

Evaluación Termodinámica y Análisis Matemático de un Sistema Poliédrico Solar de Baja Temperatura para Secado Rápido

Alexander Ibarra J, José Guasumba C.

Resumen-- Este proyecto de investigación realizó la determinación de los parámetros del proceso de secado de biomasa en un sistema poliédrico solar de baja temperatura a través de parámetros como temperaturas de proceso, tiempo de secado, flujos de aire, pesos de la biomasa y contenidos de humedad en función del tiempo, para esto se efectuó la evaluación termodinámica del sistema de secado actual constituido por un quemador de leña que provee aire caliente hacia el secador de cámara poliédrica, dicho sistema energético se lo reemplazó por una alternativa que comprende la aplicación de la energía solar térmica de baja temperatura con el uso de colectores solares planos de doble cubierta con placa absorbadora corrugada para abastecer el calor necesario para el proceso de secado en la cámara poliédrica, para esto se ejecutó el dimensionamiento, diseño y construcción de los colectores solares planos que irán acoplados a la cámara poliédrica de secado, luego se realizó la instrumentación del sistema, posteriormente se efectuaron pruebas experimentales utilizando cargas de pasto fresco para secado con el fin de tomar datos a lo largo del mes de Agosto de 2013 que permitieron efectuar la evaluación termodinámica del sistema poliédrico solar para secado rápido, luego se realizó el análisis y presentación de resultados de la investigación para finalizar con conclusiones y recomendaciones del proyecto.

Palabras-Clave-- cámara poliédrica, colector solar, placa absorbadora, evaluación termodinámica, secado rápido.

I. INTRODUCCIÓN

Los procesos de secado tradicionales, requieren un considerable consumo energético, utilizan tecnologías que aprovechan recursos energéticos no renovables como es el caso del uso de buñuelo, diesel, propano, que son quemados en cámaras de combustión con el consecuente impacto ambiental. Además, estos combustibles son deficitarios y contaminantes. Una alternativa a esta situación comprende la aplicación de la energía solar térmica para procesos de secado a baja temperatura, inferior a los 100 °C.

En la presente investigación se analizará un sistema poliédrico solar de baja temperatura para secado rápido el cual consta de un sistema energético para suministro de aire caliente constituido por un par de colectores solares planos de doble cubierta con placa absorbadora corrugada conectados en serie y acoplados a una cámara poliédrica de secado, para esto en el Capítulo 1 se describen las generalidades del proyecto desglosadas en antecedentes, definición del problema, objetivos, justificación e importancia y alcance de la investigación, en el Capítulo 2 se realizará el estado del arte del recurso solar, de los tipos de colectores solares planos, de la teoría del secado y de la clasificación de secadores solares, en el Capítulo 3 se realizará el levantamiento de información técnica del sistema actual de secado por combustión de biomasa y su respectivo análisis termodinámico, se analizarán alternativas para su sustitución y se diseñará el nuevo sistema energético que reemplazará al sistema en mención, en el Capítulo 4 se realizará el levantamiento de información técnica del sistema poliédrico solar de baja temperatura para secado rápido, posteriormente se llevará a cabo el análisis de los parámetros del proceso para concluir con la evaluación termodinámica a través del análisis matemático del secador solar de cámara poliédrica, en el Capítulo 5 se realizará el análisis de resultados por medio de la caracterización y presentación de los mismos, en el Capítulo 6 se llevará a cabo el análisis de costos de la investigación para finalizar con el Capítulo 7 en el cual se presentarán las conclusiones y recomendaciones respectivas sobre la investigación realizada.

II. ANALISIS DEL RECURSO SOLAR DEL EMPLAZAMIENTO

El análisis del recurso solar en el emplazamiento donde se realizará el proceso experimental se lo efectuó mediante los métodos de Ingeniería Sin Fronteras (ISF), Armstrong Page, Tablas del INAMHI y datos de la NASA los cuales entregan valores de $G_{dm}(+20^\circ)$ (radiación sobre superficie inclinada a 20° , que corresponde al ángulo de inclinación de los colectores solares planos a emplearse como nuevo sistema energético en el sistema poliédrico solar) muy

semejantes pudiéndose observar la concordancia con el peor mes por los cuatro métodos el cuál es el mes de Junio, en cuanto al mejor mes ISF y Amstrong Page concuerdan con que es Enero pero por el método de Tablas del INAMHI nos dice que es Diciembre y por los Datos de la NASA nos dice que es Noviembre, cabe recalcar que los valores obtenidos para Enero, Diciembre y Noviembre respectivamente por estos métodos son cercanos.

Los valores son aceptables en los cuatro métodos como se puede observar en la Tabla 1 y en la Figura 1 que se presenta a continuación, los cuatro procedimientos dan valores muy semejantes, en consecuencia, para el diseño se utilizarán los datos obtenidos por el método de Amstrong Page, ya que este procedimiento presenta facilidad en la utilización de la hoja de cálculo en Excel, además utiliza valores de factores climáticos y utiliza el valor exacto de latitud, al trabajar con todos los decimales y no redondear valores, se obtendrán datos con un altísimo índice de precisión y exactitud, se descarta por completo el método de Tablas del INAMI ya que se basa en un valor de irradiancia global directa constante a lo largo del año lo cual no es cierto y por lo tanto los valores entregados por este método no son fiables.

Tabla 1. Datos de $G_{dm}(+20^\circ)$ por los cuatro métodos

Mes	Método ISF	Método de Amstrong Page	Método Tablas del INAMHI	Método Tablas de la NASA
	$G_{dm}(+20^\circ)$ [KWh/m ²]			
ENERO	4,60	4,67	5,7	4,40
FEBRERO	4,59	4,62	5,44	4,47
MARZO	4,42	4,42	5,13	4,45
ABRIL	4,29	4,02	5,12	4,23
MAYO	3,67	3,61	4,49	3,64
JUNIO	3,46	3,38	4,33	3,46
JULIO	3,54	3,47	4,4	3,70
AGOSTO	3,87	3,83	4,67	4,03
SEPTIEMBRE	4,26	4,25	5,01	4,10
OCTUBRE	4,51	4,53	5,35	4,29
NOVIEMBRE	4,58	4,64	5,64	4,54
DICIEMBRE	4,58	4,66	5,78	4,27

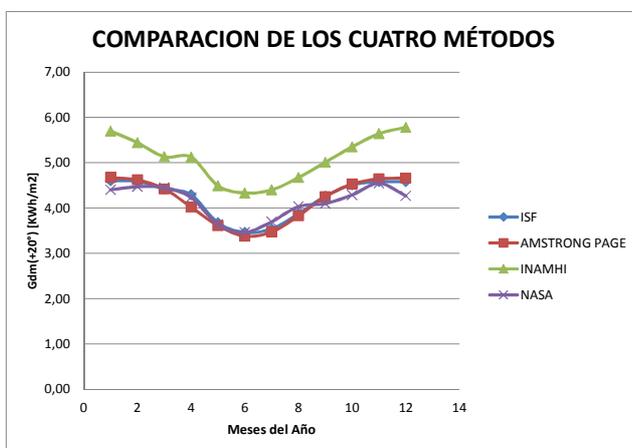


Fig. 1. Comparación de curvas de $G_{dm}(+20^\circ)$ por los cuatro métodos

II. SISTEMA DE SECADO POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA

El sistema de secado actual posee una estructura dividida en tres partes principales las cuales son: una cámara de combustión de biomasa que para este caso el combustible será leña de eucalipto (sistema energético que provee al intercambiador gases a elevadas temperaturas), un intercambiador de calor de tubos cruzados (que proveerá aire caliente a la cámara de secado) y una cámara de secado de tipo poliédrico (en donde se colocará la biomasa a secar, que, para este caso será pasto fresco), como se puede apreciar en la Figura 2 que se presenta a continuación.



Fig. 2. Sistema de secado por combustión de biomasa

Para un posterior análisis a profundidad del sistema de secado por combustión de biomasa se decidió realizar un proceso experimental en donde se tomaron datos fundamentales para la evaluación termodinámica siguiendo el siguiente protocolo de prueba:

1. Pesar la biomasa a secar (pasto fresco) y repartirla en las bandejas de una manera equitativa teniendo de esta manera 1 Kg de pasto fresco por bandeja.
2. Encender la leña en la cámara de combustión anotando a lo largo del tiempo de experimentación el peso de la misma con el objetivo de saber cuál es el peso de combustible utilizado en cada día.
3. Realizar la toma de datos de temperaturas de proceso (en el ambiente, en el sistema energético para calentamiento de aire y en la cámara poliédrica de secado), velocidad de aire de proceso, velocidad del viento, velocidad de gases de combustión, humedad relativa ambiente,
4. Realizar la toma de los datos detallados en el punto 3 cada 10 minutos durante 6 horas de experimentación por 7 días consecutivos con el fin de tener datos aceptables para análisis y evaluación del sistema.
5. Se deberá además llevar un registro del peso de la biomasa a secar (pasto fresco) con una medición inicial y posterior a ésta, cada hora durante las 6 horas de

experimentación por día, con el objetivo de adquirir datos de la variación del peso de la biomasa para corroborar el secado que está sufriendo.

A continuación en la Tabla 2 se presentan los datos obtenidos.

Tabla 2. Datos en media semanal del sistema de secado por combustión de biomasa

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE																	
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA																	
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES III PROMOCIÓN																	
EVALUACIÓN TERMODINÁMICA Y ANÁLISIS MATEMÁTICO DEL SISTEMA DE SECADO POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA																	
INVESTIGADOR: ING. OSWALDO ALEXANDER IBARRA JACOME																	
FECHA: 24 de Septiembre de 2013																	
INTERCAMBIADOR DE TEMPERATURA					CÁMARA POLIÉDRICA DE SECADO					CONDICIONES AMBIENTALES				BIOMASA		LEÑA	
T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	W ₁	T ₁	T ₂	T ₃	T ₄	T _{amb}	W _{amb}	T _a	H _r	V _w	PESO INICIAL	PESO FINAL	PESO INICIAL	PESO FINAL
(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(Wt)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(°C)	(Wt)	(°C)	(%)	(m/s)	(Kg)	(Kg)	(Kg)	(Kg)
667,29	370,46	501,79	157,69	1,26	78,30	87,62	81,28	71,31	112,89	1,18	28,88	26,34	0,75	2,25	1,75	23,26	21,30

De estos datos, en cuanto al Intercambiador de temperatura se tiene en promedio una temperatura en cámara de combustión de 667,29 °C, en la pared de la cámara de combustión 370,46 °C, la temperatura de gases de combustión a la entrada del intercambiador de temperatura fue de 501,79 °C, la temperatura de gases de combustión a la salida del intercambiador de temperatura fue de 157,69 °C a una velocidad de 1,26 m/s, en cuanto a la Cámara Poliédrica de Secado se tienen temperaturas de pared internas de 78,30 °C, 87,62 °C y 81,28 °C respectivamente, la temperatura de la biomasa fue de 71,31 °C con una temperatura de aire de proceso en cámara de 112,89°C a 1,18 m/s, las condiciones ambientales fueron 28,88°C de temperatura ambiente, 26,34 % de humedad relativa y 0,75 m/s de velocidad de viento, además se pudo verificar que, en promedio, de 4Kg de pasto fresco ingresado a la cámara poliédrica y sometidos al proceso de secado luego de seis horas de experimentación se obtuvo un peso final de 1,75 Kg verificándose una disminución de 2,25 Kg del peso inicial, además el peso de combustible (leña) utilizado para seis horas de secado en el sistema de secado por combustión de biomasa en promedio fue de 23,26 Kg, estos datos servirán para poder realizar la evaluación termodinámica mediante el análisis matemático a este sistema.

III. EVALUACIÓN TERMODINÁMICA DEL SISTEMA DE SECADO POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA

En la evaluación termodinámica del sistema de secado por combustión de biomasa se obtuvieron los siguientes parámetros de interés:

- Calor necesario para secar 4kg de pasto
 $Q_U = 252 \text{ Wt}$
- Calor perdido por cambios de aire
 $Q_{pca} = 39,38 \text{ Wt}$
- Calor perdido por las paredes
 $Q_{pp} = 63,95 \text{ [Wt]}$
- Calor generado por el combustible
 $Q_{gc} = 6485,2 \text{ [Wt]}$

- Calor perdido por la chimenea

$$Q_{pch} = 963,38 \text{ [Wt]}$$

- Calor perdido por la cámara de combustión

$$Q_{pcc} = 1212,01 \text{ [Wt]}$$

- Calor perdido por cenizas

$$Q_{pcen} = 18,51 \text{ [Wt]}$$

- Calor transferido por el intercambiador de temperatura

$$Q_{ti} = 2193,08 \text{ [Wt]}$$

Por lo tanto, el calor generado por el combustible sólido proveniente de la biomasa es de 6485,2 Wt de los cuales se aprovechan 4741,31 Wt y solamente se utiliza 252 Wt para el secado de 4Kg de pasto fresco (esto se debe a que el sistema de secado por combustión de biomasa ha sido diseñado para una capacidad de 55 Kg y únicamente en el proceso experimental se secó 4Kg por día), esto sin considerar la pérdida de calor por combustión incompleta al generarse CO y el calor de combustión incompleta mecánica que se produce cuando no existe agitación adecuada del hogar de combustión.

IV. SISTEMA POLIÉDRICO SOLAR PARA SECADO RÁPIDO

La propuesta del sistema poliédrico solar para secado de biomasa posee una estructura dividida en tres partes principales las cuales son: un ventilador que inyectará aire del ambiente para que éste se transforme en aire de proceso, un par de colectores solares planos de doble cubierta con placa absorbadora corrugada conectados en serie con el objetivo de transformarse en el nuevo sistema energético que provee aire a elevadas temperaturas a la cámara poliédrica de secado y por último una cámara de secado de tipo poliédrico (en donde se colocará la biomasa a secar, que, para este caso será pasto fresco), como se puede apreciar en la Figura 3 que se presenta a continuación.



Fig. 3. Sistema poliédrico solar para secado rápido

La adquisición de datos del sistema poliédrico solar para secado de biomasa requiere realizar el sensamiento de datos de temperaturas de proceso (en el ambiente, en el sistema energético para calentamiento de aire y en la cámara poliédrica de secado), velocidad de aire de proceso, velocidad del viento, humedad relativa ambiente, humedad de cámara de secado, radiación solar directa, difusa, albedo y peso de la biomasa.

Para un posterior análisis a profundidad del sistema poliédrico solar para secado rápido se decidió realizar un proceso experimental en donde se tomaron datos fundamentales para la evaluación termodinámica siguiendo el siguiente protocolo de prueba:

1. Pesar la biomasa a secar (pasto fresco) y repartirla en la bandeja de una manera equitativa teniendo de esta manera 1 Kg de pasto fresco en bandeja.
2. Encender el panel de operador y el ventilador del proceso.
3. Realizar la toma de datos de temperaturas de proceso (en el ambiente, en el sistema energético para calentamiento de aire y en la cámara poliédrica de secado), velocidad de aire de proceso, velocidad del viento, radiación solar directa, difusa y albedo, humedad relativa ambiente.
4. Realizar la toma de los datos detallados en el punto 3 cada 10 minutos durante 6 horas de experimentación por un mes con el fin de tener datos aceptables para análisis y evaluación del sistema.
5. Se deberá además llevar un registro del peso de la biomasa a secar (pasto fresco) con una medición inicial y posterior a ésta, cada hora durante las 6 horas de experimentación por día, con el objetivo de adquirir datos de la variación del peso de la biomasa para corroborar el secado que está sufriendo.

A continuación en la Tabla 3 se presentan los datos obtenidos.

Tabla 3. Datos en media en mensual del sistema poliédrico solar para secado rápido

UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE															
DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA															
MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES III PROMOCIÓN															
EVALUACIÓN TERMODINÁMICA Y ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN SISTEMA POLIÉDRICO															
SOLAR DE BAJA TEMPERATURA PARA SECADO RÁPIDO															
PROMEDIO MENSUAL DEL MES DE AGOSTO DE 2013															
COLECTORES SOLARES PARA CALENTAMIENTO DE AIRE				CÁMARA POLIÉDRICA DE SECADO				CONDICIONES AMBIENTALES				BIOMASA			
T1 (°C)	T2 (°C)	T3 (°C)	TSC1 (°C)	TSC2 (°C)	Tc (°C)	HRC (%)	Viento (m/s)	Ta (°C)	HR (%)	Viento (m/s)	W (W/m2)	Wd (W/m2)	Wb (W/m2)	PESO INICIAL (Kg)	PESO FINAL (Kg)
25,65	68,30	97,28	28,16	30,26	80,06	27,76	4,00	26,52	29,77	1,10	479,40	107,07	106,31	0,557	0,443

De estos datos, en cuanto al sistema energético constituido por los colectores solares se tiene una temperatura de ingreso del aire de proceso al colector uno de 25,65°C, al pasar por dicho colector el aire sufre un calentamiento reflejado en su valor de salida el cual corresponde a 68,30°C, a esta temperatura ingresa al colector dos sufriendo nuevamente un aumento en su temperatura llegando en la salida a estar a 97,28°C, las temperaturas superficiales de los colectores en promedio

mensual son de 28,16°C para el colector uno y de 30,26°C para el colector dos, el aire caliente (a 97,28°C) ingresa a la cámara poliédrica donde se encuentra con 1Kg de biomasa (pasto fresco) por la cual la temperatura en cámara desciende a 80,06°C el proceso de secado se lleva a cabo con una velocidad promedio de aire de proceso de 4 m/s con una humedad relativa en cámara de 27,76%, las condiciones ambientales en el emplazamiento muestran una temperatura ambiente promedio de 26,52°C con una velocidad de viento de 1,1 m/s y una humedad relativa ambiente de 29,77%, en cuanto al recurso solar se pudo obtener datos mensuales de 479,4 W/m2 de radiación directa, 107,07 W/m2 de radiación difusa y 106,31 W/m2 de radiación de albedo, luego de transcurridas 6 horas de experimentación el kilogramo inicial de biomasa se redujo a 0,443 Kg. teniendo una pérdida de peso de 0,557 Kg reflejándose una pérdida de peso del 55,7% del peso inicial, con estos datos se procederá entonces a realizar la evaluación termodinámica mediante el análisis matemático del sistema poliédrico solar para secado rápido.

V. EVALUACIÓN TERMODINÁMICA DEL SISTEMA DE SECADO POR COMBUSTIÓN DE BIOMASA

En la evaluación termodinámica del sistema de secado por combustión de biomasa se obtuvieron los siguientes parámetros de interés:

En el sistema energético solar (constituido por un par de colectores solares planos de doble cubierta con placa absorbadora corrugada) se determinaron los siguientes parámetros de interés que se presentan a continuación en la Tabla 4.

Tabla 4. Presentación de parámetros calculados en la evaluación termodinámica del sistema energético solar

Parámetros calculados en la evaluación termodinámica del sistema de colectores			
Parámetro	Denominación	Valor	Unidad
Radiación solar para cielo isotrópico	S	2339,55	Wh/m2 día
Coefficiente de convección entre la cubierta 1 y el ambiente	hc,c1-amb	6,10	W/m2°C
Coefficiente de convección entre la placa absorbadora 1 y la placa absorbadora 2	hc,p1-p2	98,093	W/m2°C
Coefficiente de convección entre la base y el ambiente	hc,b-amb	6,10	W/m2°C
Coefficiente de convección entre la cubierta 2 y la cubierta 1	hc,c1-c2	21,74	W/m2°C
Coefficiente de convección entre la cubierta 2 y la placa absorbadora 1	hc,c2-p1	5,864	W/m2°C
Coefficiente de radiación entre la cubierta 1 y sky	hr,c1-sky	6,026	W/m2°C
Coefficiente de radiación entre la base y el ambiente	hr,b-amb	1,860	W/m2°C
Coefficiente de radiación entre la cubierta 1 y la cubierta 2	hr,c1-c2	7,835	W/m2°C
Coefficiente de radiación entre la placa absorbadora 1 y la cubierta 2	hr,p1-c2	10,96	W/m2°C
Coefficiente de radiación entre la placa absorbadora 1 y la placa absorbadora 2	hr,p1-p2	12,59	W/m2°C
Coefficiente de radiación del aislante térmico	hr,aisl	2,540	W/m2°C
Coefficiente global de transferencia de calor	U	6,064	W/m2°C
Factor de eficiencia del colector	F'	93	%
Factor de eficiencia de la aleta	F	98	%
Factor de remoción del calor	FR	90	%
Calor útil	Qu	268	Wt
Eficiencia del colector	n	10	%

Con estos parámetros verificamos que se cumple que para sistemas térmicos a mayor temperatura menor eficiencia y además que si se aumentara un tercer colector solar al sistema el calor útil se volvería negativo, es por eso que para sistemas de alta temperatura este sistema no funciona adecuadamente por que se tiene alta temperatura pero poco calor.

En la cámara poliédrica de secado se determinaron los siguientes parámetros de interés que se presentan a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5. Presentación de parámetros calculados en la evaluación termodinámica de la cámara poliédrica de secado

Parámetros calculados en la evaluación termodinámica de la cámara poliédrica de secado			
Parámetro	Denominación	Valor	Unidad
Calor necesario para secar 1Kg de pasto fresco	Q	63,59	Wt
Calor perdido por cambios de aire	Qpca	2	Wt
Calor perdido por las paredes de la cámara poliédrica	Qpp	16,190	Wt

VI. PRESENTACION DE RESULTADOS

En el Sistema Poliédrico Solar de baja temperatura para secado rápido existen una gran cantidad de variables termofísicas que deben ser analizadas basadas en los datos del proceso experimental de la presente investigación, de allí que, se requiere evaluar información de las condiciones ambientales, temperaturas del sistema energético solar, temperatura y velocidad del aire de proceso en cámara, así como también datos del proceso de secado de la biomasa (pasto fresco), a continuación en la Tabla 6 se presentan los datos en media diaria mensual por tiempo de experimentación.

Tabla 6. Presentación de resultados

		UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS-ESPE DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA MAESTRÍA EN ENERGÍAS RENOVABLES III PROMOCIÓN														
		EVALUACIÓN TERMODINÁMICA Y ANÁLISIS MATEMÁTICO DE UN SISTEMA POLIÉDRICO SOLAR DE BAJA TEMPERATURA PARA SECADO RÁPIDO														
		INVESTIGADOR: ING. OSWALDO ALEXANDER IBARRA JÁCOME														
		PROMEDIO DIARIO MENSUAL DEL MES DE AGOSTO DE 2013														
		CONDICIONES AMBIENTALES														
HORA	TIEMPO	Ta [°C]	HR [viento] [%]	Ig [m/s]	Id [W/m2]	Ia [W/m2]	It [W/m2]	T1 [°C]	T2 [°C]	T3 [°C]	TSC1 [°C]	TSC2 [°C]	Tc [°C]	HRC [%]	Vaire [m/s]	BIOMASA PESO [Kg]
9:00	0	22,81	43,94	0,63	299,94	59,52	82,68	442,13	15,61	20,52	24,19	16,05	17,16	15,88	38,66	3,61
9:10	10	24,16	39,26	0,79	322,87	60,26	86,81	469,94	16,49	27,54	32,94	19,39	19,71	23,64	34,65	3,69
9:20	20	25,14	36,87	3,12	368,48	56,97	88,13	513,58	17,62	33,66	42,25	20,94	20,90	32,21	33,34	3,81
9:30	30	26,00	34,32	0,48	397,03	58,81	94,32	550,18	18,26	40,58	51,29	22,90	22,42	41,16	32,06	3,82
9:40	40	26,80	32,90	0,93	453,61	66,90	99,13	619,65	19,48	47,03	61,20	23,42	23,39	49,27	30,96	3,89
9:50	50	26,95	31,06	0,65	446,81	66,48	98,94	612,23	20,54	52,65	69,69	25,16	25,42	52,74	29,67	3,96
10:00	60	27,28	29,52	0,61	445,84	67,61	99,77	613,23	21,53	57,73	77,65	25,23	26,19	60,51	28,54	3,97
10:10	70	28,99	29,26	0,60	437,97	70,32	96,03	604,32	22,33	61,22	83,99	25,68	26,84	72,56	30,80	3,94
10:20	80	28,53	27,97	1,00	502,42	77,39	103,06	690,20	23,22	64,91	89,63	26,35	27,74	78,24	29,20	3,95
10:30	90	28,58	27,23	0,72	501,94	77,84	109,00	688,77	24,17	68,77	94,76	26,84	28,39	81,95	28,36	3,87
10:40	100	28,55	27,06	2,11	517,45	81,19	110,05	709,29	24,58	70,24	98,72	27,61	29,81	84,03	27,93	3,80
10:50	110	28,91	26,55	0,98	525,29	84,87	121,71	731,87	25,51	74,31	103,27	28,16	30,19	86,05	27,08	3,84
11:00	120	29,04	26,61	0,75	557,67	89,03	118,94	776,84	26,16	77,48	109,26	28,94	31,52	89,76	26,22	3,86
11:10	130	28,85	26,23	1,10	570,13	103,32	127,35	800,81	26,97	80,16	116,05	29,65	32,13	93,45	32,86	3,93
11:20	140	28,36	26,55	0,99	518,71	104,10	113,10	735,90	27,49	82,47	116,04	29,90	32,45	95,40	29,85	4,03
11:30	150	27,06	27,42	0,73	495,35	111,10	109,26	715,71	27,60	81,53	115,62	30,16	32,81	95,12	27,12	4,07
11:40	160	26,71	27,87	1,06	605,94	109,45	105,65	821,03	27,88	81,74	116,42	30,58	33,65	95,22	26,18	4,09
11:50	170	26,48	28,10	0,91	508,24	115,16	109,94	757,84	27,96	82,12	119,12	30,52	33,42	96,37	25,39	4,11
12:00	180	26,03	28,26	1,02	505,65	115,58	110,19	775,42	27,84	80,27	115,67	30,29	33,19	94,20	25,71	4,07
12:10	190	25,67	29,13	0,81	539,06	119,87	116,68	775,81	28,57	80,26	116,68	30,10	33,45	94,71	29,88	4,09
12:20	200	25,79	29,16	0,93	583,23	134,48	120,55	836,26	28,88	81,20	116,77	30,19	33,26	94,81	27,12	4,05
12:30	210	25,79	28,52	1,13	598,29	135,81	128,29	862,39	29,12	80,96	117,08	30,77	33,94	95,51	25,67	4,05
12:40	220	25,68	28,35	1,19	555,19	139,26	112,94	809,29	29,02	81,05	116,77	31,16	34,16	94,10	24,74	4,08
12:50	230	25,61	28,77	1,15	516,26	145,19	113,26	774,71	28,58	78,99	114,13	30,77	33,35	92,24	24,10	4,08
13:00	240	25,52	28,97	1,32	500,84	138,16	109,90	748,90	28,86	77,36	112,55	30,87	33,32	91,13	23,28	4,09
13:10	250	25,33	29,19	1,47	490,97	135,26	112,29	736,52	28,49	76,55	111,12	30,35	32,97	89,59	30,88	4,22
13:20	260	25,40	29,29	1,36	501,10	149,32	112,67	783,26	28,42	75,62	111,12	30,55	32,35	90,59	27,62	4,02
13:30	270	25,38	28,97	1,44	552,52	136,97	114,81	804,29	28,70	74,94	110,90	30,61	33,26	89,60	25,25	4,01
13:40	280	25,63	28,87	1,39	539,06	137,74	113,10	789,90	28,73	100,39	113,32	30,52	33,81	91,94	23,92	4,06
13:50	290	25,58	28,48	1,44	409,10	127,39	101,16	697,65	28,42	73,84	110,35	30,19	33,45	90,44	23,92	4,14
14:00	300	25,52	28,61	0,92	442,65	130,13	103,29	676,06	28,03	74,59	108,89	30,23	32,71	90,29	23,13	4,15
14:10	310	25,63	28,71	1,07	482,90	135,65	106,00	724,55	27,89	69,69	106,88	30,03	32,64	88,40	28,62	4,09
14:20	320	25,43	29,03	1,06	396,48	124,94	94,39	615,81	27,70	66,82	103,25	30,16	32,61	85,54	26,18	4,11
14:30	330	25,24	29,32	1,17	414,77	120,06	97,32	632,16	27,31	66,10	102,09	29,94	32,13	85,37	25,08	4,15
14:40	340	25,39	29,24	1,00	425,74	117,74	91,13	634,61	27,58	64,10	99,60	29,58	31,71	84,80	24,60	4,12
14:50	350	25,30	30,29	1,38	397,13	118,29	95,94	611,26	26,99	61,31	95,99	28,94	31,13	83,44	24,22	4,11
15:00	360	24,88	30,94	1,40	350,32	121,48	97,58	569,38	26,59	61,41	94,61	28,45	30,90	82,00	24,02	4,03
PROMEDIOS		26,52	29,77	1,10	479,40	107,07	106,31	692,78	25,65	68,30	97,28	28,16	30,26	80,06	27,76	4,00
VALOR MÁXIMO		29,04	43,94	3,12	605,94	149,32	128,29	862,39	29,12	100,39	119,12	31,16	34,16	96,37	38,66	4,22
VALOR MÍNIMO		22,81	26,23	0,48	299,94	56,97	82,68	442,13	15,61	20,52	24,19	16,05	17,16	15,88	23,13	3,61

En cuanto al peso de la biomasa que sufrió el proceso de secado, en el mismo se constató que en seis horas de secado se tuvo una reducción promedio en peso de 0,557 Kg de 1Kg de peso inicial, a continuación en la Tabla 7 se muestran los valores en media diaria mensual para este parámetro.

Tabla 7. Peso de la biomasa en el proceso de secado

BIOMASA			
ORD.	HORA	TIEMPO	PESO (Kg)
1	9:00	0	1
2	10:00	60	0,883
3	11:00	120	0,771
4	12:00	180	0,655
5	13:00	240	0,574
6	14:00	300	0,506
7	15:00	360	0,443

En esta tabla se puede visualizar que en valor promedio el peso de la biomasa después de 6 horas de secado fue de 0,443 Kg denotándose una reducción en peso del 55,7% respecto a su peso inicial (1Kg), a continuación en la Figura 4 se puede apreciar la apariencia de la biomasa al principio y al final de la experimentación respectivamente.



Figura 4. Aspecto de la biomasa: a) al inicio del proceso experimental, b) luego de seis horas de secado

VII. CONCLUSIONES

- Con el desarrollo del presente proyecto investigativo se ha logrado identificar una aplicación del recurso solar de baja temperatura enfocado al secado rápido de biomasa y proponer una alternativa de solución al sistema de secado por combustión de biomasa mediante el uso de un sistema energético solar para el aprovechamiento de la energía solar térmica de baja temperatura por medio de un par de colectores solares planos de doble cubierta con placa absorbidora corrugada.
- Al desarrollar la presente investigación se ha logrado determinar que la temperatura de aire de proceso al

ingreso del sistema de colectores (constituido por un par de colectores solares planos de doble cubierta con placa absorbidora corrugada conectados en serie) se incrementa en casi cuatro veces su valor inicial al finalizar su recorrido por los mismos pasando de 25,65°C a 97,28°C.

- Se determinó que en promedio 1 Kg de pasto fresco luego de someterse a seis horas de secado en el sistema poliédrico solar para secado rápido a una temperatura y velocidad de aire de proceso en cámara de 80,06 °C y 4 m/s respectivamente, reduce su peso en un 55,7% terminando con un valor de 0,443 Kg al final de la experimentación.
- En la evaluación termodinámica del sistema de colectores se concluye que para sistemas térmicos a mayor temperatura menor eficiencia y además que si se aumentara un tercer colector solar al sistema implementado el calor útil se volvería negativo razón por la cual para sistemas de alta temperatura el sistema propuesto e implementado no funciona adecuadamente por que se tiene alta temperatura pero poco calor.
- El sistema poliédrico solar para secado rápido de biomasa puede ser utilizado en regiones que disponen de un importante recurso solar, como es el caso de las comunidades localizadas en la Sierra central del Ecuador donde se ha determinado en promedio de 4 a 4,5 horas de sol pico y valores de irradiancia de 600 a 850 W/m².

VIII. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el proceso de secado en el sistema poliédrico solar se lo debería realizar a una temperatura aproximada de 50-65 °C con la finalidad de obtener mayor calor útil en el sistema, razón por la cual para mejorar los resultados del secado se recomienda realizar una automatización del sistema empleando para el efecto alguna técnica de control enfocada a temperatura de aire de proceso en la cámara poliédrica.
- Con el objetivo de disminuir el calor perdido por cambios de aire del sistema realizado, se recomienda implementar un sistema electrónico de pesaje de la biomasa en la cámara poliédrica para de esta manera no tener que en el proceso experimental abrir la cámara de secado para sacar e ingresar la bandeja con la biomasa a pesar.
- En lo referente a la operación del equipo experimental se recomienda que el operador primero encienda el

switch del ventilador y luego el switch de encendido de la caja de operador para evitar campos magnéticos en el arranque del ventilador que alteren el funcionamiento de los LCD's que muestran los datos medidos.

- En lo referente a la operación del equipo experimental se recomienda además limpiar las superficies o cubiertas de los colectores solares con el fin de eliminar suciedad o polvo acumulado que pudiera entorpecer el aprovechamiento de la radiación solar incidente en el área de captación.
- Con los datos adquiridos y analizados en el presente proyecto se espera que sean cimiento para futuras investigaciones que utilicen este sistema para incorporarlo en otras aplicaciones ya sea directa o indirectamente.
- Mediante el uso de sistemas solares para calentamiento de fluidos aplicados al secado de biomasa se puede reducir el consumo de combustibles fósiles o leña que en el ámbito rural son deficitarios.

REFERENCIAS

- [1] Incropera F., Dewitt D., Fundamentals of Heat and Mass Transfer, 4ª Edición, Editorial WILEY, New York, 1996.
- [2] Cengel, Y., Termodinámica, 6ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2009.
- [3] Cengel, Y., Transferencia de Calor, 2ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2003.
- [4] Mills A. F., Transferencia de Calor, 1ª Edición, Editorial IRWIN, España.
- [5] Pitts D., Sissom E., Transferencia de Calor, 1ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, Bogotá, 1979.
- [6] Corvalan R., Horn M., Roman R., Saravia L., Ingeniería del Secado Solar, Editorial CITED-D, 1992.
- [7] Potter M., Somerton C., Termodinámica para Ingenieros, Editorial Mc Graw Hill, España, 2004.
- [8] Rolle K., Termodinámica, 6ª Edición, Pearson, México, 2006.
- [9] Faires V., Simmang C., Termodinamica, Editorial UTEHA, Mexico, 1982.
- [10] Cengel, Y., Transferencia de Calor y masa, 3ª Edición, Editorial Mc Graw Hill, México, 2007.

[11] García Villas, M., Energía Solar Fotovoltaica y Cooperación para el Desarrollo, ISF-IEPALA, Instituto de Energía Solar de la Universidad Politécnica de Madrid, 1999.

[12] ROSSI, S.J. & ROA, G. Secagem e armazenamento de produtos agropecuarios com. uso de energia solar e ar natural. Sao Paulo, Academia de Ciencias do Estado de Sao Paulo, 1980.

[13] PIACENTINI & CORTES, A. Coletores solares a fluxo de aire empleados en el secado de productos agrícolas. IN: SEMINARIO SOBRE SECAGEM DE PRODUTOS AGRICOLAS COM ENERGIA SOLAR, 1, Campinas, 1983. Anais. Campinas, 1983.

[14] STRATFORD, C.; LAWAND, T.A.; OLIVEIRA FILHO, D.; JUTRAS, P.; CHAGNON, R. Development of a barn integrated solar air preheated for drying agricultural crops. Ste Anne de Bellexuve, Quebec, Canada, Brace Research Institute, 1983.

[15] SANTOS, L.A. Construção e avaliação de um coletor-armazenador de energia solar, não convencional, para aquecimento de ar na secagem de produtos agrícolas. Campinas, Faculdade de Engenharia de Alimentos e Agrícola, UNICAMP, 1980. (Tese M.S.).

[16] MONTERO, Puertas Irene, Tesis Doctoral, Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos, Universidad de Extremadura, 2005.

[17]http://www.inamhi.gob.ec/mapas/3%20Irradiacion%20global_A0.pdf

[18] <http://www.ecopotencia.com/incidencia.html>

[19]<https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/retscreen.cgi?&email=rets@nrcan.gc.ca&step=1&p=&lat=031325&submit=Submit&lon=>

[20]<http://www.cubasolar.cu/biblioteca/energia/Energia40/HTML/articulo04.htm>

[21] <http://www.fao.org/docrep/x5058s/x5058s04.htm>