eléctrico	u_{21}	u_{22}	u_{23}	u_{24}	u_{25}	u_{26}
Secador solar	u_{31}	u_{32}	u_{33}	u_{44}	u_{45}	u_{46}

Se colocaron los secadores y el tendedero sobre una balanza electrónica para medir la variación de masa cada 15 minutos. Complementariamente, se determinaron la humedad y la temperatura en el colector solar. El proceso finalizó cuando se alcanzó el peso seco de $2,4 \pm 0,1$ Kg.

Finalmente, se utilizó el análisis de medias, desviaciones estándar, coeficiente de variación y análisis de varianza (análisis ANOVA), procesados mediante el software SPSS. El análisis estadístico se enfocó en la determinación de la variación de masa de textil húmedo en función del tiempo de secado. Asimismo, se utilizó la estadística inferencial a través de la razón F de Fisher para realizar la prueba de hipótesis respecto al tiempo secado, con un nivel de significancia de 0,5%, intergrupar:

- Análisis de varianza del tiempo de secado entre los tres métodos de secado ($F_t = 7,7$)
- Análisis de varianza del tiempo, entre el secado al aire libre y el secador solar ($F_t = 12,82$)

Para el análisis del costo y espacio de secado, se establecieron relaciones y proporciones, ya que los valores se mantienen constantes durante las pruebas.

3. Resultados y Discusión

Como primer resultado, necesario para realizar la experimentación, se fabricó el prototipo de secador solar de acuerdo a los planos de construcción y montaje, como se muestra en la Fig.3. Con dicho prototipo se desarrollaron las pruebas de secado y comparación de desempeño.



Fig.3 Secador solar terminado

El prototipo obtenido es similar al reportado por Bergues [1]. Según los autores con este se debe alcanzar una eficiencia en la acumulación y transferencia de calor entre 30 y 50% solo con convección natural. Así mismo, estos secadores presentan un volumen mínimo de 3m^3 . Sin embargo, el secador producto de la investigación presentó la sexta parte del volumen de la referencia, pero teniendo también como principal fuente de calor la radiación solar, el cual se capta a través de colectores solares térmicos y un revestimiento de planchas de acero inoxidable pintadas de color negro y protegidas por cristales transparentes para evitar la pérdida de calor, logrando una eficiencia de todo el sistema del 42%, que coincide con el rango mencionado en la referencia, además de que la transferencia de calor en el interior de la cámara es solo por convección natural.

El primer objetivo de las pruebas fue conocer el efecto de los tres métodos respecto al tiempo de secado total en horas. El ensayo se repitió seis veces y los resultados se muestran en la Figura 4. En dicha figura se puede apreciar que el mayor tiempo de secado se realizó con el método de exposición al aire libre (3,68 horas en promedio), mientras que el menor tiempo fue para el secado eléctrico con inducción de calor (1,5 horas en todos los casos). El secador solar diseñado tomó un promedio de 3,05 horas. El análisis ANOVA para la prueba de hipótesis demostró que existen diferencias significativas en la reducción del tiempo de secado respecto al secado convencional al

aire libre, para un intervalo de confianza del 99,5%. En los ensayos no se observaron variaciones significativas entre el mismo grupo de textiles, lo que indica que el proceso de secado es homogéneo, respondiendo directamente a las condiciones atmosféricas.

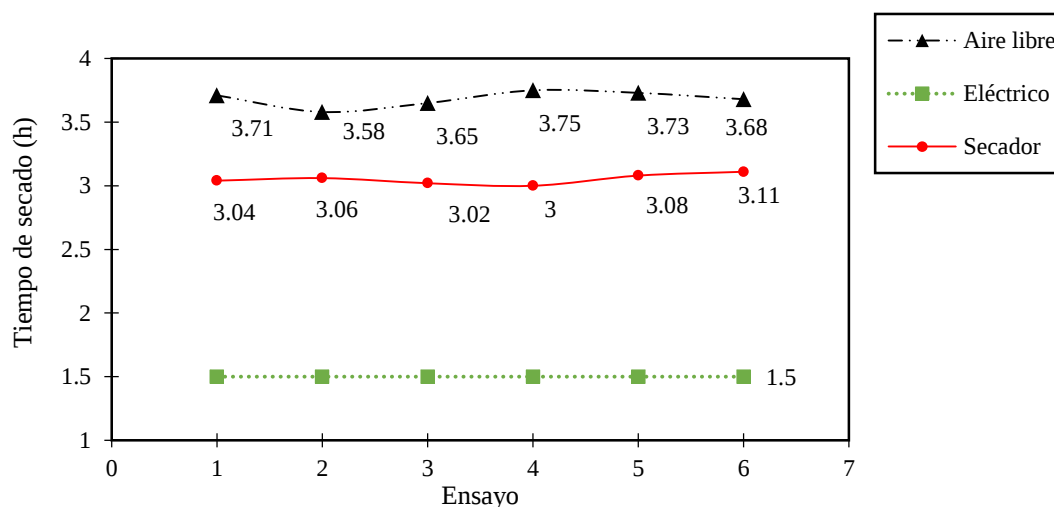


Fig.4 Tiempo de secado en horas mediante cada método

El análisis de variabilidad en los tiempos de secado se muestra en la Tabla 3, en la cual se observa que el mayor coeficiente de variación se obtuvo en el secado al aire libre. Esto se debe a la exposición al ambiente y las condiciones variables que mantiene, como corrientes de aire frío, nubes, transmisión de calor por área de prenda textil, entre otros. La reserva en exposición al ambiente y un sistema de ventilación controlado homogenizan los periodos de secado, como ocurre en los métodos de cámara y por inducción de calor.

Tabla 3. Resumen estadístico sobre el tiempo de secado entre procesos

Resumen estadístico sobre el tiempo de secado por procesos								
	Cant. pruebas	Media	Media del error estándar	Desviación estándar	Varianza	Coef. variación	Valor Mín.	Valor Máx.
Al aire libre	6	3,68	0,02	0,06	0,004	1,68	3,58	3,75
Eléctrico	6	1,5	0	0	0	0	1,5	1,5
Secado solar	6	3,05	0,02	0,04	0,002	1,32	3	3,11

En la Figura 5 se muestra la velocidad de secado promedio de los distintos procesos evaluados. El gráfico registra la variación de masa de textiles, tomada cada quince minutos, desde el inicio del proceso de secado con 5 Kg de masa húmeda hasta alcanzar el peso seco de 2,4 Kg. Las curvas muestran un descenso exponencial de la velocidad de secado como resultado del efecto del incremento de temperatura superficial e incremento de la cantidad de calor recibido por unidad de área en el tiempo.

El secado eléctrico terminó más rápido debido al flujo constante de calor y la agitación recibida. En el caso de los métodos de secado restantes, ambos tuvieron un comportamiento casi idéntico durante la primera hora de trabajo a causa de la considerable masa de agua inicial (2,6 Kg) que requirió de energía suficiente para su calentamiento y posterior evaporación. A partir de 1,5 horas se observó una diferencia significativa, como resultado de la convección sostenida en la cámara de secado hasta el final del experimento. La diferencia promedio entre ambos métodos fue de 45 minutos hasta alcanzar el peso final de 2,4 Kg. La reducción de agua en los textiles también se

analizó a partir de la variación del peso en el transcurso del tiempo de secado. Se determinó la masa de agua eliminada por evaporación en un determinado tiempo, calculada cada 15 minutos. Los resultados se muestran en la Figura 6.

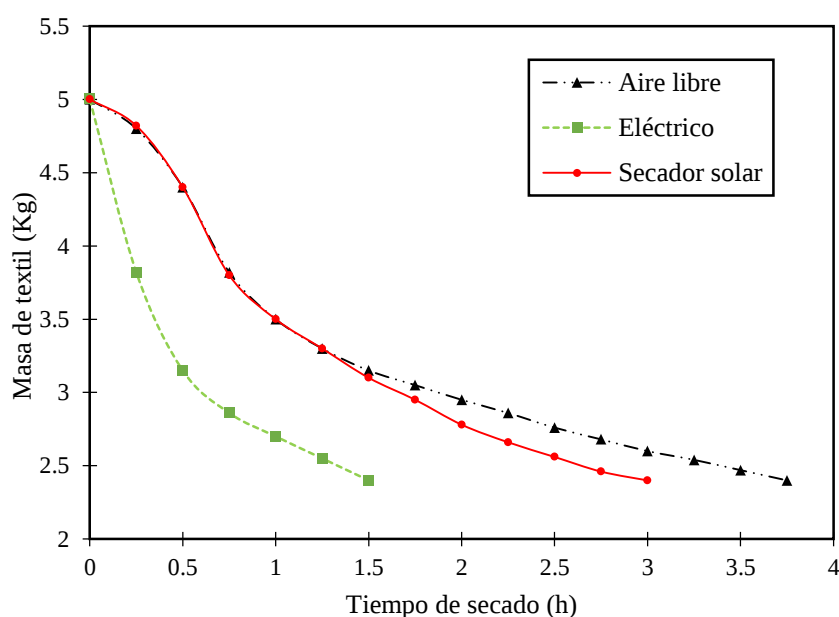


Fig.5 Comportamiento del tiempo de secado en cada proceso

De las gráficas obtenidas se puede observar que para los procesos de secado al aire libre y por secador solar, la mayor reducción de agua se dio en los primeros 45 minutos debido al goteo por gravedad con una velocidad aproximada de 0,64 Kg/h. Posteriormente, la disminución más lenta de la humedad en los textiles se debió a la evaporación y liberación de agua por convección, con una velocidad promedio de 0,14 Kg/h para el secado al aire libre y 0,19 Kg/h para el secador solar en cámara. Por otra parte, el método de secado eléctrico mostró la mayor pérdida de agua en los primeros 15 minutos debido al efecto combinado de centrifugado y concentración de calor en el tambor con el que cuentan los equipos de secado de este tipo, con un promedio de 4,6 Kg/h. Durante la última hora de trabajo, la velocidad de secado fue de aproximadamente 1 Kg/h.

Los resultados del secado eléctrico concuerdan con lo reportado en la literatura, con un tiempo de secado de 80 minutos para alcanzar humedades inferiores a 20 gramos por cada 100 gramos del textil seco. Estos resultados son similares a los obtenidos en la prueba de secado eléctrico realizado, el cual tomó 1,5 horas para el secado completo de una carga de 5 Kg de textiles bajo el mismo mecanismo [15,16].

Otro objetivo del trabajo fue conocer los costos correspondientes a cada método, empleando como base el consumo eléctrico de un secador por inducción de calor para una carga constante de textiles. Considerando que se empleó una secadora de 5000 W de potencia para un trabajo completo de 1,5 horas, fue necesario un gasto de 7500 W·h para evaporar todo el agua contenida en 5 Kg de prendas textiles. La potencia equivalente para los tres métodos empleados, considerando las seis repeticiones realizadas se muestra en la Tabla 4.

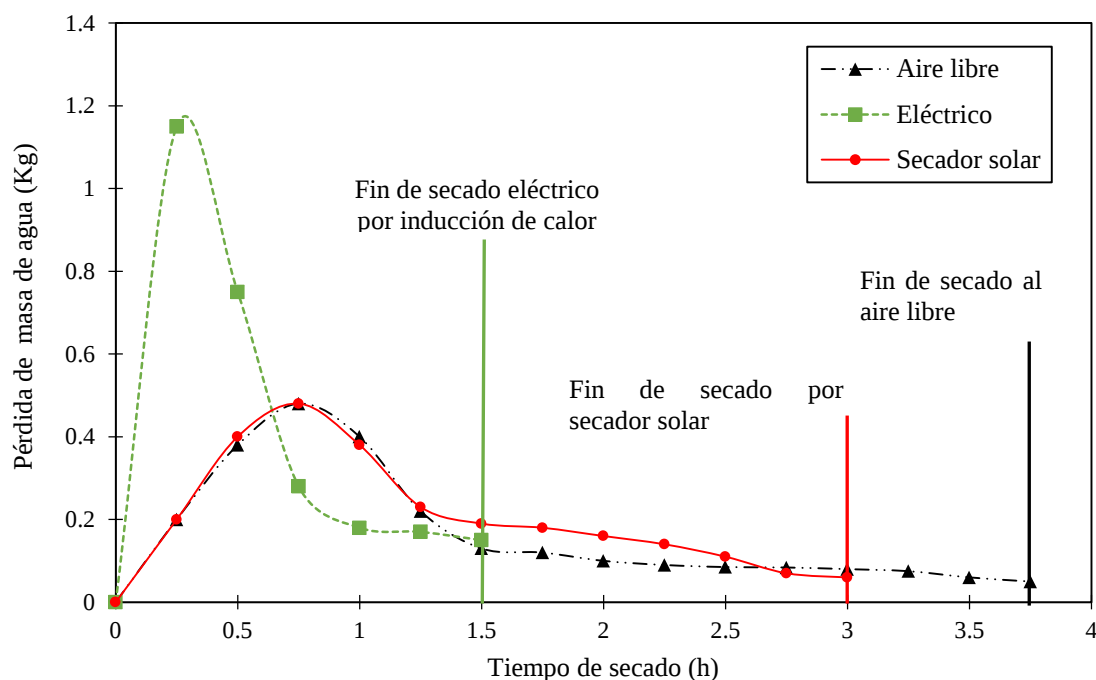


Fig.6 Cantidad de agua eliminada por secado empleando distintos procesos

Tabla 4. Potencia equivalente para el secado considerando los procesos estudiados

Proceso de secado	Potencia equivalente (kW)						Valor medio ± std.
	Réplicas						
	1	2	3	4	5	6	
Exposición al aire libre	2,02	2,09	2,05	2,00	2,01	2,04	2,04 ± 0,34
Eléctrico (referencia)	5,00	5,00	5,00	5,00	5,0	5,0	5,0 ± 0,00
Secador solar en cámara	2,47	2,45	2,48	2,50	2,43	2,41	2,46 ± 0,32

Los resultados muestran que la mayor potencia se obtuvo con el secado eléctrico, seguido por el secador solar y el menor conseguido con el secado al aire libre. El costo promedio de energía eléctrica en Perú, exclusivamente para el secador eléctrico de inducción, al momento de la experimentación, fue de 1 USD mensuales por cada 5000 W·h. En ese sentido, el gasto monetario para el método de secado eléctrico con inducción de calor es de $6,00 \pm 0,01$ USD proporcional al consumo de energía eléctrica. En el caso de los métodos de secado ecológico al aire libre y por secador solar, solamente se requiere una inversión aproximada de 0,29 USD para su diseño, construcción y mantenimiento.

Por otra parte, es necesario considerar que los costos de referencia y los equipos de secado pueden trabajar a distintas potencias y consumo eléctrico. En México, la Procuraduría Federal del Consumidor de la ciudad de México reportó que, en promedio, una secadora eléctrica de ropa consume 492,7 Wh por carga, siendo una cantidad relativamente baja para este tipo de máquinas. Sin embargo, dicha cantidad de energía está considerada para un secado lento, ya que la potencia es inversamente proporcional al tiempo de secado y directamente al gasto de energía [17].

Por último, se analizó el espacio requerido para cada tipo de secado. El secado al aire libre ocupó un espacio de $3,1 \text{ m}^3$ para un promedio de 3,7 horas de secado completo; la máquina de secado por

inducción de calor y el secador solar en cámara ocuparon un volumen constante de $0,54 \text{ m}^3$, estableciéndose una relación aproximada de 1 a 6 entre el espacio de secado que ocupan las alternativas tecnológicas y el secado al aire libre.

3.1. Análisis general del secado de textiles empleando los tres procesos

Los métodos de secado ecológicos estudiados (aire libre y secador en cámara) presentan la ventaja de emplear energía solar para su trabajo, siendo ésta una fuente renovable de energía. Sin embargo, requieren de óptimas condiciones atmosféricas para su correcto desarrollo (cielo despejado, sólo se puede usar durante el día y temperatura ambiente adecuada) por lo que su disposición no es permanente. A continuación se explica y detalla el análisis correspondiente a cada método:

- a) Método de secado por exposición al aire libre: se desarrolla en tendederos o líneas cable en las que se exponen las prendas a la radiación solar, como fuente de energía para la evaporación. La principal ventaja es el nulo costo de operación por secado, con un costo mensual por mantenimiento y limpieza aproximado de 0,29 USD. Sin embargo, presenta como desventajas el tiempo de secado más prolongado que el resto (promedio de 3,7 horas), requiriendo de un espacio más amplio para su realización y la exposición de los textiles al contacto con insectos, aves y fenómenos atmosféricos.
- b) Método de secado eléctrico por inducción de calor y centrifugación: generalmente viene incorporado en máquinas lavadoras. Tiene como principales ventajas el tiempo de secado más reducido (promedio de 1,5 horas), no requiere supervisión ni control ya que procede de forma automática. Además, requiere un espacio reducido de secado de $0,54 \text{ m}^3$. Protege a las prendas del contacto con las condiciones externas y debido a que emplea energía eléctrica, puede ejecutarse independientemente de las condiciones atmosféricas o la presencia de sol. Presenta como desventajas el más alto costo en consumo energético para el secado y no está indicado para todo tipo de prendas ya que produce deformación, alteración en tallas y acumulación de tensiones en los tejidos [18].
- c) Secador solar en cámara: es la alternativa tecnológica planteada para el secado de textiles. Fue diseñado y construido con colectores solares, los cuales transfirieron el calor hacia un compartimento de secado. Las principales ventajas son el costo nulo de operación, sin gasto de energía eléctrica y mantenimiento mensual por 0,29 USD. Adicionalmente, no requiere de supervisión constante ni manipulación complicada, conservando las prendas de vestir, su volumen de trabajo es reducido en $0,54 \text{ m}^3$ y protege el textil del contacto exterior.

El tiempo de trabajo podría ser reducido al implementarse un sistema de ventilación forzada con ventiladores para mejorar el proceso de convección y utilizando paneles fotovoltaicos para generar electricidad. Otras alternativas comprenden el uso de un banco de baterías para almacenar energía que pueda ser utilizado en un sistema de resistencias para producir calor [19]. Los resultados indican que el método de secado solar en cámara representa más ventajas en cuestión de espacio, velocidad de secado y protección de los textiles respecto al secado al aire libre [20]. Por otra parte, en términos de ahorro de energía y gasto, el secado en cámara es más eficiente que el secado en máquinas de funcionamiento eléctrico por inducción de calor. La inversión en tiempo es considerablemente ventajosa en relación al nulo consumo eléctrico, ahorro de espacio y exposición.

En la prueba de hipótesis respecto al tiempo de secado entre los distintos métodos, se determinó que existen diferencias significativas, pues se obtuvo $F_0 (4174,09) > F_t (7,7)$. Asimismo, entre los tiempos de trabajo de los métodos de secado al aire libre y el secador solar en cámara también existen diferencias significativas, obteniéndose $F_0 (439,8071) > F_t (12,82)$. El análisis realizado en función del tiempo de trabajo permite afirmar que el menor tiempo de secado corresponde al

método eléctrico con 1,5 horas promedio, presentando una diferencia significativa con respecto a los métodos de secado al aire libre y secador solar. La comparación entre los métodos de secado al aire libre y el secador solar también permite apreciar que existe una reducción significativa del tiempo de secado promedio en 45 minutos.

Considerándose las pruebas anteriores, el uso del secador en cámara y aire libre redujeron el costo mensual de forma significativa en relación al método eléctrico en una relación aproximada de 20:1 debido al uso de la energía solar como fuente de energía. Otra relación importante fue la reducción de espacio necesario de 6:1 entre el método de secado que ocupan las alternativas tecnológicas y el secado al aire libre.

4. Conclusiones

Se diseñó y fabricó un secador solar en cámara para textiles, utilizando la metodología con enfoque sistémico. Para el desarrollo del producto se empleó la metodología VDI 2222 y su variante 2221. El prototipo permitió realizar las pruebas de tiempo, trabajo, costo y espacio. Los resultados indican que el secador solar diseñado redujo el tiempo de secado en comparación al método de secado por exposición al aire libre de 3,75 a 3 horas y requirió de 1,5 h adicionales en relación al secado eléctrico. Por otra parte, la potencia promedio consumida equivalente para un secado de 5 Kg de ropa fue de 2,46 kW, menor que el secado por inducción de calor con una potencia de 5 kW. Sin embargo, el costo mensual aproximado por gasto de energía se redujo de 6,00 USD a 0,29 USD (costos por mantenimiento) debido al uso de la energía solar sin costo de operación. El espacio de trabajo del secador solar fue de 0,50 m³, menor al empleado por el secado al aire libre. Los resultados mostraron que el secador solar en cámara fue significativamente más rápido que el secado por exposición al aire libre y ocupa menos espacio, además de limitar la exposición a efectos externos y condiciones atmosféricas. Además, ocupa el mismo espacio que un secador eléctrico, aunque es significativamente más lento.

Referencias

1. Bergues, R., et al., *Algunos aspectos de los cambios tecnológicos en secadores solares cubanos: Realidades y Tendencias*. Tecnología Química, 2008. **28**(2): p. 35-45.
2. Yi, T., et al., *A new physics-based drying model of thin clothes in air-vented clothes dryers*. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2015. **21**(2): p. 872-878.
3. Jiménez R., et al., *Selección de un colector solar para aumentar la temperatura del agua de alimentación al generador de vapor de la Universidad de Cienfuegos*. Revista Universidad y Sociedad, 2015. **7**(2): p. 64-71.
4. Çerçi, K. N., et al., *Modeling of Heat Transfer Coefficient in Solar Greenhouse Type Drying Systems*. Sustainability, 2019. **11**(18): p. 1-16.
5. Oueslati, H., et al., *Thermal Modeling of Solar Dryer-Numerical Simulation, Analysis and Performance Evaluation*. International Journal of Air-Conditioning and Refrigeration, 2018. **26**(4): p. 1-12.
6. Cervantes, R. M., et al., *Análisis de modelos matemáticos para detectar humedad relativa en secadoras de ropa: ¿Usar ecuaciones favorece a una buena detección del secado de ropa?*. Pistas Educativas, 2017. **39**(126): p. 215-235.
7. Roche-Delgado, L., et al., *Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas*. Tecnología Química, 2017. **37**(2): p. 184-200.
8. Koulibaly, A., et al., *Modelación de un colector solar para calentamiento de aire*. Ingeniería Energética, 2015. **36**(3): p. 292-302.
9. Pahl G., et al., *Engineering Design A Systematic Approach, 3rd edition*. Springer-Verlag London, 2007. ISBN: 978-1-84628-318-5.

10. Vijayavenkataraman, S., et al., *A review of solar drying technologies*. Renewable and Sustainable Energy reviews, 2012. **16**(5): p. 2652-2670.
11. Camayo-Lapa., et al., *Estimación de la radiación solar global, mediante temperaturas extremas, aplicando el modelo Bristow-Campbell en la región Junín, Perú*. Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería, 2019. **27**(4): p. 643-651.
12. Chavan, A., et al., *Natural convection and direct type (NCDT) solar dryers: a review*. Drying Technology, 2020. **10**(1): p. 1-22.
13. Montgomery, D. C., *Design and analysis of experiments, 10th edition*. John Wiley & Sons, 2017. ISBN: 978-1-119-49244-3.
14. Plata, S., et al., *Statistical analysis of clothing drying in a venting type dryer*. Drying Technology, 2019. **37**(8): p. 1013-1027.
15. Franceschi, K., et al., *Modelado y Simulación del Secado de Textiles Delgados Mediante un Cilindro Calentado por Inducción Eléctrica*. Información Tecnológica, 2008. **19**(4): p. 35-46.
16. Franceschi, K., et al., *SIMPSET: Programa de simulación del proceso de secado de textiles delgados*. Revista Ingeniería UC, 2010. **17**(2): p. 52-59.
17. Wei, Y., et al., *Enhancing the energy efficiency of domestic dryer by drying process optimization*. Drying Technology, 2018. **36**(7): p. 790-803.
18. Yates, L., et al., *Dirtying Linen: Re-evaluating the sustainability of domestic laundry*. Environmental Policy and Governance, 2016. **26**(2): p. 101-115.
19. Alahmer, A., et al., *Design and construction of a passive solar power clothing dryer*. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 2014. **7**(13): p. 2785-2792.
20. Jain, N., et al., *Thermal performance analysis of solar clothes dryer*. Journal of Renewable and Sustainable Energy, 2013. **5**(4): 043113: p. 1-12.

Agradecimientos

Agradecimiento especial a la Universidad Nacional del Centro del Perú y al Instituto General de Investigación, quienes organizaron el concurso anual de tesis financiado con el Canon Minero, siendo el presente trabajo ganador mediante resolución N°2132-R-2018. El financiamiento obtenido en dicho concurso se utilizó en la compra de materiales y pago de servicios para la construcción del prototipo.

Conflicto de Intereses

Los autores manifiestan la no existencia de conflicto de interés con la revista, otros autores, financiamiento o algún elemento empleado durante la ejecución de la investigación.

Contribución de los autores

Ángel Dandy Cajahuanca Paita. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2659-2839>

Participó en el diseño de la investigación, revisión bibliográfica, construcción del prototipo de secado, pruebas de secado, cálculos y redacción.

Alejandro Benjamín García Ortiz. ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3472-4587>

Participó en el diseño de la investigación, construcción del prototipo de secado, dirigió las pruebas de secado y participó de la redacción del artículo.

Enzo Martín Casimiro Soriano. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7849-2453>

Participó en la redacción, revisión, elaboración de gráficos, corrección y edición.