



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA  
SEDE MEDELLÍN

# **Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (Manihot esculenta, Crantz).**

**Víctor Hugo Borda-Yepes**

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas  
(Escuela de Procesos y Energía)  
Medellín, Colombia  
2012



**Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (Manihot esculenta, Crantz).**

**System hybrid Photovoltaic Thermal: Drying cassava leaves (Manihot esculenta, Crantz) with thermodynamic model.**

**Víctor Hugo Borda-Yepes**

**Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de: Magister en Ingeniería Mecánica**

**Director: Ph.D. Farid Chejne Janna**

**Modelado y simulación de procesos físico-químicos**

**TAYEA**

**(Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas)**

**Universidad Nacional de Colombia**

**Facultad de Minas (Escuela de Procesos y Energía)**

**Medellín, Colombia**

**2012**





# DEDICATORIA

A mi mamá y mi papá por su gran sacrificio e incondicional apoyo. A mis compañeros de la Maestría en Ingeniería Mecánica.

Al Dios de mi familia (Deuteronomio 26. 5-9)

LA ENERGÍA SOLAR: Transformada en electricidad es una solución segura y prometedora para muchos de los dilemas energéticos mundiales.

**Carl Sagan**



## **Agradecimientos**

Al profesor Farid Chejne, un gran ejemplo de integridad, un maestro en todo el sentido de la palabra.

A mi amigos Julia Victoria Escobar y Luis Miguel Ramírez Nader.

A los profesores María Eugenia Muñoz, Wilfredo Montealegre, Nelson Vanegas y Juan Fernando Ramírez y compañeros Francisco Ramírez, Esteban Sepúlveda, Jesica Andrea Isaza y José David Vera de la maestría en Ingeniería mecánica por sus aportes a la elaboración de este proyecto de investigación.

A los profesores Juan de la Cruz, Alejandro Molina, Mauricio Osorio, Carlos Mejía, Juan Pablo Hernández y German Poveda y los compañeros cercanos del TAYEA: David Granados, Diego Yepes, Iván Moncayo, Daniel Ramírez, Alejandro Jaramillo, Jonathan Pulgarin, Juan Pablo Medina, Laura Urán, Jessica Osorio, Jorge Montoya, Diego Camargo, Gloria Marrugo, Jader Alean, Carlos Valdez y Carlos Gómez, y a todos lo que de una u otra forma aportaron para que este proyecto tuviera un excelente fin.



## Resumen

Los procesos de secado pueden ser realizados a través de sistemas híbridos termo-fotovoltaicos, ya que, estos disponen de energía térmica y eléctrica en un sólo sistema. En esta investigación se desarrolló un modelo termodinámico que permite calcular la cogeneración de energía térmica y eléctrica para procesos de secado de hoja de Yuca (*Manihot esculenta*, Crantz). Se simuló el proceso de secado bajo diferentes condiciones físicas de información generada a partir de la experimentación realizado en túnel de viento y termo balanza gravimétrica bajo diferentes condiciones de velocidad de flujo de aire 0.5, 1.0 y 1.5m/s y temperaturas de 40, 50 y 60°C del aire. Adicional, se realizaron pruebas de contenido de proteína cruda, glucósidos cianogénicos (HCN), análisis próximo y elemental para cada una de las condiciones buscando como el proceso de secado de la hoja de yuca afecta los mismos.

**Palabras clave:** Sistemas híbridos termo-fotovoltaicos, Yuca forrajera, Modelo termodinámico, Secado agroindustrial.

## Abstract

Drying processes can be made through thermo-photovoltaic hybrid systems, since these have heat and electricity in a single system. In this research we developed a thermodynamic model for calculating cogeneration heat and electricity for drying cassava leaf (*Manihot esculenta*, Crantz). Process was simulated under different physical drying of information generated from the experimentation performed in a wind tunnel and thermo gravimetric balance under different air flow rate of 0.5, 1.0 and 1.5m/s and temperatures of 40, 50 and 60 ° C air. Additional tests were conducted with crude protein content, cyanogenic glycosides (HCN), and elemental analysis close to each of the searching conditions as the drying process affects the cassava leaf thereof.

**Keywords:** Photovoltaic/thermal hybrid system, Cassava Leaves, Thermodynamic model, Drying agroindustrial.



# Contenido

	Pág.
<b>Tabla de contenido</b>	
<b>Resumen</b> .....	<b>IX</b>
<b>Lista de figuras</b> .....	<b>XII</b>
<b>Lista de tablas</b> .....	<b>XIV</b>
<b>Lista de Símbolos y abreviaturas</b> .....	<b>XV</b>
<b>1. Introducción</b> .....	<b>19</b>
<b>2. Modelo del sistema híbrido termo-fotovoltaico para el secado de hoja de Yuca</b>	<b>25</b>
2.1 Pruebas experimentales de la hoja de Yuca.....	25
2.1.1 Secado en el túnel de viento.....	25
2.1.2 Pruebas en la termo-balanza-gravimétrica.....	27
2.1.3 Análisis próximo y elemental.....	28
2.1.4 Pruebas de proteína cruda y HCN .....	29
2.2 Modelo híbrido termo-fotovoltaico .....	30
2.3 Consideraciones al modelo .....	35
2.4 Simulación del proceso de secado .....	37
<b>3. Resultados</b> .....	<b>39</b>
3.1 Pruebas experimentales de la hoja de Yuca.....	39
3.1.1 Secado en el túnel de viento.....	39
3.1.2 Pruebas en la termo balanza gravimétrica .....	44
3.1.3 Análisis próximo y elemental.....	46
3.1.4 Pruebas de proteína cruda y HCN .....	47
3.2 Simulación del proceso de secado .....	51
3.2.1 Validación y escalado del prototipo.....	51
3.2.2 Simulación de las ecuaciones en la cámara de secado .....	53
<b>4. Conclusiones y recomendaciones</b> .....	<b>57</b>
4.1 Conclusiones.....	57
4.2 Recomendaciones.....	58

## Lista de figuras

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Mapa conceptual de la Investigación.....	23
Figura 2. a)Equipo túnel de viento y b) Instrumentos de medición .....	26
Figura 3. Hoja típica de yuca forrajera HMC-1. ....	26
Figura 4. Equipo a)micro molino y b,c)termo balanza gravimétrica. ....	28
Figura 5. Proporción de hoja y peciolo seco en estufa a 105°C .....	28
Figura 6. Mapa conceptual de sistemas híbridos termo fotovoltaicos.....	31
Figura 7. Modelo del sistema híbrido termo-fotovoltaico. ....	32
Figura 8. Balance de energía sobre el sistema placa-plana y termo-fotovoltaico. ....	32
Figura 9. Balance de energía el secador.....	34
Figura 10. Curva de secado a diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s) y temperaturas (40, 50 y 60°C).....	40
Figura 11. Tasa de secado a diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s) .....	40
Figura 12. Tasa de secado a diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s) y .....	41
Figura 13. Factor de tasa de secado K y Ln K para diferentes temperaturas y factor de tasa de secado K para diferentes velocidades. ....	43
Figura 14. Curvas de adsorción y desorción a diferentes temperaturas y una HR constante. ....	45
Figura 15. Línea de tendencia en adsorción a diferentes temperaturas .....	46
Figura 16. Línea de tendencia en desorción a diferentes temperaturas .....	46
Figura 17. Calor específico del hoja de Yuca .....	46
Figura 18. Contenido de HCN a través del tiempo en el túnel de viento para diferentes velocidades.....	47
Figura 19. Contenido de HCN versus los contenidos de humedad.....	48
Figura 20. Enlaces químicos de las proteínas en la hoja de Yuca con el CN. ....	49
Figura 21. Contenido de Proteína cruda a través del tiempo en el túnel de viento para diferentes velocidades. ....	50
Figura 22. Contenido de Proteína versus los contenidos de humedad.....	50
Figura 23. Simulación a diferentes temperaturas (40, 50 y 60°C) y diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s).....	55
Figura 24. Simulación de la tasa de desorción diferentes temperaturas (40, 50 y 60°C) y diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s) .....	55
Figura 25. Simulación de la tasa de desorción a diferentes temperaturas y velocidades y datos experimentales en el túnel de viento. ....	56
Figura 26. Equipos de sistemas híbridos termo-fotovoltaicos para el secado agroindustrial .....	59



Figura 27. Caja negra para la hoja de Yuca forrajera. ....	63
Figura 28. Caja transparente para la hoja de Yuca forrajera.....	63

## Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. Pruebas de análisis próximo y elemental .....	29
Tabla 2. Datos de Radiación solar (H) y Brillo solar (S) Mutata, Antioquia. ....	36
Tabla 3. Números de Reynolds en el túnel de viento .....	42
Tabla 4. Densidad de bulto y proporción hoja-peciolo para la hoja de Yuca.....	43
Tabla 5. Difusividad de hoja de yuca.....	45
Tabla 6. Análisis próximo de hoja de Yuca.....	46
Tabla 7. Análisis elemental de hoja de Yuca.....	47
Tabla 8. Valores de diseño y especificaciones .....	51
Tabla 9. Validación y escalado del prototipo .....	52
Tabla 10. Parámetros utilizados en la ecuación 2-4 del modelo híbrido termo-fotovoltaico .....	54
Tabla 11. Enfoque del diseño.....	60
Tabla 12. Árbol de objetivos.....	60
Tabla 13. Lista de especificaciones para un equipo de secado de hoja de Yuca (Manihot esculenta, Crantz).....	61
Tabla 14. Diagrama morfológico para un equipo de secado de hoja de Yuca (Manihot esculenta, Crantz).....	64
Tabla 15. Cálculo del término de Arrhenius k en adsorción.....	66
Tabla 16. Cálculo del término de Arrhenius k en desorción.....	66
Tabla 17. Análisis de regresión para el factor de la tasa de secado $K$ en el túnel de viento .....	67

# Lista de Símbolos y abreviaturas

## Símbolos con letras latinas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$A$	Parámetro adimensional		
$A_c$	Área del colector solar	[m <sup>2</sup> ]	Ec. 4-1
$B$	Parámetro adimensional		
$C$	Carbono	[%peso]	Equipo CHN-600
$CF$	Carbón Fijo	[%peso]	ASTM D3172-89
$C_{fresnel}$	Calor específico del lente fresnel	[J/kg K]	Ec. 2-2
$C_p$	Calor específico en la placa	[J/kg K]	Ec. 2-1
$C_{pf}$	Calor específico a presión constante del fluido	[J/kg K]	Ec. 2-3
$C_z$	Cenizas	%peso	ASTM D3174-93
$C_{vf}$	Calor específico del fluido	[J/kg K]	Ec. 2-3
$C_c$	Calor específico de masa seca	[J/kg K]	Ec. 2-4
$dx$	Diferencial de longitud a lo largo de la placa-plana		
$D$	Espesor del sistema híbrido termo-fotovoltaico	[m]	Ec. 2-3
$D$	Número del día del año	[día]	Ec. 1-2
$D_L$	Difusividad de un líquido	[m <sup>2</sup> /s]	Ec. 1-2
$D_{L0}$	Prefactor exponencial		Ec. 1-3
$D_{Ladsorción}$	Difusividad de adsorción	[m <sup>2</sup> /s]	Ec. 3-4
$D_{Ldesorción}$	Difusividad de desorción	[m <sup>2</sup> /s]	Ec. 3-5
$d_{sc}$	Espesor de la cámara interna	[m]	
$E_a$	Energía de Activación	[J/mol]	Ec. 1-6
$e_p$	Espesor de la placa	[m]	Ec. 2-1
$e_{fresnel}$	Espesor del lente fresnel	[m]	Ec. 2-2
$H$	Hidrógeno	%peso	Equipo CHN-600
$H$	Radiación solar global	[kWh/m <sup>2</sup> /día]	Ec. 1-1
$H_0$	Radiación solar promedia diaria extraterrestre	[kWh/m <sup>2</sup> /día]	Ec. 1-2
$HR$	Humedad residual	%peso	ASTM D3173-87
$h_f$	Coefficiente de transferencia de calor del flujo de aire	[W/m <sup>2</sup> K]	Ec. 2-4
$\overline{h_f}$	Coefficiente de transferencia promedia	[W/m <sup>2</sup> K]	Ec. 1-7
$h_{Tfresnel}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección local desde el lente fresnel hacia el medio ambiente	[W/m <sup>2</sup> K]	Ec. 2-2
$h_{Tp}$	Coefficiente de transferencia de calor por convección local desde la placa-plana hacia el medio ambiente	[W/m <sup>2</sup> K]	Ec. 2-1

<b>Símbolo</b>	<b>Término</b>	<b>Unidad SI</b>	<b>Definición</b>
$h_{pf}$	Coeficiente de transferencia de calor por convección local desde la placa-plana hacia el fluido	[W/m <sup>2</sup> K]	Ec. 2-1
$h_v$	Entalpia de evaporación	[J/kg]	Ec. 2-4
$I(t)$	Radiación solar del lugar	[W/m <sup>2</sup> ]	Ec. 2-1
$I_{sc}$	Radiación Solar (Constante solar)	[W/m <sup>2</sup> ]	1353
$K$	Factor tasa de secado		Ec. C-8
$k_a$	Conductividad térmica del aire	[W/m K]	Ec. 1-9
$k_0$	Prefactor exponencial		Ec. 1-10
$L_{sc}$	Largo del secador	[m]	Ec. 2-4
$L$	Longitud de la placa-plana	[m]	Ec. 2-1
$M$	Masa de hoja de Yuca	[kg]	Ec. 1-11
$M_0$	Masa total hoja de Yuca	[kg]	Ec. 2-4
$M_i$	Masa inicial	[kg]	
$M_f$	Masa final	[kg]	
$MV$	Material Volátil	[%peso]	ASTM D3175-89
$\dot{m}_x''$	Flujo del fluido de aire	[kg/s m <sup>2</sup> ]	Ec. 2-3
$N$	Nitrógeno	[%peso]	Equipo CHN-600
$O$	Oxígeno	[%peso]	Equipo CHN-600
$Pr$	Número de Prandtl		Ec. 1-12
$PC$	Poder Calorífico	[Cal/g]	ASTM D2015-95
$\dot{q}_u$	Flujo de energía	[W/m <sup>2</sup> ]	Ec. 1-13
$R$	Constante de los gases universal	[J/mol K]	
$Re_{L_{sc}}$	Numero de Reynolds		Ec. 1-14
$R_{corr}$	Correlación de la línea de ajuste		Ec. 1-15, 1-16
$S$	Azufre	[%peso]	ASTM D3177-89
$S$	Brillo solar promedio diario	[h/dia]	Ec. 1-1
$S_0$	Brillo solar promedio diario a la latitud del sitio	[h/dia]	Ec. 1-1
$T_a$	Temperatura ambiente	[K]	Ec. 2-1
$T_c$	Temperatura de la hoja de Yuca	[K]	Ec. 2-4
$T_f$	Temperatura del fluido	[K]	Ec. 2-1
$T_{fin}$	Temperatura del fluido que ingresa	[K]	Ec. 2-4
$T_{fresnel}$	Temperatura del lente fresnel	[K]	Ec. 2-2
$T_p$	Temperatura placa-plana	[K]	Ec. 2-1
$T_{sc}$	Temperatura del secador	[K]	Ec. 2-4
$t$	Tiempo	[s]	Ec. 2-1
$x$	Dimensión x		
$X$	Dimensión X en ecuación de ajuste		Ec. C-17
$\dot{W}$	Potencia	[kW]	Ec. 1-18
$w_{sc}$	Ancho del secador	[m]	Ec. 2-4
$w$	Ancho de la placa	[m]	Ec. 2-1
$\int_0^t \dot{\gamma}_v dt$	Masa de agua en la tasa de secado	[kg]	Ec. 2-4

## Símbolos con letras griegas

Símbolo	Término	Unidad SI	Definición
$\alpha_p$	Coefficiente de absorbitividad del placa		
$\beta_{celda}$	Factor de proporcionalidad celda fotovoltaica y placa-plana		
$\dot{\gamma}_v$	Tasa de secado	[kg/s]	Ec. 2-4
$\dot{\gamma}_v \text{ adsorción}$	Tasa de adsorción	[kg/s]	Ec. 3-19
$\dot{\gamma}_v \text{ desorción}$	Tasa de desorción	[kg/s]	Ec. 3-20
$\dot{\gamma}'''$	Tasa de secado en volumen	[kg/ m <sup>3</sup> s]	Ec. B-21
$\eta_{celda}$	Eficiencia de la celda fotovoltaica	[%]	
$\eta_{termo-fotovoltaico}$	Eficiencia termo-fotovoltaica	[%]	Ec. 1-22
$\pi$	Número Pi		3.14159
$\rho_f$	Densidad del fluido	[kg/m <sup>3</sup> ]	Ec. 2-3
$\rho_p$	Densidad de la placa	[kg/m <sup>3</sup> ]	Ec. 2-1
$\tau_{fresnel}$	Transmisividad de lente fresnel		
$\tau_p$	Transmisividad de la placa-plana		Ec. 2-1
$\omega_s$	Ángulo posición solar	°	Ec. 1-2
$\delta$	Declinación solar	°	Ec. 1-2
$\phi$	Latitud del lugar	°	Ec. 1-2

## Subíndices

Subíndice	Término
<i>celda</i>	Celda fotovoltaica
<i>a</i>	Aíre
<i>c</i>	Hoja de Yuca
<i>fin</i>	Fluido que ingresa
<i>p</i>	Placa-plana
<i>pf</i>	Placa-Plana - fluido
<i>s</i>	Sol
<i>sc</i>	Secador
<i>sc</i>	Constante Solar
<i>Termo – fotovoltaica</i>	Sistema híbrido
<i>Ta</i>	Temperatura ambiente
<i>Tf</i>	Temperatura del fluido
<i>Tfresnel</i>	Temperatura del fresnel
<i>Tp</i>	Temperatura de la placa-plana
<i>v</i>	Volumen
<i>vf</i>	Fluido
<i>z</i>	Cenizas
<i>0</i>	Estado de referencia

## Superíndices

**Superíndice Término**

---

<i>N</i>	Exponente, potencia
<i>ka</i>	Factor de diseño experimental

**Abreviaturas****Abreviatura Término**

---

<i>CLAYUCA</i>	Consortio Latinoamericano y del Caribe de Apoyo a la Investigación y al Desarrollo de la Yuca
<i>CIAT</i>	Centro Internacional de Agricultura Tropical
<i>HMC-1</i>	Variedad de Yuca (ICA Armenia o ICA p-13)
<i>HCN</i>	Ácido cianhídrico o Glucósidos cianogénicos [ppm]
<i>PC</i>	Proteína Cruda [%]

# 1. Introducción

El secado solar de productos agroindustriales ha adquirido una importancia en el mercado de alimentos a escala global, debido a la crisis energética global iniciada desde los años 70 del siglo veinte [1]. Esta crisis global de energía ha llevado a retomar el secado solar agroindustrial que permita preservar y conservar los alimentos para consumo animal o humano [2]. Para lograr un secado solar aceptable en un producto agroindustrial se requiere de un valor de energía promedio alrededor de 2,5 kJ/g de agua evaporada para lograr obtener Contenidos de Humedad (CH) por debajo de 0.20 [3]. A partir del conocimiento de la energía requerida para el secado solar agroindustrial, se necesita realizar una caracterización físico-química del producto agroindustrial a secar para poder elaborar un diseño conceptual de un equipo de secado que opere con energía solar [4].

En el caso particular de la tesis, se quiere realizar el secado solar de hoja de Yuca forrajera (*Manihot esculenta*, Crantz), porque, se constituye en una fuente de proteína primordial de manera natural para las regiones tropicales del mundo [5], ya que, se encontró que la hoja de Yuca forrajera procesada en forma seca es un producto que se puede aprovechar para la alimentación humana y/o animal por su valor proteico (>20% de proteína cruda) [6].

La producción de raíz de Yuca de manera natural a escala mundial se encuentra liderada por los países africanos, asiáticos y latinoamericanos, dentro de los cuales, los países Latinoamericanos relevantes son: Surinam, Panamá, Jamaica, Costa Rica y Colombia. En el caso de Colombia, la producción de raíz de Yuca ocupa el puesto veinte y seis con una producción en campo de 133.6 Ton/Ha para el año 2009 y el puesto veinte en el precio a escala mundial [7]. De esa producción de campo, el departamento de Antioquía aporta el 8,0% de la producción total de Yuca (Raíz y forraje de Yuca) en predios menores a 10 Has [8]. Y dicha producción de Yuca forrajera en el departamento de Antioquía se realiza en Zonas No Interconectadas (ZNI) a la Red Eléctrica Nacional [9].

El consumo energético en Colombia se genera principalmente por las hidroeléctricas que se conectan a la Red Eléctrica Nacional, y en aquellas ZNI se utilizan combustibles fósiles para la generación de energía eléctrica [9]. De ahí, que los combustibles fósiles que no son renovables, el agotamiento de las reservas de combustibles fósiles y la inestabilidad de precios en dichos combustibles [1], sea una oportunidad para retomar el uso de energía solar para la generación de energía eléctrica y térmica para las ZNI [10].

Las variables físicas de la energía solar evaluada en Colombia durante las décadas de los 70 a los 90 del siglo pasado, mostró un potencial de radiación solar promedio de 400 W/m<sup>2</sup> [11], junto a un brillo solar promedio de 5 h día [12]. Para el caso de Antioquia, la radiación solar promedio diaria oscila entre 41,6 W/m<sup>2</sup> a 666,6 W/m<sup>2</sup>; con temperaturas ambiente promedio entre 20,5°C a 29,5 °C, y humedad es relativas diarias entre 40,5% a 99,5% [13]. Bajo estas condiciones hidroclimatológicas se genera energía que puede ser aprovechada para sistemas híbridos termo-fotovoltaicos [10], [14]. Por lo tanto, su eficiencia energética varía de acuerdo a la temporada del año [15], [16], [17]. Además, la humedad relativa afecta el proceso de secado de los productos agroindustriales [14], por lo tanto, el diseño conceptual de un prototipo termo-fotovoltaico requiere de considerar todas las variables mencionadas para garantizar el secado de la hoja de Yuca forrajera.

Los equipos termo-fotovoltaicos permiten generar energía eléctrica y térmica que pueden ser usadas para procesos de secado agroindustrial [18], [19], ya que, en dichos equipos se obtiene ganancia térmica sobre un fluido (por ejemplo aire) por la concentración solar sobre un colector y generación eléctrica en un panel fotovoltaico por la radiación solar [14].

En el diseño de equipos termo-fotovoltaicos es indispensable conocer la radiación solar en el lugar donde se ha de instalar [20], ya que la radiación solar es la fuente de potencia energética para los dispositivos termo-fotovoltaicos, pero al tiempo, el disponer de datos de radiación solar en un lugar depende de las condiciones meteorológicas de las mismas. Entonces, una manera aproximada para calcular la radiación solar de un lugar es utilizando la ecuación paramétrica de Anström-PreScott [17],[20], pero este modelo lineal presenta el inconveniente de no tener en cuenta los efectos de otras variables meteorológicas [20].

La ecuación 1-1 de Anström-PreScott permite predecir la radiación solar global ( $H$ ) [kWh/m<sup>2</sup>/día] en un lugar a partir del índice de claridad. El índice de claridad en la ecuación de Anström-PreScott es el cociente entre brillo solar promedio diario ( $S$ ) [h/día] y el brillo solar promedio diario a la latitud del sitio ( $S_0$ ) [15], [20], [21]

$$\frac{H}{H_0} = A\left(\frac{S}{S_0}\right) + B \quad 1-1$$

La ecuación 1-2 permite calcular la radiación solar promedio diaria extraterrestre ( $H_0$ ).

$$H_0 = \left(\frac{24}{\pi}\right)I_{sc}\left(1 + 0,033\cos\left(\frac{360D}{365}\right)\right)\left(\cos\phi\cos\delta\sin\omega_s + \frac{2\pi\omega_s}{360}\sin\phi\sin\delta\right) \quad 1-2$$

La ecuación 1-3 permite calcular la declinación del sol ( $\delta$ ) en un lugar determinado.

$$\delta = 23,45\sin\left[\frac{360(D + 284)}{365}\right] \quad 1-3$$

La ecuación 1-4 permite calcular el ángulo solar horario ( $\omega_s$ ).

$$\omega_s = \arccos(-\tan(\delta)\tan(\phi)) \quad 1-4$$



La ecuación 1-5 permite calcular el brillo solar promedio diario a la latitud del sitio ( $S_0$ )

$$S_0 = \frac{2}{15} \omega_s \quad 1-5$$

Las ecuaciones 1-2,1-3,1-4 y 1-5 se puede calcular a partir del día del año ( $D$ ) y la latitud del lugar de interés ( $\varphi$ ).

Los parámetros de la ecuación 1-1 de modelo de Anström-PreScott reportado en la literatura para la región del Urabá Antioqueño, municipio de Apartado (Latitud 7°47' N, Longitud -76°38' W y Altitud 23m) en la estación UNIBAN son  $A=0.55$  y  $B = 0,24$ . Estos valores se adoptaron a partir del cálculo promedio aritmético de los parámetros para 10 estaciones meteorológicas utilizando un numero de datos inferior a 2020 [21].

La hoja de Yuca presenta un mejor valor nutricional que la raíz de Yuca [22], ya que, la hoja de Yuca forrajera presenta contenidos de proteína entre un 20% a 25% en base seca. Y en el caso de HCN se ha encontrado que su contenido es de 100 mg HCN/100g de hoja de Yuca Seca no se considera tóxico para el consumo animal o humano (Valor de referencia de 250mg HCN/100g de hoja de Yuca Seca) [23], [24]. Esta propiedad de la Yuca forrajera hace que se convierta en producto promisorio para la alimentación animal y humana [5].

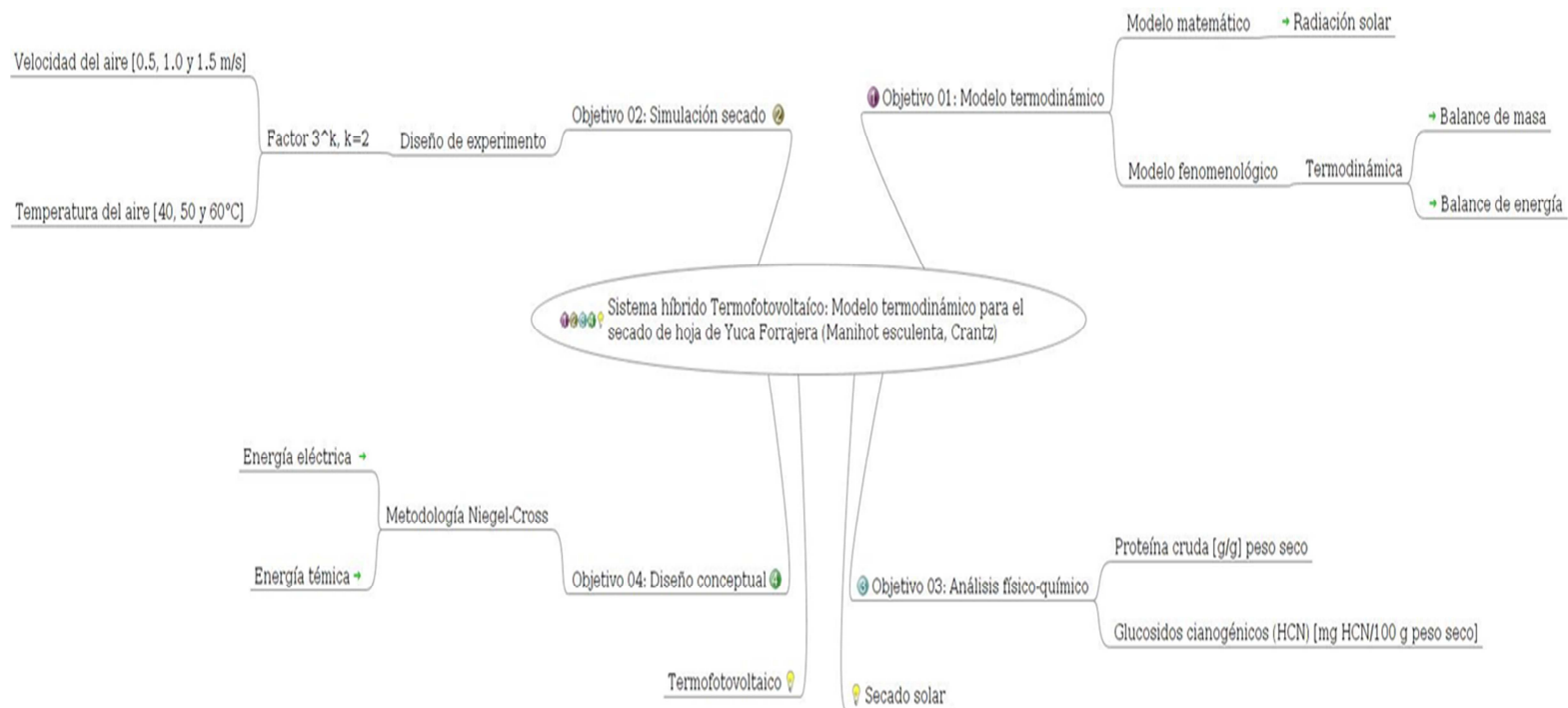
A partir de la descripción anterior, se formula la pregunta ¿Es posible secar hoja de Yuca forrajera de manera sostenible a través de un equipo que opere con energía solar? Ya que, se utiliza métodos de secado artificial que operan con diferentes fuentes de energía: carbón, petróleo y/o eléctrica [5]. Por tal razón, responder a esa pregunta, se propone la presente investigación desarrollar un modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca forrajera (Manihot esculenta, Crantz) mediante un sistema híbrido termo fotovoltaico que permita la evaluación la viabilidad técnica y genere datos para el escalamiento de equipos en el nivel industrial. La metodología está construida a partir de los objetivos propuestos en la investigación, Figura 1. El primer objetivo que es plantear las ecuaciones básicas y complementarias para predecir numéricamente el secado de hoja de Yuca forrajera (Manihot esculenta, Crantz). utilizando la teoría sistémica [25], leyes de formación [26] y la fenomenología [27]. Esas ecuaciones se construirán con información de curvas de secado, las cuales se elaboran con las normas de la ASHRAE A23 SI, A34 SI, F11 SI, F14 SI [28] y las normas de la ASABE S358,2 y S448,1 [29].

El segundo objetivo que es simular el proceso de secado bajo diferentes condiciones físicas. Se realizó como un experimento controlado en el túnel de secado de Operaciones Unitaria en el M7 y en el laboratorio de ciencias de la energía. El experimento cuenta con variables de control como son la temperatura y el flujo de aire, y variables de respuesta como son temperatura y humedad relativa, al igual que la pérdida de peso de la yuca forrajera fresca y seca. Con esta información se procede a construir un modelo termodinámico que permite encontrar la cinética del material (tasa de secado) que permiten describir el secado de la hoja de la yuca forrajera. En el modelo termodinámico

intervienen: las propiedades psicométricas del aire y la pérdida de peso de la yuca forrajera.

El tercer objetivo es analizar del comportamiento físico-químico de la hoja de Yuca forrajera durante el secado en equipo experimental, se realizará por medio de las normas 954.1 para proteína cruda [30] y 915.03 para determinación de HCN [31]. Estas pruebas se realizaron en el laboratorio de CLAYUCA, CIAT.

Y el cuarto objetivo es proponer un diseño híbrido termo-fotovoltaicos para el secado de hoja de yuca forrajera se hará por medio las norma propuesta por la ASTM G173-03 (Tablas del espectro solar) [32], la norma ASHRAE A33 SI (Términos de uso de energía solar) y S33 SI (Hornos) [28], la metodología de diseño conceptual de Nigel-Cross [33], Anexo A, y los procedimiento de diseño de los libros de energía solar [10-14], [16], [33], [34]. Con esta información se procedió a calcular los requerimientos de energía solar como son: la radiación solar, el brillo solar, la temperatura y la humedad relativa para la región yuquera del departamento de Antioquia (Urabá Antioqueño) [8] para diseñar el prototipo híbrido termo-fotovoltaico para el secado del a hoja de yuca forrajera.



**Figura 1. Mapa conceptual de la Investigación**



## **2. Modelo del sistema híbrido termo-fotovoltaico para el secado de hoja de Yuca**

### **2.1 Pruebas experimentales de la hoja de Yuca**

#### **2.1.1 Secado en el túnel de viento**

El secado es un proceso continuo que ocasiona en los productos agrícolas cambios en el contenido de humedad, el aire que está en contacto con el producto, la temperatura que tiene el producto agrícola y la humedad del aire, los cuales, ocurren todos al mismo tiempo [4]. Este proceso se realiza con calor, el cual, puede proceder de cualquier fuente energética de diferentes modos de transferencia de calor. Una de las maneras de lograr un proceso de secado es controlando condiciones del medio que realiza el secado, por ejemplo el aire que circula en equipo como el túnel de secado, de ahí, se busca aumentar la temperatura superficial de producto agrícola en forma de la transferencia de masa que utiliza el calor latente de vaporización [4], [36]–[41].

Se tomaron muestras de peciolo con hoja de yuca forrajera de la variedad HMC-1 de CLAYUCA-CIAT, Palmira, Valle del Cauca, Colombia. Las muestras de yuca forrajera se refrigeraron utilizando las normas ASRHAE F01\_11SI y R02\_09SI [28]. El forraje de yuca se montó en una canastilla dentro de un túnel de viento, Figura 2. La muestra de yuca forrajera se introdujo en la canastilla sin transformar la hoja,. El fenómeno de secado de la hoja de yuca se construyó a través de un modelo físico simplificado que involucra las velocidades, temperaturas y humedades relativas del aire, al igual, que la pérdida de humedad de la hoja de yuca.



a)



b)

**Figura 2. a)Equipo túnel de viento y b) Instrumentos de medición**



**Figura 3. Hoja típica de yuca forrajera HMC-1.**

El secado de yuca forrajera se realiza en esta investigación por convección forzada por medio de un túnel de viento del laboratorio de operaciones unitarias (M7) de la facultad de Minas de la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín. El equipo túnel de viento está conformado por un ventilador (2.3kWh) y cinco resistencias eléctricas (1kWhc/u). El equipo esta instrumentalizado con una balanza gravimétrica, higrómetros y termómetros. Además, se instrumentalizo para medir el flujo de aire en el túnel a través de un anemómetro de aspas. El ventilador opera a 1800rpm y el flujo volumétrico 0.05 a 0.22m<sup>3</sup>/s, el flujo se controla manualmente a través de una válvula mariposa. El ventilador está ubicado antes de las resistencias eléctricas con el fin de inyectar aire seco sobre la canastilla. La humedad relativa obtenida en todas las pruebas estuvo entre 10 a 30% respecto a la temperatura de operación.

El túnel posee las siguientes dimensiones internas de la sección transversal del túnel son 0.22m x 0.30 m (ancho y alto). La canastilla tiene las dimensiones de 0.125m x 0.110m x 0.020m (Ancho, largo y alto) y su material es de polietileno. La sección transversal de la canastilla que recibe el aire inyectado por el ventilador tiene un área de 0.0022m<sup>2</sup>. En cada canastilla se realizaron pruebas a tres temperaturas 40, 50 y 60°C y tres

Yuca

velocidades 0.5, 1.0 y 1.5m/s para el aire inyectado hacia la canastilla en el túnel de viento. El contenido de humedad se calculó por medio de la pérdida de humedad de la yuca forrajera en la canastilla dentro del túnel de viento que operaba a diferentes condiciones de prueba. El registro se realizó con una balanza gravimétrica. La operación se paraba cuando después de un lapso de tiempo de 30min se mantenía el mismo peso de la yuca forrajera dentro de la canastilla. El contenido de humedad se expresa en décimas. En todas las pruebas se registró la presión atmosférica, el contenido de humedad y la temperatura del aire. Los valores respectivos fueron: 0.9atm, el contenido de humedad entre 49 a 60% y temperatura  $25^{\circ}\text{C} \pm 3$ .

**2.1.2 Pruebas en la termo-balanza-gravimétrica**

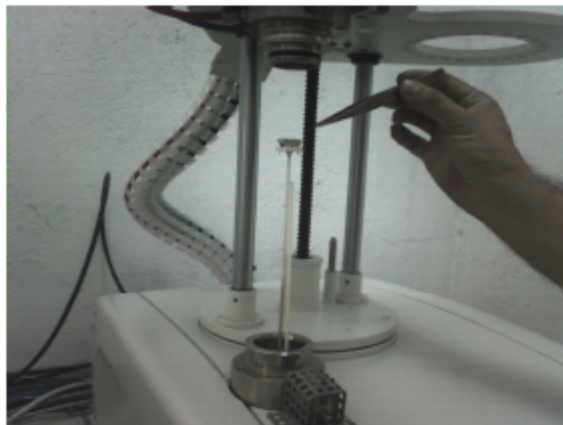
En la Figura 4 se ilustra el micro molino y la termo balanza gravimétrica con los cuales se realizó el cálculo de la medida de la cinética del material (tasa de secado) de la hoja de Yuca forrajera se realizó en la termo-balanza-gravimétrica. Se utilizó las mismas temperaturas del túnel de viento, 40, 50 y 60°C. La velocidad de flujo se escaló en un factor de 10, debido a que la termo-balanza-gravimétrica sólo puede suministrar un flujo de gases de 200cm<sup>3</sup>/min, el cual equivale a una velocidad de 0.02m/s, esta velocidad esta 100 veces por debajo de las utilizadas en el túnel de viento, 0.5, 1.0 y 1.5m/s. Por tal razón, se decidió utilizar flujo de gas de 50, 100 y 150cm<sup>3</sup>/min, con el fin de mantener un escalado conveniente. Respecto a los cinética del material (tasa de secado) no se definen por la velocidad del flujo y la temperatura, sino, la cinética del material (tasa de secado) es definido por la densidad de flujo másico al interior del material, como el delta de humedad y delta de presiones sobre el material [46].



a)



b)



c)

**Figura 4. Equipo a)micro molino y b,c)termo balanza gravimétrica.**

La preparación del ensayo se realizó escalando las condiciones de flujo de aire a través de la muestra con un peso de 25mg, tamizada en una malla de  $250\ \mu\text{m}$ , se tuvo en cuenta las mismas temperaturas y contenido de humedad relativa del aire del túnel de viento para el proceso de adsorción en la TGA. La prueba se realizó a diferentes temperaturas: 40, 50 y  $60^\circ\text{C}$ , con diferentes velocidad ad de 0.5, 1.0 y  $1.5\text{E-}003\text{m/s}$  y un contenido de humedad relativa del aire del 20% del flujo de aire enriquecido con vapor de agua. Valores inferiores al 20% de humedad relativa del aire es un criterio de referencia para conservar el material orgánico en un ambiente controlado [4].

### **2.1.3 Análisis próximo y elemental**

En el análisis próximo y elemental se realizó con la hoja de la Yuca forrajera secada al horno a  $105^\circ\text{C}$  durante 24h. Se tomaron tres muestras de yuca, a las cuales se les determino la proporción de hoja y peciolo, Figura 5, y luego se molió en un molino, MF10 Basic IKA® a 3500 rpm. La yuca forrajera molida se mezcló y se tamizó a un tamaño de  $250\ \mu\text{m}$ .



**Figura 5. Proporción de hoja y peciolo seco en estufa a  $105^\circ\text{C}$**



La prueba de análisis elemental de la hoja yuca forrajera se realizó con muestras de 1500  $\mu$ g en un cápsula de titanio que se sellaría posteriormente; estas muestras corresponde a una población de hojas de Yuca que fueron secadas en horno a 105°C durante 24h. Se tomaron tres muestras de la población y se mezclaron obteniéndose una muestra que representara la población a evaluar. La cápsula se monta en el equipo AE (CE-440 Elemental analyzer), se somete a un flujo de Oxígeno y Helio. El flujo de ingresa a 20 psi (0.14 MPa). El equipo utiliza muestras de referencia para verificar la calibración. La prueba se realizó a 850°C para la combustión y 650° para la reducción, esto con el fin de obtener gases de Dióxido de Carbono y Nitrógeno gaseoso y vapor de agua. Los resultados obtenidos se expresan en unidades de %peso, Tabla 1.

El análisis próximo se realizó en el laboratorio de Carbones de la Universidad Nacional, bajo el procedimiento descripto por las normas ASTM, Tabla 1.

**Tabla 1. Pruebas de análisis próximo y elemental**

Análisis	Determinación	Unidad	Norma	Observaciones
<b>Análisis próximo completo</b>	Humedad residual (HR)	% peso	ASTM D3173-87 (reprobada en 92)	Método gravimétrico
	Cenizas (Cz)		ASTM D3174-93	Método gravimétrico
	Materia volátil (MV)		ASTM D3175-89 (reprobada en 93)	Método gravimétrico
	Carbono Fijo (CF)		ASTM D3172-89	Deducido por diferencia
	Azufre (S)		ASTM D3177-89	Analizador de azufre SC-132
	Poder Calorífico (PC)	Cal/g	ASTM D2015-95	Bomba Calorimétrica marca Parr
<b>Análisis elemental</b>	C, H, N, O	% peso		Equipo CHN-600

**2.1.4 Pruebas de proteína cruda y HCN**

Las pruebas experimentales se llevaron a cabo bajo diferentes condiciones físicas. Estas se realizaron como un experimento controlado en el túnel de secado de Operaciones Unitaria en el M7. En el ensayo experimental se utilizó yuca forrajera sin trozar, eso significa que se utilizó yuca con hoja y peciolo. El experimento cuenta con variables de control como son la temperatura y el flujo de aire, y variables de respuesta como son temperatura y humedad relativa, al igual que la pérdida de peso de la yuca forrajera

fresca. Con esta información se procedió a construir un modelo termodinámico que permite encontrar los coeficientes de transferencia de calor que permiten describir el secado de la hoja de la yuca forrajera. En el modelo termodinámico intervienen: las propiedades psicométricas del aire y la pérdida de peso de la yuca forrajera. Además, se construyeron curvas de absorción y desorción de la yuca forrajera para encontrar su cinética intrínseca, esta prueba se realizó en la TGA (termo balanza gravimétrica) del laboratorio de Ciencias de la Energía.

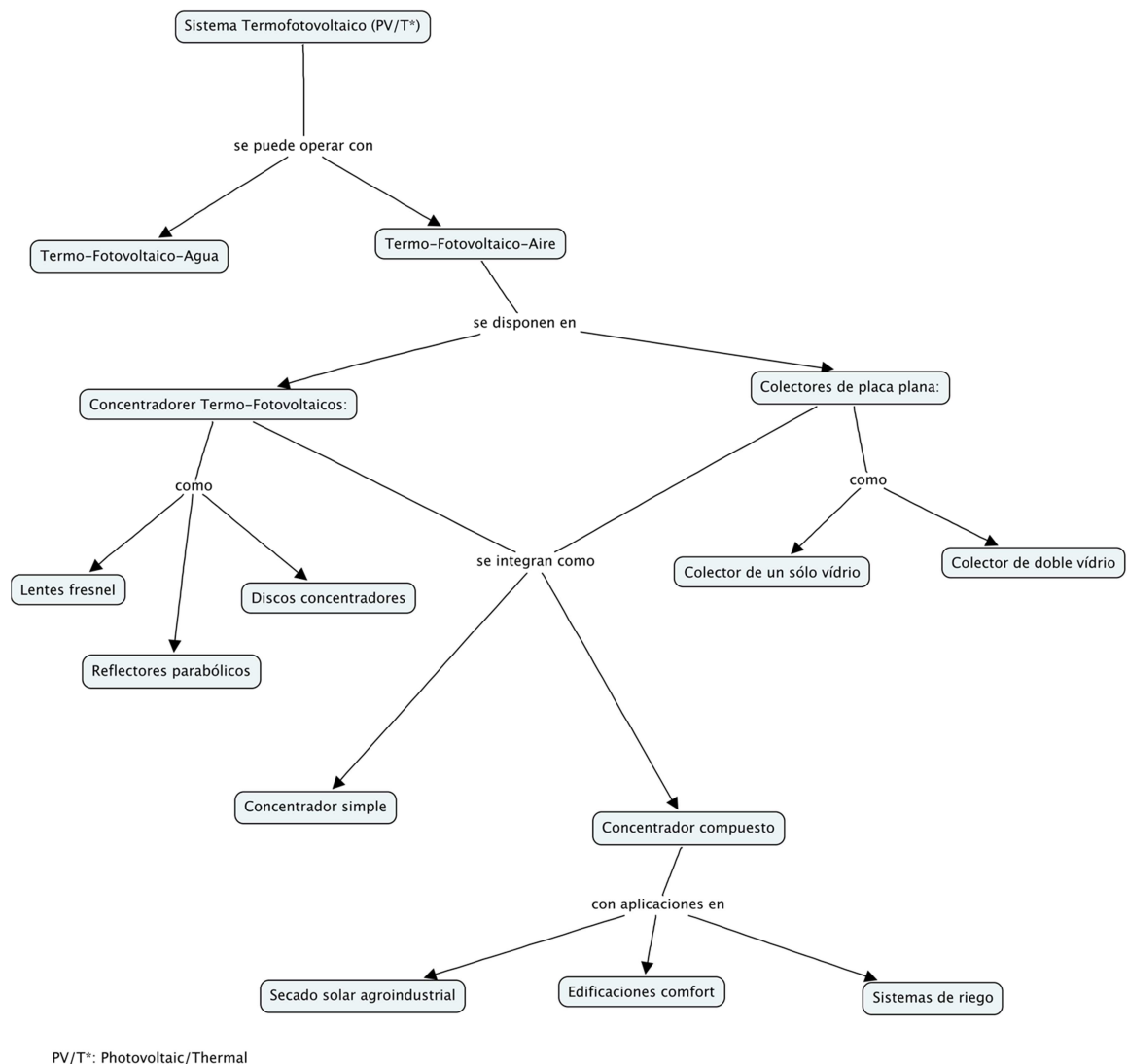
Se realizaron pruebas de análisis fisicoquímico como: análisis próximo, elemental, proteína cruda y contenido de ácido cianhídrico para analizar el efecto del comportamiento del secado en la hoja de yuca utilizando las normas 954.1 para proteína cruda y 915.03 para determinación de HCN [30].

## 2.2 Modelo híbrido termo-fotovoltaico

Los modelos híbrido termo-fotovoltaico que se utilizan para procesos industriales y agroindustriales se configuran de acuerdo a diferente geometrías, materiales y elementos ópticos que facilitan aprovechar la energía térmica y eléctrica de manera simultánea [10-19], [34], [41–43]. Al utilizar un fluido como el aire se logra aprovechar la energía térmica generada en el colector (placa-plana y termo-fotovoltaico) para procesos de secado agroindustrial y aprovechar la energía eléctrica para generar un flujo aire forzado [18], [38], [39], [42], [45]–[56]. En la Figura 6 se observa el mapa conceptual que caracteriza los sistemas híbridos termo-fotovoltaicos.

La literatura reporta diferentes equipos de secado [17], [18], [49] y [60] esos equipos utilizan la energía solar como fuente de energía térmica y eléctrica para el proceso de secado agroindustrial, estos equipos mostraron que el flujo de aire no afectaba de manera significativa la temperatura del secado, su efecto se manifestaba por el área del colector solar [18].

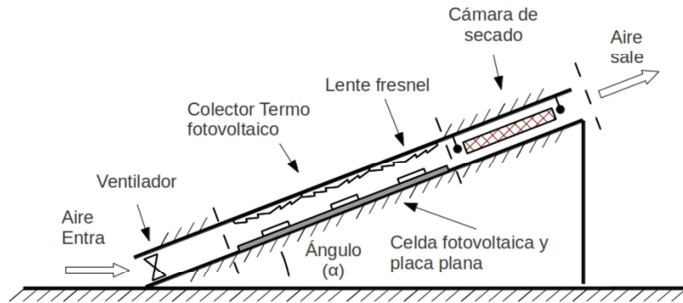
En el Anexo A, se ilustra la metodología empleada para el diseño conceptual del sistema híbrido termo-fotovoltaico. La metodología permitió diseñar un sistema similar al reportado en la literatura para el secado agroindustrial [10], [42], [56]. La Figura 26 se observa el diseño conceptual del sistema híbrido termo-fotovoltaico que se compone de una placa termo solar, un ventilador, un panel fotovoltaico y una cámara de secado.



**Figura 6. Mapa conceptual de sistemas híbridos termo fotovoltaicos.**

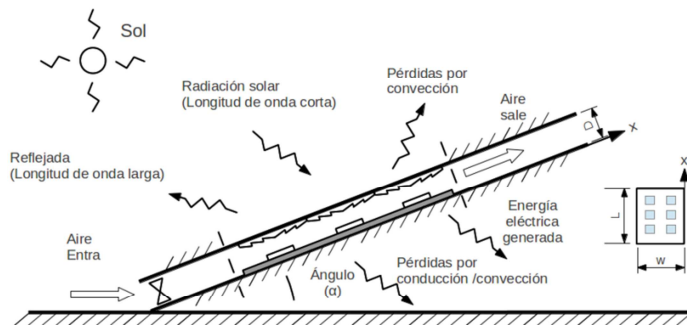
Los sistemas termo-fotovoltaicos pueden modelarse con diferentes fluidos y en diferentes configuraciones geométricas. Estos sistemas se pueden modelar utilizando la fenomenología para describir las ecuaciones gobernantes de masa y energía en el sistema para un proceso definido, que en nuestros casos corresponde al secado de hoja de Yuca.

El fenómeno de balance de energía en el sistema híbrido termo-fotovoltaico se realizó un modelo físico simplificado que involucra las velocidades, temperaturas y humedades relativas del aire, la radiación solar, la temperatura de la celda, la corriente y el voltaje de la celda, Figura 7.



**Figura 7. Modelo del sistema híbrido termo-fotovoltaico.**

Las ecuaciones gobernantes para el sistema híbrido termo-fotovoltaico considera como variables: la velocidad y temperatura del aire, la radiación solar, la geometría del diseño y parámetros de transferencia de calor de los materiales y fluido [19], [41–43]. En la Figura 8 se ilustra el sistema donde se realiza el balance de energía entre la placa-plana y el termo-fotovoltaico.



**Figura 8. Balance de energía sobre el sistema placa-plana y termo-fotovoltaico.**

Ecuación de balance de energía en el sistema termo-fotovoltaico (placa-plana):

$$\rho_p e_p w C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} dx = (1 - \alpha_p \tau_p) I(t) w dx - (1 - \alpha_p \tau_p) \eta_{celda} \beta_{celda} I(t) w dx - h_{Tp} (T_p - T_a) w dx - h_{pf} (T_p - T_f) w dx \quad 2-1$$

Yuca

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Almacenamiento de energía} \\ \text{en el sistema} \\ \text{termo - fotovoltaico} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de energía} \\ \text{por radiación solar} \\ \text{placa - plana} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de energía} \\ \text{eléctrica desde la celda} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de energía} \\ \text{por convección} \\ \text{placa - plana ambiente} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de energía} \\ \text{por convección} \\ \text{placa - plana fluido} \end{array} \right]$$

La ecuación 2-1 muestra  $\rho_p$  que corresponde a la densidad de la placa [kg/m<sup>3</sup>],  $e_p$  el espesor de la placa [m],  $C_p$  es el calor específico en la placa [J/kg K],  $\frac{\partial T_p}{\partial t}$  es el diferencial de temperatura que se da en el tiempo. El coeficiente de absorbitividad del placa  $\alpha_p$ , la transmisividad de la placa  $\tau_p$ , la radiación solar del lugar  $I(t)$  [W/m<sup>2</sup>], el ancho de la placa  $w$  [m], el diferencial de longitud  $dx$  a lo largo de la placa-plana  $L$ . La generación eléctrica tiene en cuenta la eficiencia de la celda fotovoltaica  $\eta_{celda}$  y un factor de proporcionalidad celda fotovoltaica y placa-plana  $\beta_{celda}$ . El coeficiente de transferencia de calor por convección local desde la placa-plana hacia el medio ambiente  $h_{Tp}$  [W/m<sup>2</sup> K], temperatura de la placa-plana  $T_p$  [K], la temperatura del ambiente  $T_a$  [K]. El coeficiente de transferencia de calor por convección local desde la placa-plana hacia el fluido  $h_{pf}$  [W/m<sup>2</sup> K], temperatura del fluido  $T_f$  [K].

Ecuación de balance de energía en el sistema termo-fotovoltaico (lente-fresnel):

$$\rho_{fresnel} e_{fresnel} w C_{fresnel} \frac{\partial T_{fresnel}}{\partial t} dx = \tau_{fresnel} I(t) w dx - h_{Tfresnel} (T_{fresnel} - T_a) w dx \quad 2-2$$

$$\left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de energía} \\ \text{en el sistema} \\ \text{termo - fotovoltaico} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de energía} \\ \text{por radiación} \\ \text{lente fresnel} \end{array} \right] - \left[ \begin{array}{c} \text{Flujo de energía} \\ \text{por convección} \\ \text{lente fresnel} \end{array} \right]$$

La ecuación 2-2 ilustra  $C_{fresnel}$  es el calor específico en el fresnel [J/kg K],  $e_{fresnel}$  el espesor del lente fresnel [m],  $\frac{\partial T_{fresnel}}{\partial t}$  es el diferencial de temperatura que se da en el tiempo. El coeficiente de transmisividad del lente fresnel  $\tau_{fresnel}$ . El coeficiente de transferencia de calor por convección local desde el lente fresnel hacia el medio ambiente  $h_{Tfresnel}$  [W/m<sup>2</sup> K], temperatura del lente fresnel  $T_{fresnel}$  [K].

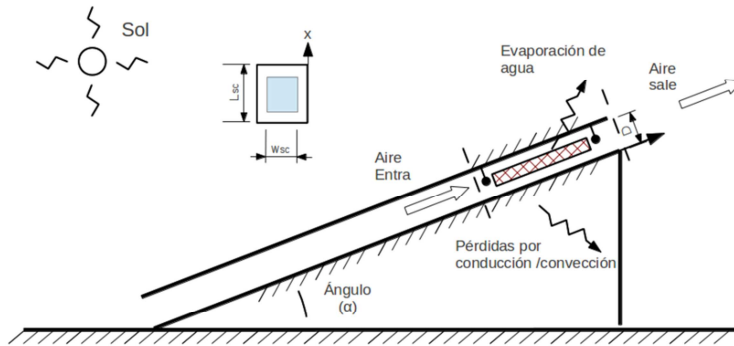
Ecuación de balance de energía el flujo de aire en la placa-plana y lente fresnel:

$$h_{pf} (T_p - T_f) w dx = \dot{m}_x'' C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial x} D w dx + h_{Tfresnel} (T_{fresnel} - T_a) w dx + \rho_f C_{vf} D w \frac{\partial T_f}{\partial t} dx \quad 2-3$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por convección} \\ \text{placa - plana} \\ \text{fluido} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por efecto de flujo másico} \\ \text{del fluido} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por convección desde} \\ \text{lente fresnel hacia el fluido} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por el calor} \\ \text{específico del fluido} \end{array} \right]$$

En la ecuación 2-3 se muestra el flujo del fluido de aire  $\dot{m}_x''$  [kg/s m<sup>2</sup>], calor específico a presión constante del fluido  $C_{pf}$  [J/kg K], diferencial de temperatura en el espacio para el fluido  $\frac{\partial T_f}{\partial x}$  y el espesor del sistema híbrido termo-fotovoltaico  $D$  [m]. Esta distancia se define de acuerdo a la concentración que existe de parte de los lentes fresnel [57]. Densidad del fluido  $\rho_f$  [kg/m<sup>3</sup>] y calor específico del fluido  $C_{vf}$  [J/kg K].

En la Figura 9 se ilustra el sistema donde se realiza el balance de energía en el secador:



**Figura 9. Balance de energía el secador.**

Ecuación de balance de energía en el secador:

$$h_f w_{sc} L_{sc} (T_{fin} - T_c) = (M_0 - \int_0^t \dot{\gamma}_v dt) C_c \frac{dT_c}{dt} + h w_{sc} L_{sc} (T_c - T_{sc}) + \dot{\gamma}_v h_v \quad 2-4$$

$$\left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por el fluido} \\ \text{en la cámara de secado} \end{array} \right] = \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por parte de la masa} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por convección de} \\ \text{la cámara de secado} \end{array} \right] + \left[ \begin{array}{l} \text{Flujo de energía} \\ \text{por adsorción} \\ \text{o desorción} \end{array} \right]$$

En la ecuación 2-4 se muestra el coeficiente de transferencia de calor del flujo de aire  $h_f$  [W/m<sup>2</sup> K], temperatura que ingresa  $T_{fin}$  de la cámara de secado [K]. Cantidad de masa  $M_0$  [kg], calor específico de la masa seca  $C_c$  [J/kg K], diferencial de temperatura en el tiempo de la masa a secar  $\frac{\partial T_c}{\partial t}$ . Coeficiente de transferencia de calor del secador  $h$  [W/m<sup>2</sup> K], temperatura de la masa a secar  $T_c$  y temperatura del secador  $T_{sc}$  [K], ancho  $w_{sc}$  y largo  $L_{sc}$  del secador [m]. Tasa de secado  $\dot{\gamma}_v$  (cinética [kg/s]) de la masa a secar, la entalpia de evaporación  $h_v$  [J/kg].

Yuca

La transferencia de calor del flujo de aire  $h_f$  se puede calcular suponiendo un flujo externo alrededor de la hoja de yuca al interior de la cámara de secado. El flujo de aire que pasa a través de la hoja de yuca se puede asumir como flujo calor constante, estado estable y flujo incompresible. De acuerdo a las asunciones se puede encontrar la transferencia de calor  $h_f = \overline{h_f}$  por una correlación entre los números de Nusselt  $N_{ULsc}$ , Reynolds  $Re_{Lsc}$  y Prandtl  $Pr$  por medio de la ecuación 2-5 [58]

$$\overline{N_{ULsc}} = \frac{L_{sc} \overline{h_f}}{k_a} = 0.453 Re_{Lsc}^{1/2} Pr^{1/3} \quad Pr \geq 0.6 \quad 2-5$$

La tasa de secado  $\dot{\gamma}_v$  secado se puede calcular utilizando la ecuación de Arrhenius mediante la ecuación 2-6. La ecuación de Arrhenius se calculó por medio de los resultados de la termo-balanza-gravimétrica utilizando los valores derivados de la masa y la temperatura en la región del creciente y decreciente de sorción respecto al inverso de la temperatura [59]–[61]. El signo de la ecuación define si es adsorción (positivo) o desorción (negativo) en la ecuación 2-4. En el Anexo B se describe el desarrollo de la ecuación 2-6.

$$\dot{\gamma}_v = \pm M_0 e^{\pm k_0 e^{(-\frac{Ea}{RT_c})t}} k_0 e^{(-\frac{Ea}{RT_c})} \quad 2-6$$

La ecuación de Arrhenius se puede utilizar para calcular la difusividad de la masa de hoja de Yuca para la difusividad de un líquido  $D_L$  [m<sup>2</sup>/s] y el factor pre-exponencial  $D_{L0}$  sobre una placa considerando una dimensión vertical de la placa [59]. La literatura reporta valores un rango de valores entre 10<sup>-13</sup> y 10<sup>-9</sup> para los pre-factores de la ecuación de Arrhenius en materiales orgánicos utilizando la ecuación de Arrhenius modificada 2-7.

$$D_L = D_{L0} e^{(-\frac{Ea}{RT_c})} \quad 2-7$$

### 2.3 Consideraciones al modelo

Las consideraciones para simular el modelo para el secado de la hoja de Yuca se basa en las condiciones climatológicas para la región de Mutata, Antioquia (Latitud 7.245, Longitud 76.435 y Altitud 130m). En la Tabla 2 se especifica la radiación solar y brillo solar promedio para la región de 5.60 kWh/m<sup>2</sup>/día y 4.46h/día [13]. Esta información corresponde a 22 años de medición diaria. Se utilizó la información de la Tabla 2 para encontrar la ecuación 1-1 de Anström-Prescott, A=0.40 y B = 0,64. Se observa que en los meses Mayo, Junio, Julio, Agosto, Octubre y Noviembre el brillo solar es inferior a 4h/día promedio, esto significa que la disponibilidad directa de radiación se verá afectada durante esta época del año para procesos de secado. La yuca se siembra en fechas de

inicio de lluvias (Finales de Abril, Mayo y Octubre y Noviembre) [8], lo que facilitaría su proceso de secado durante la fecha de Septiembre, Diciembre a Marzo.

**Tabla 2. Datos de Radiación solar (H) y Brillo solar (S) Mutata, Antioquia.**

Mes	H [kWh/m <sup>2</sup> /dia]	S [h/dia]	S/S0	H/H0
Ene	5,85	6,05	0,513	0,759
Feb	6,50	6,95	0,599	0,908
Mar	6,85	7,21	0,586	0,945
Abr	6,20	4,75	0,383	0,896
May	5,64	3,63	0,308	0,775
Jun	4,99	2,58	0,222	0,738
Jul	5,20	2,59	0,216	0,708
Ago	5,56	3,03	0,246	0,785
Sep	5,97	4,20	0,336	0,865
Oct	5,46	3,83	0,325	0,721
Nov	4,83	3,59	0,309	0,672
Dic	5,21	5,17	0,434	0,668
Anual	5,69	4,46	0,373	0,785

La trayectoria solar influye en la decisión del momento de instalar el sistema híbrido termo-fotovoltaico, es por tal razón, importante verificar el ángulo de inclinación fijo  $\alpha$  [°] que dispondrá el sistema híbrido termo-fotovoltaico. El ángulo posible de operación para el sistema híbrido termo-fotovoltaico es de  $\alpha = 13^\circ$  [60].

Antes de desarrollar el modelo se puede calcular la potencia  $\dot{W}$  [kW] para un sistema híbrido termo-fotovoltaico reportado en la literatura [50] de un ángulo de inclinación fija ( $\alpha$ ), el cual desaprovecha la energía potencial del Sol en forma de radiación debido a la trayectoria del sol [62]. La ecuación 2-8 (Nota: el valor de 2500 kJ/kg corresponde a la energía específica para el agua), permite calcular la potencia del sistema híbrido considerando la tasa de secado del material  $M$  [kg] [50]



Yuca

---

$$\dot{W} = \frac{M}{60 \times 60} \times 2500 \tag{2-8}$$

Y un la eficiencia de un sistema termo-fotovoltaico ( $\eta_{termo-fotovoltaico}$ ) se puede calcular con la ecuación 2-9 [63]

$$\eta_{termo-fotovoltaico} = 0.83 - 6.5 \frac{T_p - T_a}{I(t)} \tag{2-9}$$

Entonces, se puede calcular la energía por unidad de área  $\dot{q}_u$  [W/m<sup>2</sup>] utilizando la ecuación 2-10

$$\dot{q}_u = \eta_{termo-fotovoltaico} I(t) \tag{2-10}$$

Con la potencia  $\dot{W}$  [kW] y la energía la energía por unidad de área  $\dot{q}_u$  [W/m<sup>2</sup>] se obtiene el área del sistema híbrido termo-fotovoltaico  $A_c$  [m<sup>2</sup>], ecuación 2-11.

$$A_c = \frac{\dot{W}}{\dot{q}_u} \tag{2-11}$$

### 2.4 Simulación del proceso de secado

El modelo termodinámico para el secado corresponde a las ecuaciones 2-4 y 2-6 que dependen del tiempo. Este modelo se simulo para unas condiciones asumidas con el fin de encontrar la tasa de calentamiento de la hoja de Yuca  $T_c$  en el tiempo. Y busco que el cambio de temperatura de la hoja de Yuca en el tiempo permanezca constante, eso significa resolver la ecuación diferencial teniendo en cuenta que  $\frac{\partial T_c}{\partial t} = 0$ .

La simulación del proceso de secado ecuación 2-4 requiere del cálculo de la tasa de secado que se ilustra en la ecuación 2-3, por lo tanto, se realizó un ensayo experimental tipo factorial 3<sup>ka</sup> [68] para el túnel de viento (ka: Hace referencia a las variables controlables de velocidad y temperatura del flujo), con esta información se procedió a construir el ensayo experimental en la termo-balanza-gravimétrica teniendo en cuenta las variables de temperatura para describir la curvas de sorción a un contenido de humedad relativa fija [59]–[61]. Esta información permitió construir la ecuación de sorción 2-6.

La solución numérica se realizó para las ecuaciones 2-4 y 2-6 se realizó por medio de las ode's que dispone MATLAB® 2007 (método Runge-Kutta). En esta solución numérica se consideraron diferentes condiciones iniciales para los diferentes parámetros de las ecuaciones 2-4 y 2-6 [44], [50], esto con el fin, de encontrar la tasa de calentamiento y la tasa de secado de la hoja de Yuca.



## **3.Resultados**

### **3.1 Pruebas experimentales de la hoja de Yuca**

#### **3.1.1 Secado en el túnel de viento**

En la Figura 10 se observa las curvas de secado de la hoja de yuca, se observa en las temperaturas de 40 y 50°C no hay diferencia en el contenido de humedad en tiempo, lo que si sucede a una temperatura de 60°C para la velocidades de 0.5 y 1.5m/s. En cambio, se ilustra que para todas las temperaturas (40, 50 y 60°C) y una misma velocidad (1.5m/s) no se observa diferencia en el contenido de humedad en el tiempo. Además, se aprecia que a una temperatura de 60°C y a unas velocidades de 0.5 y 1.0m/s se obtiene un tiempo de secado inferior que a temperaturas de 40 y 50°C.

En la Figura 11 se ilustra que las tasas de secado para la hoja de yuca a diferentes temperaturas y velocidades decrecen hasta obtenerse un valor constante a medida que el tiempo crece. Esto permite inferir que las tasas de secado se mantienen cercanas a cero en la medida que la hoja de Yuca pierde agua. También, se aprecia que en la medida que se incrementa la temperatura la tasa de secado disminuye y el tiempo disminuye por efecto del incremento de temperatura y velocidad.

El proceso de simulación utilizó la información de las curvas y la tasa de secado de la hoja de yuca experimentada en el túnel de viento. En estas curvas se observa que el mayor tiempo de secado, alrededor de 7h, se obtiene para una temperatura de 40°C y una velocidad de 0.5m/s y un tiempo de 4h para una temperatura de 60°C a una velocidad de 0.5m/s.

En la Figura 12, se ilustra las tasas de secado para diferentes contenidos de humedad, se aprecia que a medida que la temperatura se incrementa, la tasa de secado se incrementa para la temperatura de 60°C que para las otras temperaturas. Además, se observa que la tasa de secado aumenta debido al efecto de velocidad cuando opera a una velocidad de 1.5m/s.

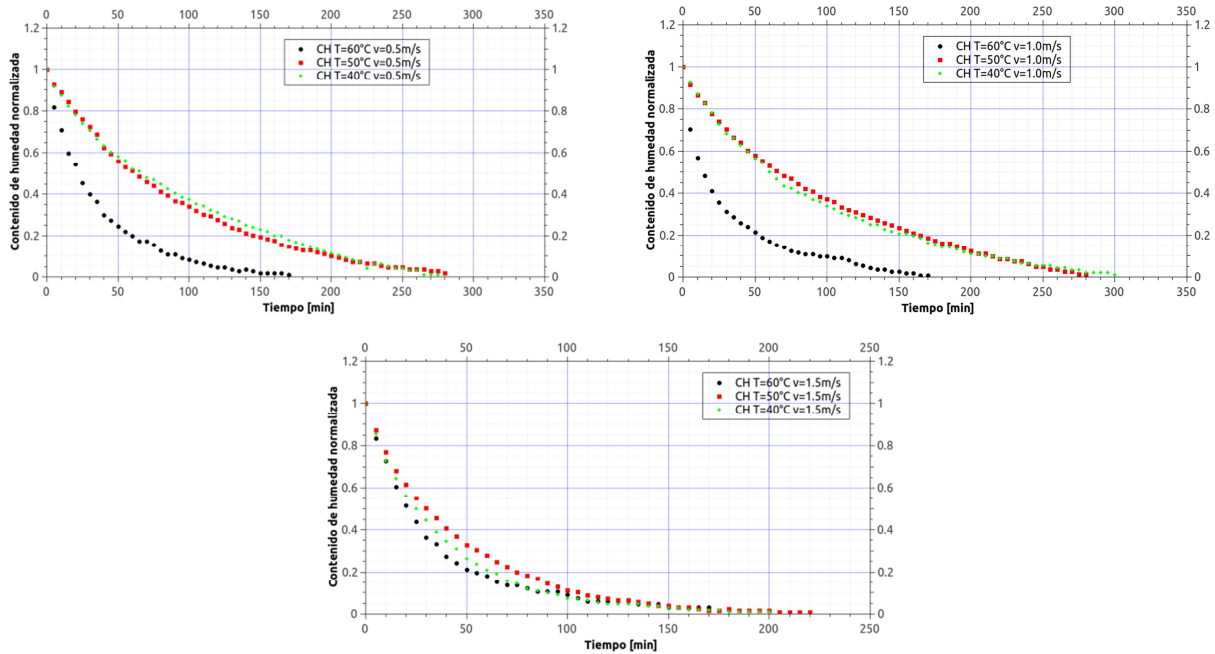


Figura 10. Curva de secado a diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s) y temperaturas (40, 50 y 60°C).

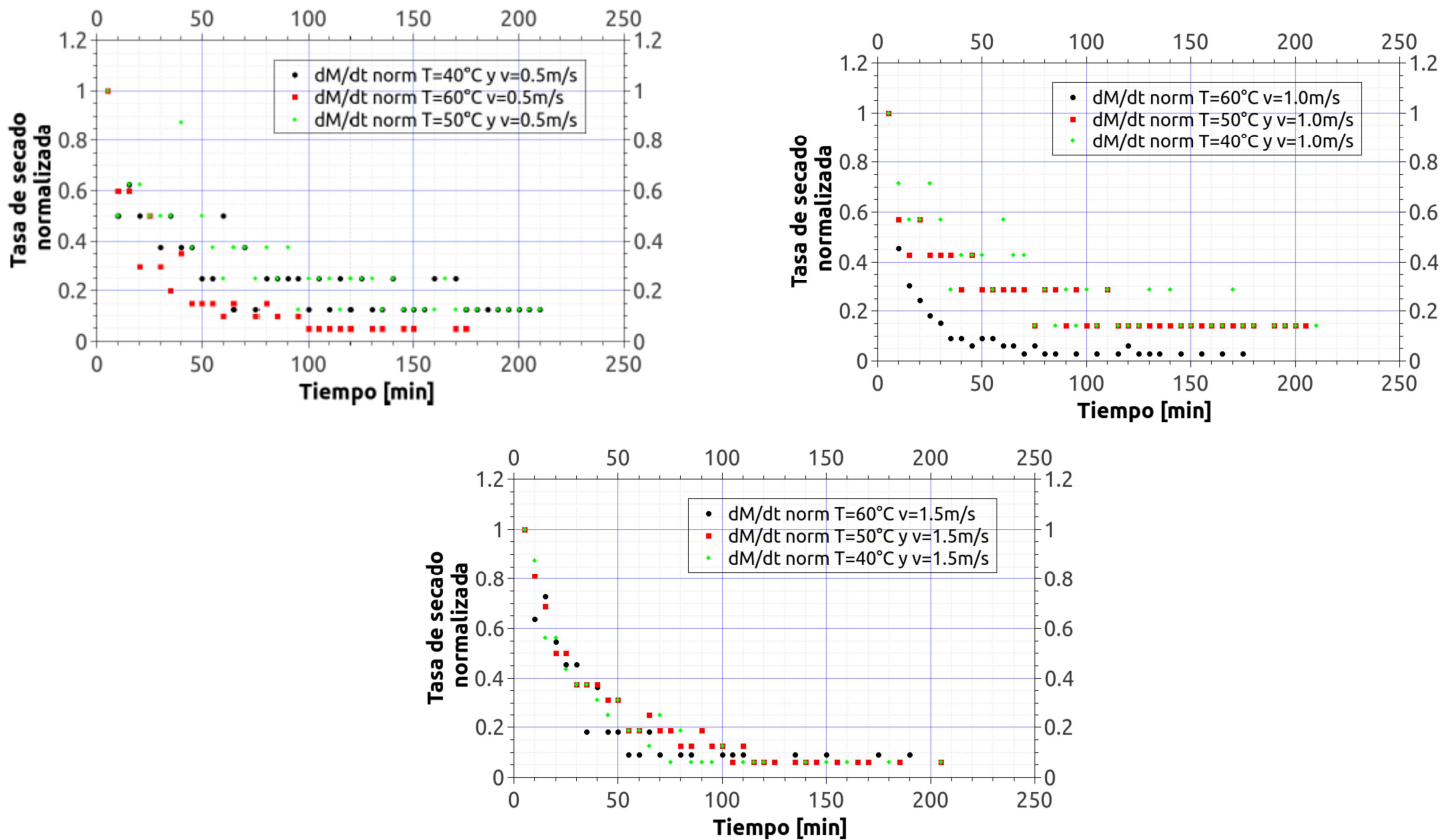
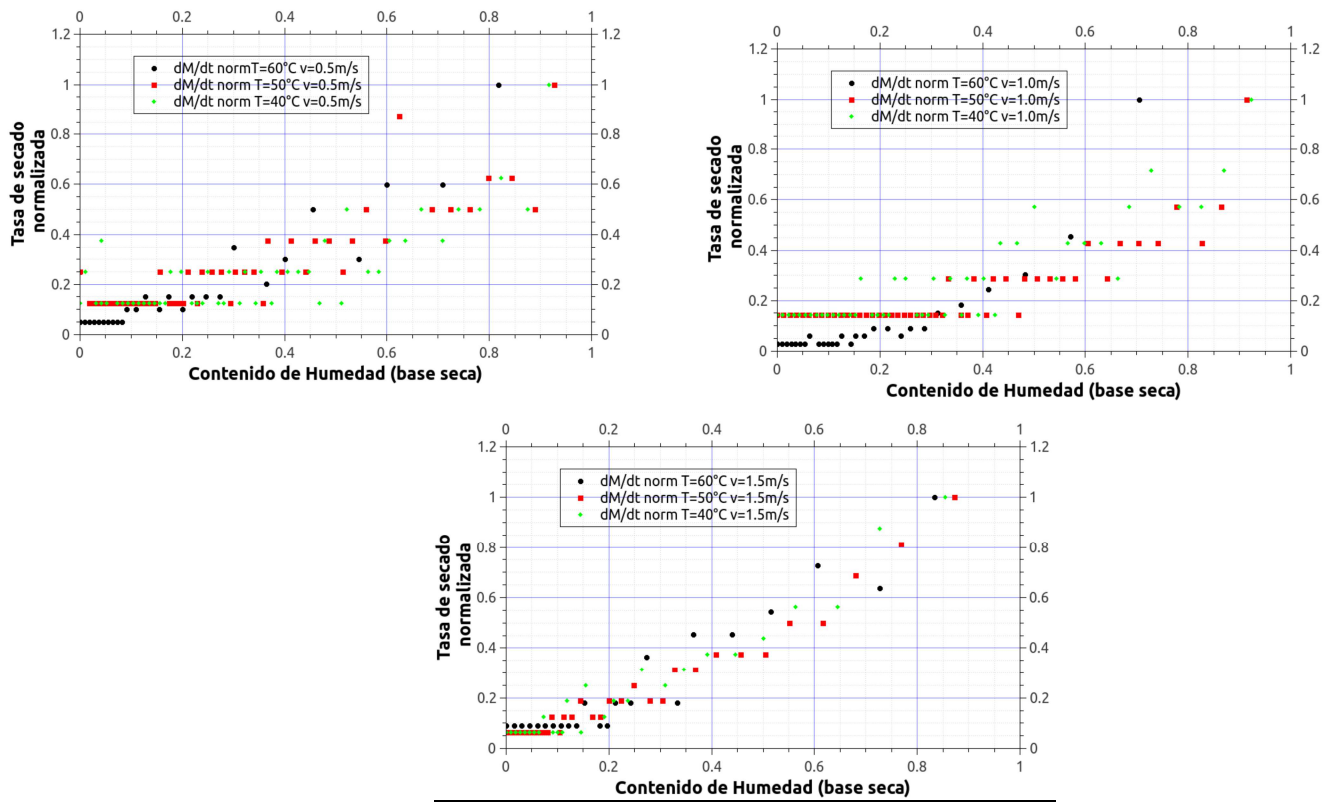


Figura 11. Tasa de secado a diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s) y diferentes temperaturas (40, 50 y 60°C)

# Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (*Manihot esculenta*, Crantz).



**Figura 12. Tasa de secado a diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s) y diferentes contenidos de humedad**

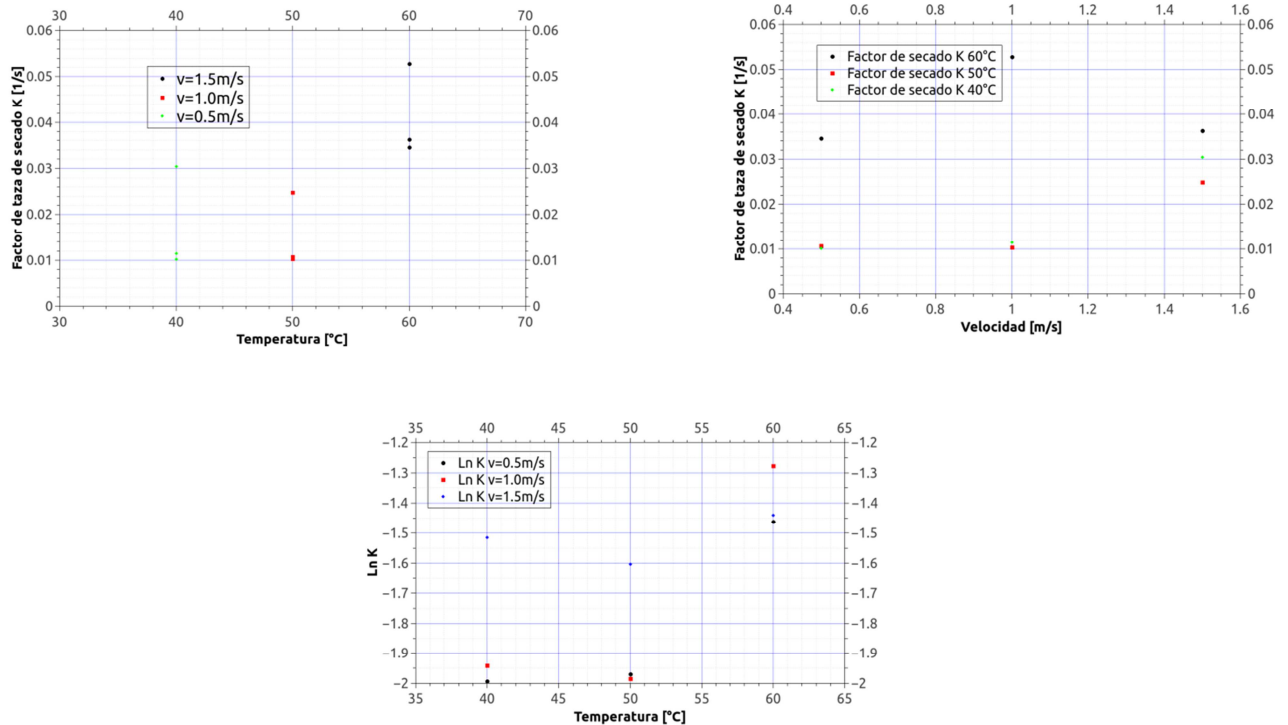
Las pruebas en el túnel de viento se le calcularon los números de Reynolds, Tabla 3, con el fin de observa que tipo de flujo se desarrolla. Se observa que el flujo esta turbulento para velocidades de 1.5m/s y flujo laminar para velocidades 0.5m/s tiene una relación correspondiente a la temperaturas [64]. Eso significa que a mayores temperaturas y velocidades el flujo es turbulento y viceversa para flujo laminar. Cuando el flujo es turbulento el contenido de humedad disminuye rápidamente, Figura 10. Esto muestra que las velocidades del fluido y la temperatura afectan el tiempo de secado [4], [39], [41].

**Tabla 3. Números de Reynolds en el túnel de viento**

Número de prueba	Prueba T[°C] v[m/s]	Número de Reynolds
1	T60 v1.5	4255
2	T60 v1.0	3161
3	T60 v0.5	1581
4	T50 v1.5	4096
5	T50 v1.0	4102
6	T50 v0.5	1449
7	T40 v1.5	3760
8	T40 v1.0	2659
9	T40 v0.5	1111

En la Figura 13 se ilustra el factor de la tasa de secado  $K$  al utilizar una regresión lineal sobre los datos de la Figura 12, se observa que a medida que se incrementa la temperatura el factor de la tasa de secado se incrementa en la medida que la velocidad se incrementa. Se detalla que los valores obtenidos tienen un valor de  $0.01s^{-1}$  para las velocidades de 0.5 y 1.0m/s para las temperaturas de 40 y 50°C. En cambio, para la temperatura de 60°C se observa un valor superior a las mismas velocidades respecto a las temperaturas de 40 y 50°C. También, se encontró que al incrementar la velocidad el factor de tasa de secado  $K$  tiende a ser similar para todas las temperaturas. Se ilustra que el logaritmo del factor de tasa de secado presenta un punto de inflexión hacia los 50°C. En el Anexo C, se ilustra los resultados de la regresión lineal.

Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (*Manihot esculenta*, Crantz).



**Figura 13. Factor de tasa de secado K y Ln K para diferentes temperaturas y factor de tasa de secado K para diferentes velocidades.**

En la Tabla 4 se presenta la densidad de bulto de la hoja de Yuca que corresponde a un promedio de  $255 \text{ kg/m}^3$ , este material presenta una baja densidad comparada con materiales como granos [41]. Además, las proporciones de hoja y peciolo están en relación 3:1 la hoja (26.43g) y el peciolo (10.78g).

**Tabla 4. Densidad de bulto y proporción hoja-peciolo para la hoja de Yuca**

Material	Densidad de bulto [kg/m <sup>3</sup> ]	Peso Hoja [g]	Porcentaje Hoja [%]	Peso Peciolo [g]	Porcentaje Hoja [%]	Peso Hoja + Peciolo [g]
Hoja de Yuca	255 ± 18	26.43 ± 8.86	71 ± 2	10.78 ± 3.84	29 ± 0.02	37.21 ± 12.62

### 3.1.2 Pruebas en la termo balanza gravimétrica

En la Figura 14 se observa las curvas de adsorción y desorción de la hoja de Yuca. En esta figura se observa que a medida que la temperatura se incrementa bajo las mismas condiciones de flujo, la tasa de evaporación de la hoja de yuca aumenta. Pero, en la medida que esa temperatura se incrementa sucede que el material evapora rápidamente el agua libre y ofrece una resistencia a la evaporación del agua ligada.

En la Figura 15 se observa la línea de tendencia para la adsorción de la hoja de Yuca con un buen ajuste de  $R_{corr}^2 = 0.993$ . En la ecuación 3-1 se ilustra la ecuación de Arrhenius para la adsorción, se encontró un factor pre-exponencial del orden de  $10^{-4}$  y energía de activación de  $44 \text{ J/mol}$ .

$$k = 4.07 \times 10^{-4} e^{\left(\frac{-44}{RT_c}\right)}, \quad R_{corr}^2 = 0.993 \quad 3-1$$

En la Figura 16 se observa la línea de tendencia para la desorción de la hoja de Yuca con un buen ajuste de  $R_{corr}^2 = 0.922$ . En la ecuación 3-2 se ilustra la ecuación de Arrhenius para la desorción, se encontró un factor pre-exponencial del orden de  $10^{-4}$  y energía de activación de  $50 \text{ J/mol}$ .

$$k = 7.90 \times 10^{-4} e^{\left(\frac{-50}{RT_c}\right)}, \quad R_{corr}^2 = 0.922 \quad 3-2$$

Las ecuaciones 3-1 y 3-2 ilustran que la energía activación  $Ea$  no depende de la temperatura, ya que el orden de potencia es igual para adsorción y desorción. Esto da entender que el procedimiento realizado no permite observar cambios de la energía de activación en función de la temperatura.

La ecuación 3-3 y 3-4 expresa la difusividad de la masa de hoja de yuca en la adsorción y desorción respectivamente. En la Tabla 5 se expresan los valores calculados de difusividad para la hoja de yuca, se observa que los valores de difusividad  $D_L$  [ $\text{m}^2/\text{s}$ ] son similares a los reportados en la literatura para un proceso de desorción [59].

$$D_{Ladsorcion} = 3.84 \times 10^{-9} e^{\left(\frac{-4.27 \times 10^{-8}}{RT_c}\right)}, \quad R_{corr}^2 = 0.993 \quad 3-3$$

$$D_{Ldesorción} = 7.47 \times 10^{-9} e^{\left(\frac{-4.77 \times 10^{-8}}{RT_c}\right)}, \quad R_{corr}^2 = 0.993 \quad 3-4$$



Tabla 5. Difusividad de hoja de yuca

Tipo de Sorción	Temperatura $T_c$ [K]	Pre-factor de difusividad $D_0$	Energía de activación $E_a$ [J/mol K]	Difusividad $D_L$ [m <sup>2</sup> /s]
Adsorción	313,15	$3,84 \times 10^{-9} \pm 8,99 \times 10^{-11}$	$4,27 \times 10^{-8} \pm 3,49 \times 10^{-9}$	$3,84 \times 10^{-9} \pm 8,99 \times 10^{-11}$
	323,15	$3,84 \times 10^{-9} \pm 8,99 \times 10^{-11}$	$4,27 \times 10^{-8} \pm 3,49 \times 10^{-9}$	$3,84 \times 10^{-9} \pm 8,99 \times 10^{-11}$
	333,15	$3,84 \times 10^{-9} \pm 8,99 \times 10^{-11}$	$4,27 \times 10^{-8} \pm 3,49 \times 10^{-9}$	$3,84 \times 10^{-9} \pm 8,99 \times 10^{-11}$
Desorción	313,15	$7,47 \times 10^{-9} \pm 3,57 \times 10^{-12}$	$4,77 \times 10^{-8} \pm 1,38 \times 10^{-9}$	$7,47 \times 10^{-9} \pm 3,57 \times 10^{-12}$
	323,15	$7,47 \times 10^{-9} \pm 3,57 \times 10^{-12}$	$4,77 \times 10^{-8} \pm 1,38 \times 10^{-9}$	$7,47 \times 10^{-9} \pm 3,49 \times 10^{-12}$
	333,15	$7,47 \times 10^{-9} \pm 3,57 \times 10^{-12}$	$4,77 \times 10^{-8} \pm 1,38 \times 10^{-9}$	$7,47 \times 10^{-9} \pm 3,49 \times 10^{-12}$

En la Figura 17 se observa el calor específico a presión constante para la hoja de yuca. Se observa que a medida que se aumenta la temperatura de 35 a 60°C el calor específico aumenta desde 3.00 a 7.00kJ/kg K, esto significa que no permanece constante en ese rango de temperaturas y los datos son similares a los reportado para otros materiales biológicos [65]

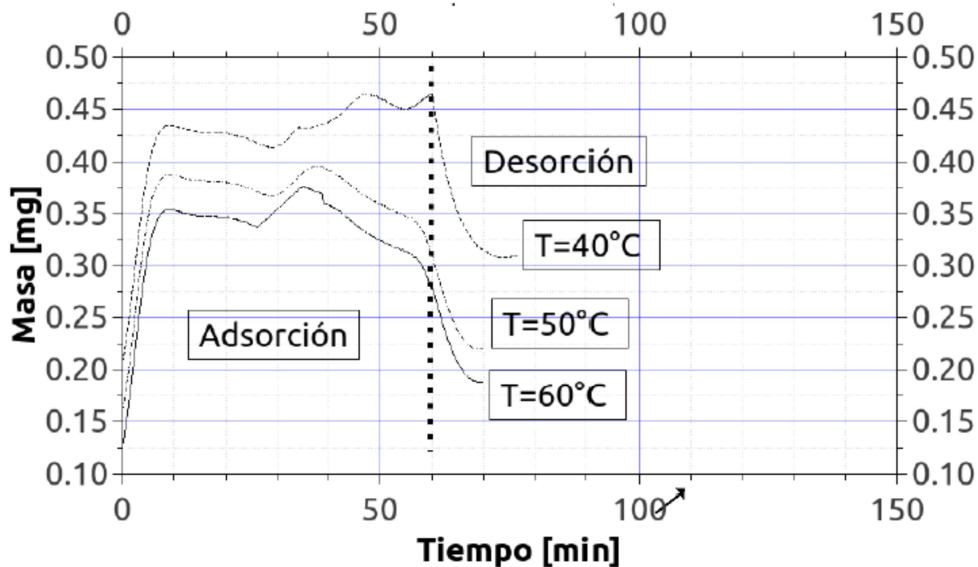


Figura 14. Curvas de adsorción y desorción a diferentes temperaturas y una HR constante.

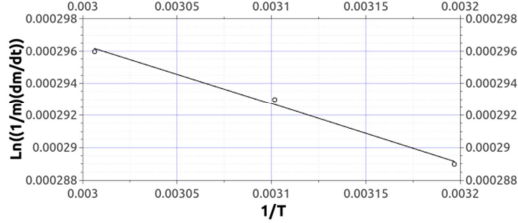


Figura 15. Línea de tendencia en adsorción a diferentes temperaturas

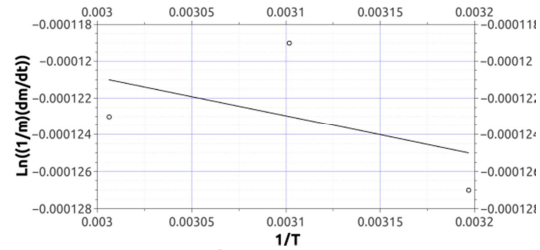


Figura 16. Línea de tendencia en desorción a diferentes temperaturas

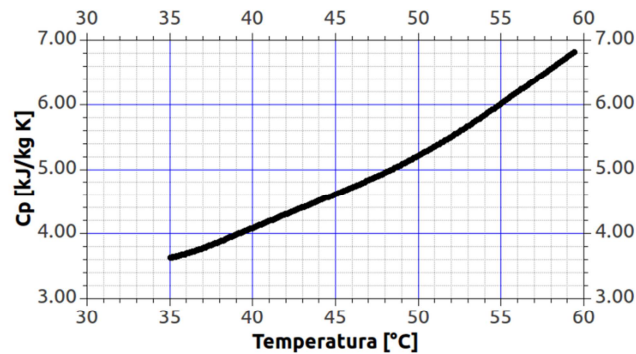


Figura 17. Calor específico del hoja de Yuca

### 3.1.3 Análisis próximo y elemental

En la Tabla 6, se observan los valores de análisis próximo de la hoja de Yuca, estos valores son similares a los obtenidos en materiales biológicos con fines de uso para biomasa [66].

Tabla 6. Análisis próximo de hoja de Yuca

Muestra	Humedad residual [%]	Cenizas [%]	Material volátil [%]	Carbono fijo [%]	Azufre total [%]	Poder calorífico [MJ/kg]
Hoja Entera	7,995 ± 0.095	9,14 ± 0.02	75,845 ± 2.075	7,02 ± 2.15	0,225 ± 0.005	17,60 ± 0.35
Pecíolo Entero	9,23 ± 0.37	8,715 ± 0.495	71,235 ± 0.195	10,82 ± 0.07	0,095 ± 0.005	13,49 ± 0.53
Hoja + Pecíolo	7,875 ± 0.085	8,925 ± 0.225	72,755 ± 0.005	10,445 ± 0.135	0,205 ± 0.005	17,41 ± 0.23
Hoja	8,055 ± 0.045	8,985 ± 0.345	73,43 ± 0.07	9,53 ± 0.46	0,23 ± 0.005	18,14 ± 0.010
Pecíolo	9,095 ± 0.135	8,435 ± 0.195	73,655 ± 0.915	8,815 ± 0.855	0,08 ± 0.005	13,93 ± 0.010

El análisis elemental se observa en la Tabla 7, estos datos están calculados en porcentaje de peso a peso. Se observa un alto contenido de Nitrógeno en la muestra,

Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (*Manihot esculenta*, Crantz).

2.94%, debido a que la hoja de Yuca contiene un contenido alto de glucósidos cianogénicos [22].

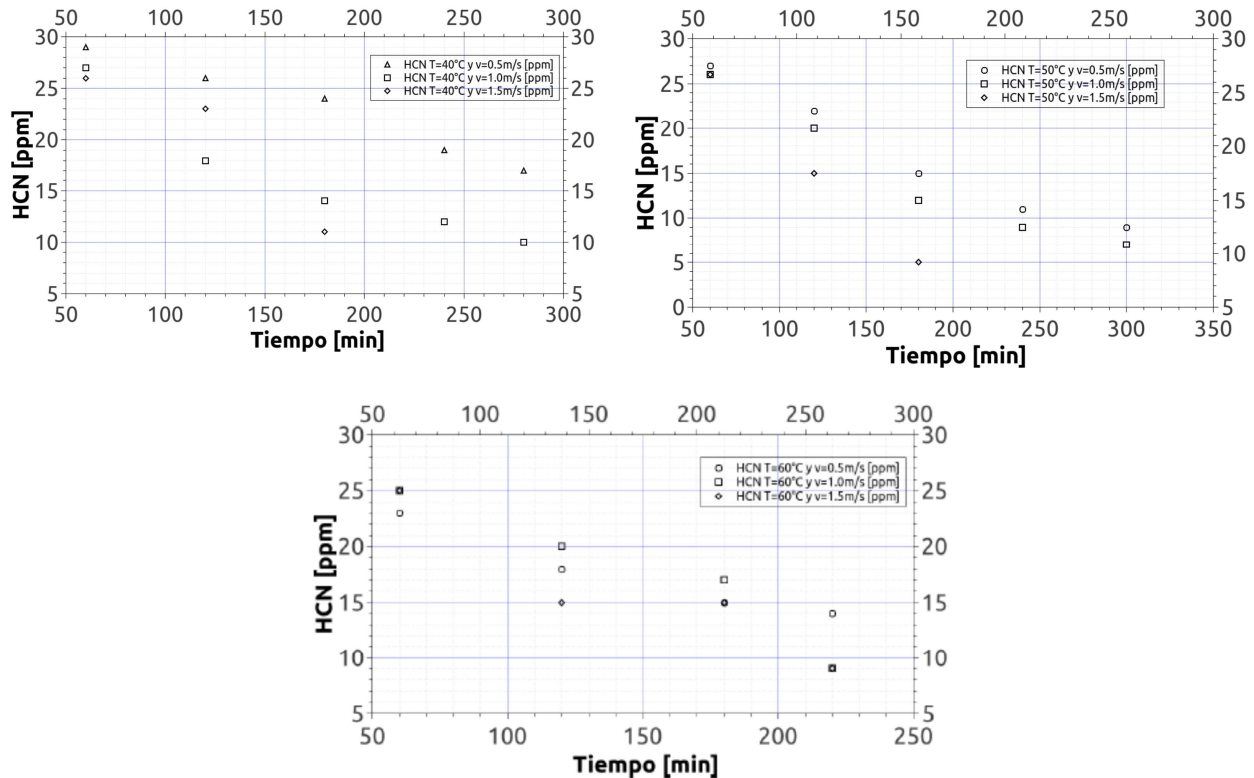
**Tabla 7. Análisis elemental de hoja de Yuca**

Muestra	Carbono [%]	Hidrogeno [%]	Nitrógeno [%]	Oxígeno* [%]	Cenizas [%]
Hoja + Peciolo	41.52 ± 0.510	5.27 ± 0.159	2.94 ± 0.047	41.38 ± 0.705	8,925 ± 0.225
Peciolo	38.54 ± 0.481	4.81 ± 0.150	0.83 ± 0.042	47.63 ± 0.658	9,095 ± 0.135
Hoja	43.21 ± 0.602	4.87 ± 0.135	3.41 ± 0.035	39.52 ± 0.700	8,055 ± 0.045

\*Oxígeno por diferencia

### 3.1.4 Pruebas de proteína cruda y HCN

En la Figura 18 se ilustra la disminución del HCN a medida que aumenta el tiempo para todas las temperaturas y velocidades. Se observa que a medida que la temperatura se incrementa, el contenido de HCN decrece en función del tiempo, al igual, que aumenta la velocidad.



**Figura 18. Contenido de HCN a través del tiempo en el túnel de viento para diferentes velocidades.**

En la Figura 19 se ilustra la cantidad de HCN en ppm para los diferentes contenidos de humedad. Se observa en la figura una pérdida de HCN rápidamente cuando la velocidad del aire se incrementa a una misma temperatura, esto muestra que el contenido de agua libre y el HCN está relacionada a través de enlaces químicos Figura 20. Esto demuestra que el secado afecta las concentraciones de HCN en la hoja de Yuca.

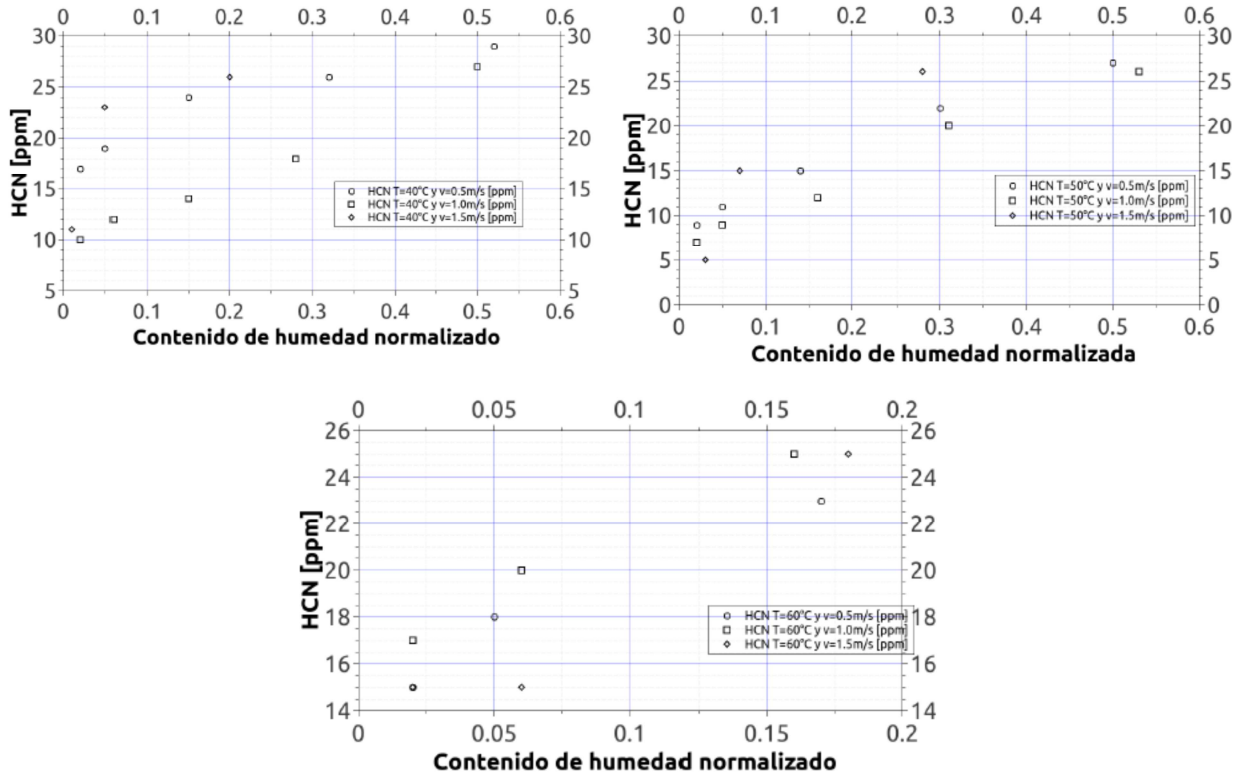
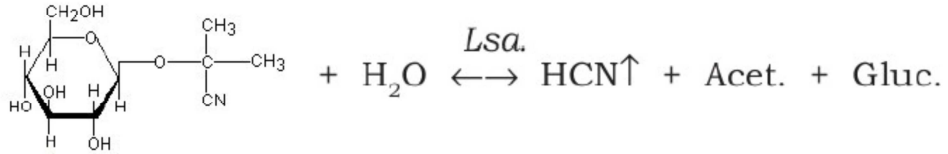


Figura 19. Contenido de HCN versus los contenidos de humedad.

Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (*Manihot esculenta*, Crantz).

Linamarin (CAS No. 554-35-8)



Lotaustralin (CAS No. 534-67-8)

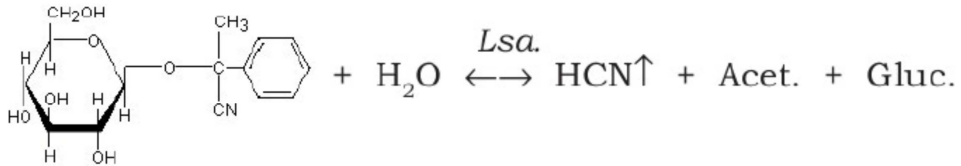
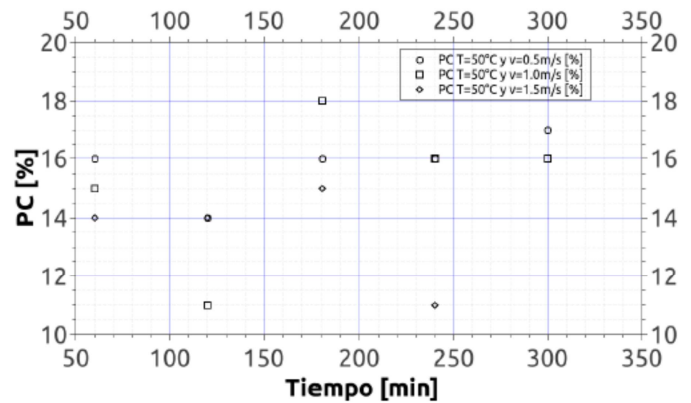
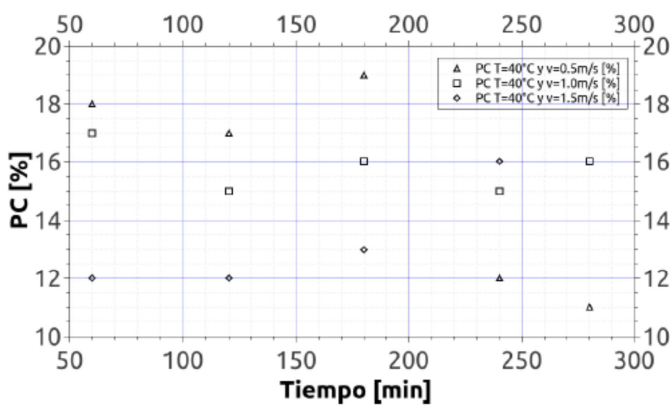
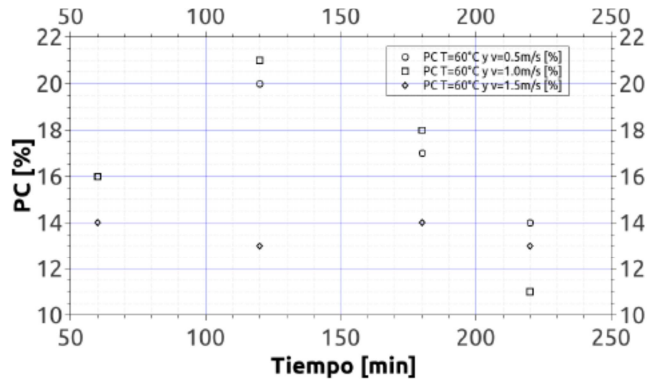


Figura 20. Enlaces químicos de las proteínas en la hoja de Yuca con el CN.

Imágenes tomadas de libor de Makkar [31]

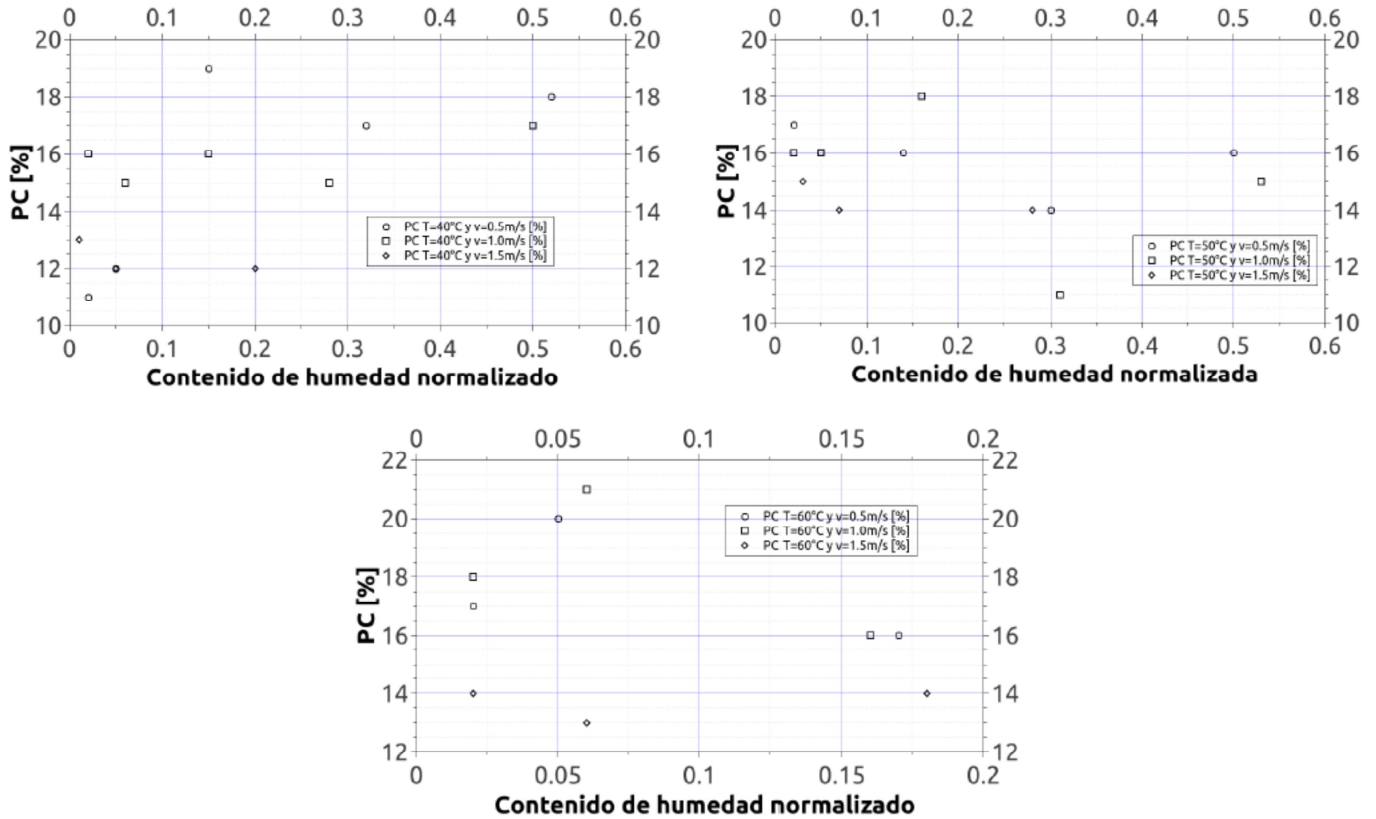
En la Figura 21 se ilustra que no hay efectos de la temperatura y la velocidad sobre el contenido de Proteína cruda que marquen una tendencia. En los resultados obtenidos se percibe que la proteína cruda no está en función de esas dos variables contempladas en la experimentación del túnel de viento.





**Figura 21. Contenido de Proteína cruda a través del tiempo en el túnel de viento para diferentes velocidades.**

En la Figura 24 se ilustra los contenidos de Proteína Cruda (PC) versus el contenido de humedad normalizado, se observa que los contenidos de PC no presentan tendencia respecto a la temperatura y la velocidad del aire. Se encontró que la PC se mantiene en un rango entre 10 a 20% independiente del contenido de humedad que tenga la hoja de Yuca. Según este resultado, se puede decir que la PC no es afectada por el agua contenido en las hojas.



**Figura 22. Contenido de Proteína versus los contenidos de humedad.**

Los resultados de la Figura 18 y Figura 21 ilustran que el promedio de HCN está en promedio aritmético en 10ppm y de proteína cruda en un 15% similares a los reportados en la literatura [24]. Con la información de HCN y proteína cruda se puede realizar un estimado de producción de ambos factores físico-químicos, ya que, si se considera que durante un año la producción de hoja + peciolo seco para la variedad HMC-1 está alrededor de 50g/planta [67], se obtiene aproximadamente 0.1kg/ha de HCN y 75kg de proteína cruda/ha asumiendo un estimado 10000planta/ha para la región de Mutata, Antioquia [5].

## 3.2 Simulación del proceso de secado

### 3.2.1 Validación y escalado del prototipo

El cálculo aproximado realizado con las ecuaciones 2-8, 2-9, 2-10 y 2-11 para un sistema híbrido termo-fotovoltaico utilizando los resultados obtenidos del secado en el túnel de viento se ilustra en la Tabla 8. Se observa que a medida que la temperatura aumenta la celda fotovoltaica disminuye su eficiencia y el área del colector aumenta. Esto ilustra que un sistema termo-fotovoltaico la relaciones de eficiencias depende del área de operación y la temperatura del sistema híbrido termo-fotovoltaico (relación energía térmica versus energía eléctrica).

**Tabla 8. Valores de diseño y especificaciones**

Término	Valor	Unidad	
Peso de la masa de hoja de yuca en húmedo ( $M_i$ )	12.5	kg	
Peso de la masa de hoja de yuca en seco ( $M_f$ )	3.9	kg	
Tiempo de secado $t$	5	h	
Tasa de secado de la hoja de la yuca $M^*$	1.5	kg/h	
Potencia requerida $\dot{W}$	2.43	kW	
Entalpía de evaporación del agua	2500	kJ/kg	
Temperatura de la placa $T_p$	40, 50 y 60	°C	
Temperatura ambiente, Mutata, Antioquia $T_a$ [13]	28.3	°C	
Brillo solar promedio, Mutata, Antioquia $S$ [13]	4.46	h/día	
Radiación solar, Mutata, Antioquia $I(t)$ [13]	486.3	W/m <sup>2</sup>	
Eficiencia global de colector solar $\eta_{\text{termo-fotovoltaico}}$	$T_p = 40^\circ\text{C}$	0.67	
	$T_p = 50^\circ\text{C}$	0.54	
	$T_p = 60^\circ\text{C}$	0.41	
Área total de colector solar $A_c$	$T_p = 40^\circ\text{C}$	3.2	m <sup>2</sup>
	$T_p = 50^\circ\text{C}$	4.0	m <sup>2</sup>
	$T_p = 60^\circ\text{C}$	5.3	m <sup>2</sup>

\*Valor encontrado de las tasas de secado de los resultados en el túnel de viento

En la Tabla 9 se ilustra la validación y escalado del prototipo a partir del cálculo del área

del colector solar de la ecuación 2-11, con esta información se logró calcular el precio para secar hoja de yuca con base en producciones del departamento de Antioquia en la región de Mutata. Se encontró que la potencia requerida para forzar el aire es de 3.6 kW, con un área de secado de 3045.7 m<sup>2</sup> de área de secado y costo estimado de 153000\$/día para un 100kg/día de hoja de Yuca a secar. Estos cálculos se desarrollaron con base en el área mínima a una temperatura de 40°C. Esto resultados ilustran un área grande comparada con el área que muestran los cálculos de la Tabla 8 para una cantidad de 12.5kg de hoja de Yuca Fresca.

**Tabla 9. Validación y escalado del prototipo**

Termino	Valor	Unidad
Radiación solar ( $I_{sc}$ )	500	W/m <sup>2</sup>
Área ( $A_c$ )	3.2	m <sup>2</sup>
Eficiencia celda solar Si-m	10	%
Potencia Eléctrica ( $\dot{W}$ )	160	W
Flujo de Calor térmico total ( $\dot{Q}_{ter}$ )	340	W
Eficiencia térmica ( $\eta_{termo-fotovoltaico}$ )	40	%
Flujo de Calor térmico entregado ( $\dot{Q}_{in}$ )	136	W
<b>Cálculo túnel de viento</b>		
Velocidad del flujo de aire	0.5	m/s
Área transversal túnel	0.0625	m <sup>2</sup>
Caudal túnel de viento	0.03125	m <sup>3</sup> /s
Temperatura de aire	298.15	K
Densidad del aire ( $T_a = 300K$ )	1.1614	kg/m <sup>3</sup>
Flujo másico de aire	0.03629	kg/s
Calor específico ( $C_p$ )	1.007	kJ/kg K
Temperatura de secado ( $T_{fin}$ )	313.15	K
Flujo de Energía térmica secado	548.2	W
Flujo de Energía por la prueba (100g)	5.5	W/g
<b>Cálculo de Energía para secar comercialmente</b>		
Termino	Valor	Unidad
Rendimiento de hoja de Yuca	3000	kg/ha trimestre
Tiempo de secado	5	h Sol/día
Cantidad a secar	100	kg/día



Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (*Manihot esculenta*, Crantz).

Flujo de Energía requerida para secar	548.2	kW/dia
Radiación solar ( $I_{sc}$ )	500	W/m <sup>2</sup>
Eficiencia celda solar Si-m	10	%
Eficiencia térmica	40	%
Área total para secar	3045.7	m <sup>2</sup>
Potencia eléctrica ( $\dot{W}$ )	152.3	kW
Flujo de aire requerido (Prueba túnel)	0.36	kg aire/s/kg yuca
Flujo de aire requerido (viabilidad)	36.3	kg aire/s
Flujo de aire térmico requerido (viabilidad)	31.3	m <sup>3</sup> /s
Potencia eléctrica ventilador requerida (viabilidad)	3.6	kW
Costo estimado (200\$/kW)	152283	\$/dia

### 3.2.2 Simulación de las ecuaciones en la cámara de secado

Antes de simular la ecuación 2-4 se obtuvieron las ecuaciones 3-5 y 3-6 para encontrar la las tasas de adsorción y desorción  $\dot{\gamma}_v$ . Ambas ecuaciones son dependientes del tiempo con una masa inicial  $M_0$ .

$$\dot{\gamma}_{v \text{ adsorción}} = (4.07 \times 10^{-4}) M_0 e^{4.07 \times 10^{-4} * e^{\left(\frac{44}{RTc}\right)t}} e^{\left(\frac{44}{RTc}\right)} \quad 3-5$$

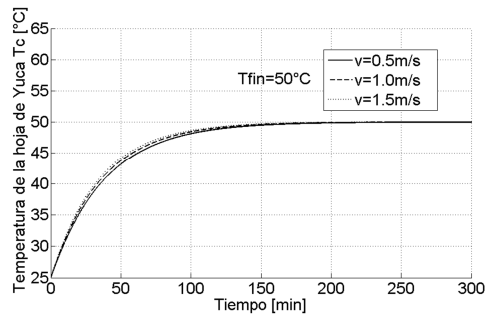
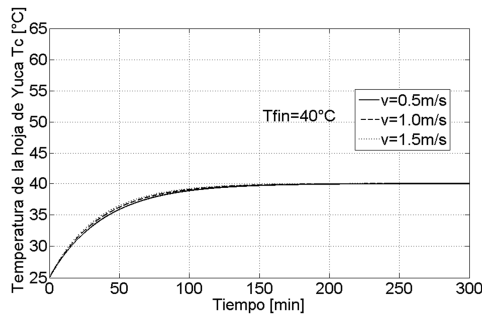
$$\dot{\gamma}_{v \text{ desorción}} = (-7.90 \times 10^{-4}) M_0 e^{-7.90 \times 10^{-4} e^{\left(-\frac{50}{RTc}\right)t}} e^{\left(-\frac{50}{RTc}\right)} \quad 3-6$$

La ecuación 3-6 se utilizó para simular la ecuación 2-6. Los parámetros utilizados en las ecuaciones anteriores se ilustran en la Tabla 10. Los resultados de la simulación se observan en la Figura 23, estos resultados del secado de la hoja de yuca se realizó para un tiempo de 5h de acuerdo a la información disponible para la región de Mutata en cuánto al brillo solar, Tabla 2. En esas figuras se observa que la rampa de temperatura en el tiempo en grados Celsius, se observa un incremento rápido durante las 5horas en la cámara de secado, esto ilustra que la fuente de calor (sistema híbrido termo-fotovoltaico) debe ser permanente en el tiempo para que las condiciones del secado prevalezcan.

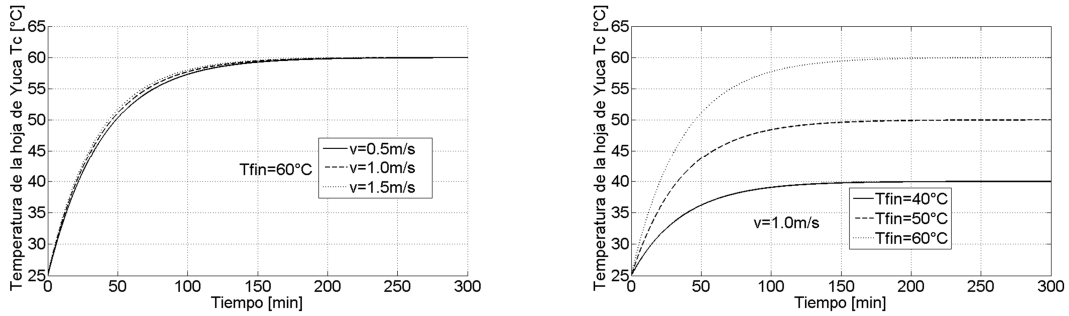
**Tabla 10. Parámetros utilizados en la ecuación 2-4 del modelo híbrido termo-fotovoltaico**

Parámetro	Símbolo	Referencia	Valor	Unidad
Coeficiente de transferencia de calor (Se calculó para la velocidades de 0.5, 1.0 y 1.5m/s y diferentes temperaturas de 40, 50 y 60°C)	$h_f$	Velocidad $v=1.0\text{m/s}$ y $T=40^\circ\text{C}$	2.7940	$\text{W/m}^2 \text{K}$
		Velocidad $v=1.0\text{m/s}$ y $T=50^\circ\text{C}$	2.7876	
		Velocidad $v=1.0\text{m/s}$ y $T=60^\circ\text{C}$	2.6520	
Temperatura de flujo de aire que ingresa	$T_{fin}$	Aire	40, 50 y 60	$^\circ\text{C}$
Masa Total	$M_0$	Hoja de Yuca (adimensional)	1.0	kg
Calor específico para la hoja de Yuca	$C_c$	Hoja de Yuca Seca	3000	$\text{J/kg K}$
Coeficiente de transferencia de calor en cámara [51], [68], [69]	$h$		10	$\text{W/m}^2 \text{K}$
Ancho del secador interno	$w_{sc}$		0.7882	m
Longitud del secador interno	$L_{sc}$		0.90	m
Entalpía del vapor de agua	$h_v$		2500	$\text{MJ/kg}$
Longitud del secador externo	$L_s$		1.00	m
Espesor de la cámara interna	$d_{sc}$		0.0691	m

En la Figura 23 se ilustra que a una misma temperatura (40, 50 y 60°C) y a medida que la velocidad (0.5, 1.0 y 1.5m/s) se incrementa la temperatura sobre la hoja de Yuca ( $T_c$ ) hasta alcanzar la temperatura del flujo del aire  $T_{fin}$ . Esto confirma que la velocidad del aire influye en la transferencia de energía hacia la hoja de Yuca. Se observa hacia los 200min se alcanza la temperatura del flujo de aire para todas las temperaturas, y no se observa un efecto marcado por los cambios de velocidad sobre la temperatura de la hoja de Yuca ( $T_c$ ).

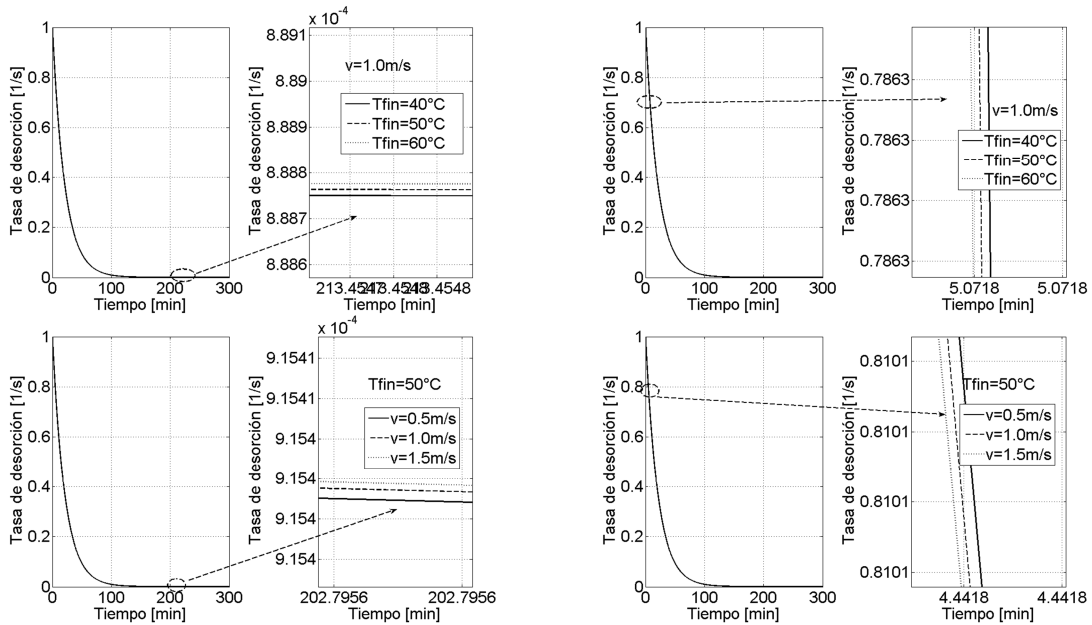


Sistema híbrido Termo-fotovoltaico: Modelo termodinámico para el secado de hoja de Yuca Forrajera (*Manihot esculenta*, Crantz).



**Figura 23. Simulación a diferentes temperaturas (40, 50 y 60°C) y diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s)**

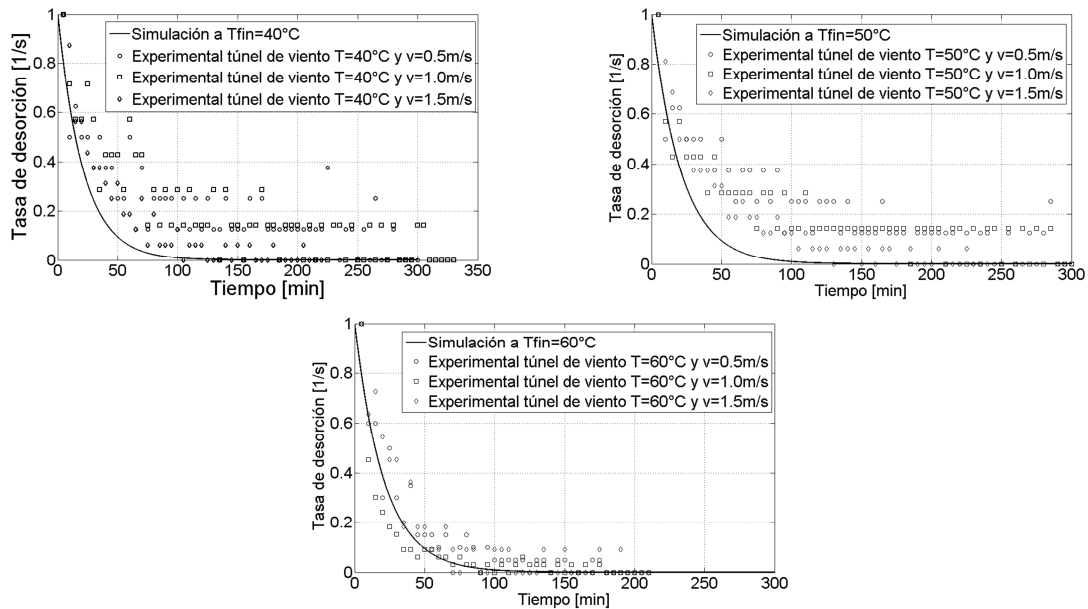
En la Figura 24 se observa la tasa de desorción para las temperaturas ( $T_{fin}$ ) de 40, 50 y 60°C con las velocidades de 0.5, 1.0 y 1.5m/s, se encontró que el efecto por velocidad no presenta un efecto marcado por los cambios de velocidad en el flujo de aire. Se aprecia que la tasa de secado es igual para todas temperaturas del flujo de aire a diferentes velocidades. En la figura ampliada se ilustra que la tasa de secado es rápida para una velocidad mayor (1.5m/s) que para una velocidad menor (0.5m/s), esto confirma que la transferencia de calor del fluido se aprecia sobre la hoja de Yuca.



**Figura 24. Simulación de la tasa de desorción diferentes temperaturas (40, 50 y 60°C) y diferentes velocidades (0.5, 1.0 y 1.5m/s)**

En la Figura 25 se ilustra la tasa de secado simulada a diferentes temperaturas, se observa que el modelo escogido 3-5 y 3-6 tiene un ajuste próximo sobre los datos experimentales en el túnel de viento a las temperaturas y velocidad de simulación. Esto

demuestra que el efecto es apreciable utilizando el modelo de Arrhenius para ese rango de velocidades y temperaturas. Además, se encontró que el tiempo de 5h simulado permite logra una tasa de secado apreciable como en el túnel de viento.



**Figura 25. Simulación de la tasa de desorción a diferentes temperaturas y velocidades y datos experimentales en el túnel de viento.**

## 4. Conclusiones y recomendaciones

### 4.1 Conclusiones

Se desarrolló un modelo con términos cinéticos durante este trabajo, donde sus resultados concuerdan con los datos experimentales.

En la experimentación se pudo demostrar la influencia del secado sobre el ácido cianhídrico (HCN) y proteína cruda (PC), que durante el secado se libera HCN y se conserva PC.

La implementación de un secado solar para hoja de Yuca debe ir acompañado de los períodos de siembra y cosecha, en esta investigación se encontró que los meses de Septiembre, Diciembre a Marzo presentan mejores condiciones para el secado debido los datos reportados de humedad relativa, radiación y brillo solar.

La velocidad del fluido y la temperatura afectan el tiempo de secado de la hoja de yuca bajo las condiciones de prueba en un Túnel de viento, encontrándose que a medida que aumenta la temperatura y la velocidad el tiempo de secado disminuye, ilustrando así que la tasa de evaporación del agua del interior del material se aumenta por efectos de estos parámetros físicos.

Las ecuaciones 3-1 y 3-2 ilustran que la energía activación  $E_a$  no depende de la temperatura, ya que el orden de potencia es igual para adsorción y desorción. Esto da a entender que el procedimiento realizado en la termo balanza gravimétrica no permite observar cambios de la energía de activación en función de la temperatura.

Los resultados realizados por las ecuaciones 2-8, 2-9, 2-10 y 2-11 reportadas en la literatura [50], ilustran que a medida que se incrementa la temperatura y el área del colector se disminuye la eficiencia del sistema híbrido termo-fotovoltaico (relación energía térmica versus energía eléctrica).

En la simulación en el proceso de secado ilustra que en el modelo adoptado para la tasa de secado tipo Arrhenius se ajusta próximo a los datos experimentales en el túnel de

viento por efecto del incremento de la temperatura y velocidad del aire en la tasa de desorción.

Se encontró en los ensayos de túnel de viento y la termo balanza gravimétrica que los valores de factor pre-exponencial no difieren. Esto ilustra un valor igual para la adsorción y desorción de la hoja de Yuca.

La simulación de la ecuación 2-4 ilustra que el proceso de secado tarda alrededor de 6 días para 12,5kg fresco de hoja de yuca con un supuesto de 5h/día de brillo solar.

Se encontró que existe un efecto de disminución del HCN por la temperatura y la velocidad del aire en el túnel de Viento a medida que el tiempo se incrementa. Esto favorece la utilización de la hoja de Yuca Forrajera como fuente de alimentación.

En las pruebas de HCN y proteína cruda se encontró que se dispone de 0.1kg de HCN/ha y 75 kg de proteína cruda/ha en la yuca forrajera HCM-1. Esto significa que se dispone de una buena cantidad de proteína cruda, pero, se presenta la dificultad del HCN (ácido cianhídrico) presente en la planta sería un impedimento para la alimentación.

A partir de los resultados de los análisis de viabilidad técnica y escalamiento se puede concluir la construcción del equipo.

## 4.2 Recomendaciones

Considerar el modelo del secado no uniforme al interior de la hoja de Yuca.

Simular las ecuaciones 2-1, 2-2 y 2-3 para acoplarlas a las ecuaciones 2-4 y 2-6 utilizando simulación computacional de fluidos (CFD) con el fin de definir las posibles áreas de operación del sistema híbrido termo-fotovoltaico y estudiar el sistema híbrido termo-fotovoltaico.

Explorar modelos cinéticos del secado para la hoja de Yuca o para materiales similares.

Construir un equipo termo-fotovoltaico para medir las variables de las 2-1, 2-3 y 2-4 para validar y verificar el modelo.

Realizar un estudio de las pérdidas de diferentes tipos de proteínas, vitaminas y HCN en la hoja de Yuca, ya que, permitirá mejorar el proceso de secado del material.

Estudiar la radiación y brillo solar con los datos reportados por la NASA [13], con el fin de construir diferentes modelos estadísticos (experimentales) y semi-físicos que permitan obtener mejores mapas de radiación y brillo solar.

Elaborar técnicas de almacenaje de hoja de Yuca entera y molida que garantice su preservación.

# Anexo A. Diseño conceptual del sistema híbrido termo-fotovoltaico

En el diseño conceptual del sistema híbrido termo-fotovoltaico se revisó los diseños existentes para el secado, Figura 26 [10], [42], [56], y se buscó desarrollar una propuesta conceptual para el secado de la hoja de Yuca forrajera a partir de la identificación de la necesidad, el problema y las restricciones de diseño (Zonas No Interconectadas) con lo cual se formularon preguntas que enfocaran en el diseño, Tabla 11.

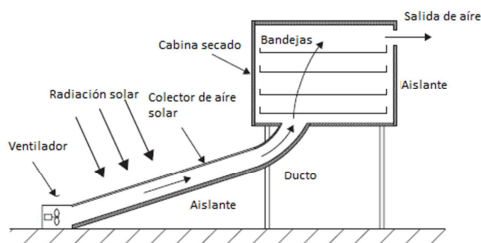


Figura 7.10 Diagrama esquemático de un secador solar activo

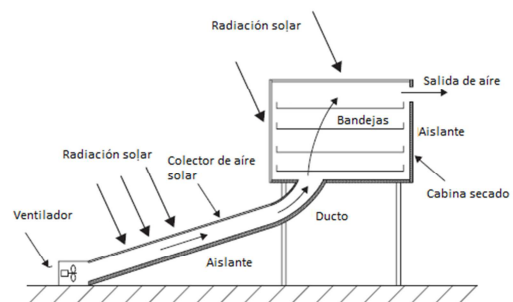


Figura 7.13 Diagrama esquemático de un secado solar activo mixto

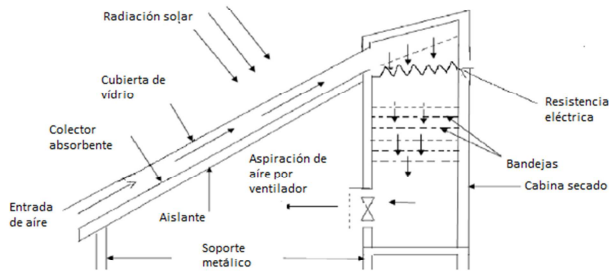


Figura 1A Secador solar híbrido termo eléctrico

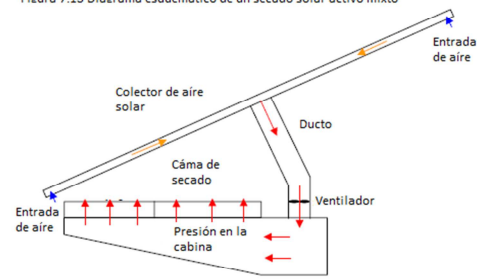


Figura 2.1 Concepto de secado híbrido solar

**Figura 26. Equipos de sistemas híbridos termo-fotovoltaicos para el secado agroindustrial**

Tabla 11. Enfoque del diseño.

Ítem	Preguntas
Energías alternativas	<p>P1: ¿Cómo obtener energía mecánica, térmica y eléctrica en ZNI para el departamento de Antioquia con vocación agrícola?</p> <p>P2: ¿Qué tecnologías pueden aplicarse para la generación de energía en las ZNI en el departamento de Antioquia con vocación agrícola?</p> <p>P3: ¿Qué tecnologías de generación de energía permiten obtener menos emisiones de Carbono hacia el ambiente?</p> <p>P4: ¿Cuál es el potencial de energía solar en la región de Antioquia?</p> <p>P5: ¿Qué economía genera la implementación de energía solar en ZNI para el departamento de Antioquia con vocación agrícola?</p>
Secado de hoja de Yuca Forrajera:	<p>P6: ¿Cuál es la necesidad de secar hoja de Yuca forrajera?</p> <p>P7: ¿Cómo es el comportamiento fenomenológico que describe el proceso de secado de hoja de Yuca forrajera que genere información necesaria para el diseño conceptual de un sistema de híbrido termo-fotovoltaico?</p> <p>P8: ¿Qué variables físicas pueden describir el fenómeno de secado de la hoja de Yuca forrajera?</p> <p>P9: ¿Qué modelo estadístico es conveniente para describir el fenómeno de secado de la hoja de Yuca forrajera?</p>
Diseño conceptual del sistema híbrido termo-fotovoltaico	<p>P10: ¿Qué metodología de diseño conceptual permite ofrece un camino general para el sistema híbrido termo-fotovoltaico?</p> <p>P11: ¿Cuáles son las variables hidroclimatológicas que me permiten calcular el potencial de energía solar para aquellas regiones de Antioquia donde se produce Yuca forrajera?</p> <p>P12: ¿Cómo disponer los componentes del sistema híbrido termo-fotovoltaico para secar hoja de Yuca forrajera?</p> <p>P13: ¿Es suficiente con un sistema híbrido termo-fotovoltaico abastecer de energía el proceso de secado de hoja de Yuca forrajera?</p> <p>P14: ¿Es posible abaratar los costos productivos en el proceso de secado de hoja de Yuca forrajera utilizando energía solar?</p> <p>P15: ¿Qué problemas genera la implementación de un sistema híbrido termo-fotovoltaico para el secado de hoja de Yuca forrajera en las ZNI del departamento de Antioquia?</p>

Se inició con una revisión del diseño previo en el secado agroindustrial con la fuente energética solar, se construyó el árbol de objetivos con el fin de clarificar la solución al problema, Tabla 12.

Tabla 12. Árbol de objetivos

Ítem	Descripción
Z1	Mínimo consumo energético
Z11	Mínimo costo energético
Z111	Máximo costo en materiales
Z112	Mínimo costo en manufactura
Z113	Mínimo costo en mantenimiento
Z12	Mínimo tiempo de secado
Z121	Máximo volumen de hoja de Yuca
Z122	Máxima temperatura de secado



Se establecieron las funciones prioritarias en el secado de hoja de Yuca forrajera a partir de los reportes que se tienen sobre condiciones de secado de productos agrícolas [2], [36], [37], [53] y la aplicación de un sistema híbrido termo-fotovoltaico [7], [19], [42], [70]. Se elaboró una lista de especificaciones Tabla 13, para cumplir con un diseño conceptual híbrido termo-fotovoltaico para secado y se determinaron las características del diseño conceptual.

**Tabla 13. Lista de especificaciones para un equipo de secado de hoja de Yuca (Manihot esculenta, Crantz)**

Fecha	Exigido/ Dado	No	Lista de especificaciones	Valor	Valor	Especificación	Unidad
		1	Geometría	Mínimo	Máximo		
		1,1	Dimensiones del equipo de secado				
		1,1,1	Cámara de secado				
04/21/11	D		Ancho	1	3		m
04/21/11	D		Largo	2,5	3		m
04/21/11	D		Altura	2	2,5		m
		1,1,2	Tamiz de secado				
04/21/11	E		Ancho	0,5	0,7		m
04/21/11	E		Largo	1,5	2		m
04/21/11	E		Altura	0,1	0,3		m
		2	Cinemática				
04/21/11	E	2,1	Posición del tamiz			Horizontal	
04/21/11	E	2,2	Apoyos (montaje)			Rieles	
04/21/11	E	2,3	Tiempo de secado		10		h
		3	Fuerzas				
04/21/11	E	3,1	Peso por tamiz neto		10		kg
04/21/11	E	3,2	Peso por tamiz bruto		60		kg
		4	Energía				
		4,1	Energía eléctrica				
04/21/11	D	4,1,1	Corriente		1	Directa	A
04/21/11	D	4,1,2	Voltaje	110	220	Directa	V
04/21/11	E	4,2	Energía térmica	2,5	3,5		kJ/g de H <sub>2</sub> O
		5	Material				
04/21/11	D	5,1	Cámara de secado			Acero inoxidable/Madera	
04/21/11	D	5,2	Tamiz de secado			Acero inoxidable/Madera	
04/21/11	D	5,3	Aislamiento entre la cámara de secado y los alrededores			Caucho	
04/21/11	E	5,4	Dilatación térmica del tamiz			Nulo	
04/21/11	E	5,5	Temperatura de operación cámara de secado	40	80		°C
04/21/11	E	5,6	Humedad de la hoja de Yuca	10	15	Base Seca	%

62 Anexo A. Diseño conceptual del sistema híbrido termo-fotovoltaico

		6	Seguridad				
04/21/11	E	6,1	Protección para operarios a parte térmicas			Polímero	
04/21/11	E	6,2	Protección para operarios a partes metálicas			Polímero	
04/21/11	E	6,3	Protección producto por ataques de insectos			Aislar la cámara de secado	
04/21/11	E	6,4	Protección al producto por recarga de humedad ambiente		15		%
		7	Producción				
04/21/11	E	7,1	Incrementos en humedad de la hoja de Yuca		2		%
04/21/11	E	7,2	Peso de hoja de Yuca	100	250		kg
		8	Operación				
04/21/11	E	8,1	Mínima abertura de la cámara de secado			Evitar abrir la cámara de secado en operación	
04/21/11	E	8,2	Máxima operación de secado	8	10		h
		9	Mantenimiento				
04/21/11	E	9,1	Revisiones del equipo de secado		6		meses
04/21/11	E	9,2	Sustituir tamiz de secado		12	Deterioro por mohos o apoyaduras	meses
		10	Plazos			Entrega de acuerdo a diagrama de Gantt en el diseño conceptual	

A continuación se generaron las alternativas posibles elaborando la caja negra, Figura 27, la caja transparente, Figura 28, el diagrama de jerarquía y el diagrama morfológico Tabla 14.

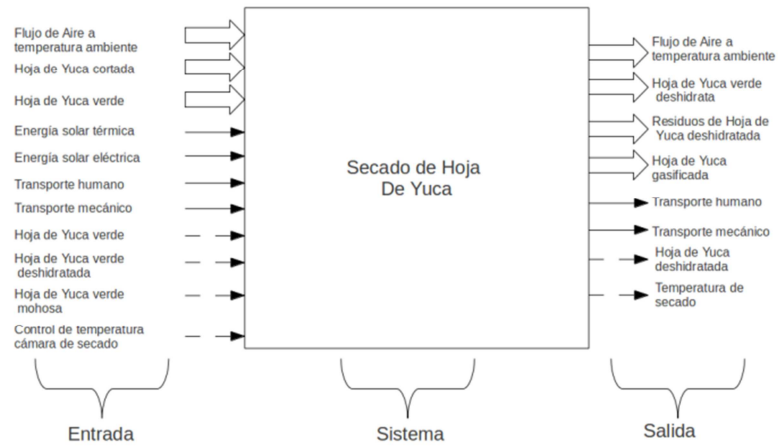


Figura 27. Caja negra para la hoja de Yuca forrajera.

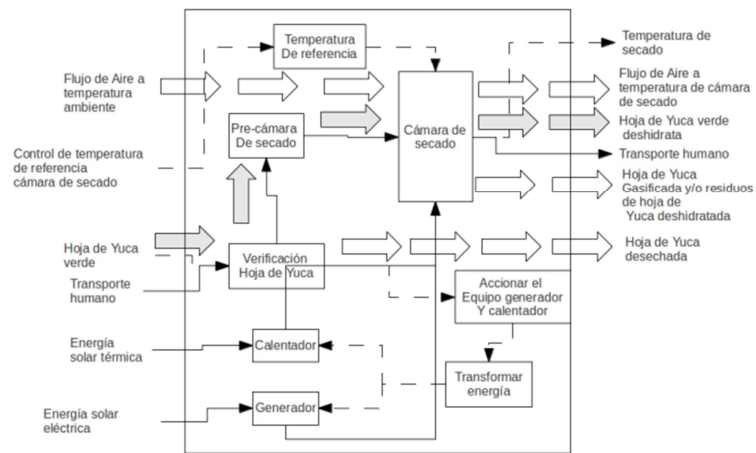


Figura 28. Caja transparente para la hoja de Yuca forrajera.

**Tabla 14. Diagrama morfológico para un equipo de secado de hoja de Yuca (Manihot esculenta, Crantz)**

Subfunción	Concepto					
	1	2	3	4	5	
1 Secado						
1 Transferencia de calor	conducción	convección natural	<u>convección forzada</u> ↓	radiación		4
1 Equipos mecánicos	resistencia eléctrica	<u>ventiladores DC</u>	<u>ventiladores AC</u> ↓	prensa eléctrica		4
1 Colectores	solar pasivo	<u>solar activo</u> ↓				2
1 Equipos ópticos	vidrio plano	<u>lentes fresnel</u>				2
2 Energía						
2 Fuentes de energía	eólica	<u>fotovoltaica</u> ↓	<u>termosolar</u>	biomasa	biogas	5
2 Tipos de energía generada	<u>eléctrica</u>	<u>térmica</u> ↓				2
2 Generación eléctrica	<u>DC</u>	<u>AC</u> ↓				2
2 Acumulador de energía	pilas de hidrogeno	<u>baterias</u> ↓	sales térmicas			3
3 Equipos de respaldo energético	<u>planta diesel</u> ↓	planta a gasolina	planta a gas			3
3 Equipos de medición						
3 Medición de flujo	<u>anemómetros</u>	flujo electromagnético	tubo pitot	venturi	rotametros	5
3 Medición de temperatura	<u>termopares</u>	termómetros de mercurio				2
3 Medición de presión	abertura piezometrica	tubo estático	<u>manómetro de glicerina</u> ↓	manometro		4
3 Medición de pesos	balanza métrica analoga	<u>balanza métrica digital</u> ↓				2
4 Equipos de transporte						
4 Formas de transporte de hoja de Yuca	<u>manual</u> ↓	mecánico cangilones	mecánicos bandas			3
4 Formas de transporte de flujo	<u>tuberías diámetro fijo</u> ↓	<u>plásticas</u> tuberías diámetro fijo	metálicas tuberías diámetro variable	toberas plásticas diámetro variable		3
Criterios: Tiempo, disponibilidad y experiencia.				Combinación de conceptos		8294400
Concepto: Línea de selección						

Con la información anterior se procedió a seleccionar alternativas que tuvieran en cuenta el costo de material, costo de manufactura, mantenimiento, durabilidad, confiabilidad y tiempo, y la herramienta de evaluación se realizó por medio del proceso analítico jerárquico AHP (Analytic Hierarchy Process) [33] con las alternativas obtenidas se le realizó una valoración económica con la que se obtuvo un diseño conceptual del sistema considerando Figura 7, que se despieza a continuación:

**Alternativa:** Convección forzada, ventiladores DC/AC, solar activo, lentes fresnel, fotovoltaico, eléctrica, DC/AC, Baterías, planta Diesel, anemómetros, termopares, manómetro de glicerina, balanza métrica digital, equipo de transporte manual, tuberías plásticas de diámetro fijo.

## Anexo B. Análisis de la tasa de secado $\dot{\gamma}_v$

Análisis del modelo de la tasa de secado de primer orden:

$$\frac{dM}{dt} = \dot{\gamma}''' M \quad \text{B-1}$$

El término  $\dot{\gamma}'''$  se puede expresar como la ecuación de Arrhenius

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} = \pm \dot{\gamma}''' \quad \text{B-2}$$

$$\frac{1}{M} \frac{dM}{dt} = \pm k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} \quad \text{B-3}$$

$$\frac{dLn(M)}{dt} = \pm k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} \quad \text{B-4}$$

$$dLn(M) = \pm k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} dt \quad \text{B-5}$$

$$Ln(M) = \pm Ln M_0 k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} t \quad \text{B-6}$$

$$M = M_0 e^{\pm k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} t} \quad \text{B-7}$$

La ecuación **B-7** es una ecuación de términos de primer orden, por lo tanto si se considera  $\dot{\gamma}_v = \frac{dM}{dt}$  se obtiene:

$$\dot{\gamma}_v = \frac{dM}{dt} = \pm M_0 e^{\pm k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} t} k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} \quad \text{B-8}$$

La ecuación **B-8** es una ecuación de primer orden en donde se puede expresar el termino  $\dot{\gamma}'''$  de Arrhenius en una ecuación de orden cero obteniéndose para las temperaturas de 40, 50 y 60°C en la adsorción un va lor constante de  $4.07 \times 10^{-4} \text{s}^{-1}$ , Tabla 15.

Tabla 15. Cálculo del término de Arrhenius k en adsorción

Temperatura $T_c$ [K]	Pre-factor exponencial $k_0$	Energía de activación $Ea$ [J/mol]	$\dot{\gamma}''' = k$ [s <sup>-1</sup> ]
313,15	$4,07 \times 10^{-4}$	44	$4,07 \times 10^{-4}$
323,15	$4,07 \times 10^{-4}$	44	$4,07 \times 10^{-4}$
333,15	$4,07 \times 10^{-4}$	44	$4,07 \times 10^{-4}$

La ecuación B-8 es una ecuación de primer orden en donde se puede expresar el término  $\dot{\gamma}'''$  de Arrhenius en una ecuación de orden cero obteniéndose para las temperaturas de 40, 50 y 60°C en la adsorción un valor constante de  $7,90 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ , Tabla 16.

Tabla 16. Cálculo del término de Arrhenius k en desorción

Temperatura $T_c$ [K]	Pre-factor exponencial $k_0$	Energía de activación $Ea$ [J/mol]	$\dot{\gamma}''' = k$ [s <sup>-1</sup> ]
313,15	$7,90 \times 10^{-4}$	50	$7,90 \times 10^{-4}$
323,15	$7,90 \times 10^{-4}$	50	$7,90 \times 10^{-4}$
333,15	$7,90 \times 10^{-4}$	50	$7,90 \times 10^{-4}$

### Análisis del modelo de la tasa de secado orden cero $\dot{\gamma}_0'''$ :

En un modelo de orden cero, la literatura reporta [36], [42], [51], [60], [69] una ecuación tipo B-9, en donde, expresan de manera constante los cambios de masa independientes del tiempo utilizando una ecuación de Arrhenius por la masa inicial.

$$\dot{\gamma}_0''' = \pm k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} \quad \text{B-9}$$

$$\frac{dM}{dt} = \pm k_0 e^{\left(\frac{-Ea}{RT_c}\right)} M_0 \quad \text{B-10}$$

## Anexo C. Análisis de regresión lineal para el factor de la tasa de secado $K$ túnel de viento.

En la Tabla 17 se ilustra los resultados de la regresión lineal realizada sobre los datos de secado de la Figura 12. La ecuación C-11 describe el modelo de regresión lineal que contiene la relación entre la derivada de fracción másica en el tiempo  $\frac{dM}{M dt}$  contra el contenido de humedad en base seca de la hoja de Yuca  $X$ .

$$\frac{dM}{M dt} = KX + B, \quad R_{corr}^2 \tag{C-11}$$

**Tabla 17. Análisis de regresión para el factor de la tasa de secado  $K$  en el túnel de viento**

Temperatura [°C]	Velocidad [m/s]	K	B	Rcorr <sup>2</sup>
60	0.5	$3.459 \times 10^1$	$-7.793 \times 10^{-4}$	0.875
50		$1.073 \times 10^1$	$3.911 \times 10^{-4}$	0.793
40		$1.016 \times 10^1$	$4.198 \times 10^{-4}$	0.658
60	1.0	$5.281 \times 10^1$	$-2.457 \times 10^{-4}$	0.757
50		$1.033 \times 10^1$	$-2.457 \times 10^{-4}$	0.750
40		$1.145 \times 10^1$	$1.180 \times 10^{-4}$	0.779
60	1.5	$3.628 \times 10^1$	$-9.324 \times 10^{-4}$	0.910
50		$2.484 \times 10^1$	$-2.025 \times 10^{-4}$	0.948
40		$3.042 \times 10^1$	$-3.563 \times 10^{-4}$	0.947





## Bibliografía

- [1] "International Energy Agency - Emissions Trading and CDM," 19-Oct-2011. [Online]. Available: [http://www.iea.org/subjectqueries/keyresult.asp?KEYWORD\\_ID=4124](http://www.iea.org/subjectqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4124). [Accessed: 19-Oct-2011].
- [2] A. Fudholi, "Review of solar dryers for agricultural and marine products," *Renewable and Sustainable energy reviews*, vol. 14, no. 1, pp. 1–30, 2010.
- [3] F. Kreith and J. F. Kreider, *Principles of solar engineering*. Washington: Hemisphere Pub. Corp., 1978.
- [4] O. Ekechukwu, "Review of solar-energy drying systems I: an overview of drying principles and theory," *Energy conversion and management.*, vol. 40, no. 6, p. 593, 1999.
- [5] B. Ospina and H. Ceballos, *La Yuca en el Tercer Milenio: Sistemas Modernos de Producción, Procesamiento, Utilización y Comercialización*. CIAT.
- [6] "Evaluación de dos métodos de secado y su efecto sobre la composición nutricional del heno de follaje de yuca Manihot Esculenta Crantz - Repositorio Institucional UN," 19-Oct-2011. [Online]. Available: <http://www.bdigital.unal.edu.co/3426/>. [Accessed: 19-Oct-2011].
- [7] "FAOSTAT," <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#anchor>, 05-May-2011. [Online]. Available: <http://faostat.fao.org/site/567/DesktopDefault.aspx?PageID=567#anchor>. [Accessed: 06-May-2011].
- [8] "Gobernación de Antioquia," 19-Oct-2011. [Online]. Available: <http://www.antioquia.gov.co/antioquia-v1/organismos/agricultura/Anuario%20en%20CD%202009/capitulo%202.htm>. [Accessed: 19-Oct-2011].
- [9] "upme," 19-Oct-2011. [Online]. Available: [http://www1.upme.gov.co/index.php?option=com\\_phocadownload&view=category&id=1:energia&Itemid=163#](http://www1.upme.gov.co/index.php?option=com_phocadownload&view=category&id=1:energia&Itemid=163#). [Accessed: 19-Oct-2011].
- [10] S. Kalogirou and Knovel (Firm), *Solar energy engineering processes and systems*. Burlington, MA :: Elsevier/Academic Press,, 2009.
- [11] HIMAT., *Régimen de brillo solar en la sabana de Bogotá*. Bogotá: HIMAT, 1978.
- [12] "Republica de Colombia : mapa de la distribución del brillo solar, núcleos isohelicos en horas [material cartografico]," HIMAT,, Bogota :, 1986.
- [13] "NASA Surface meteorology and Solar Energy - Choices," 26-Apr-2012. [Online]. Available: <http://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?&email=vhborday@unal.edu.co&step=1&p=&lat=5&submit=Submit&lon=-76>. [Accessed: 26-Apr-2012].
- [14] G. Tiwari, *Solar energy: fundamentals, design, modelling, and applications*. Pangbourne England: Alpha Science International Ltd., 2002.
- [15] V. Badescu, *Modeling solar radiation at the earth's surface recent advances*. Berlin: Springer, 2008.

- [16] J. A. Duffie and W. A. Beckman, *Solar engineering of thermal processes*. New York: Wiley, 1980.
- [17] Z. Şen, *Solar energy fundamentals and modeling techniques: atmosphere, environment, climate change and renewable energy*. London: Springer, 2008.
- [18] S. Boughali, "Crop drying by indirect active hybrid solar Electrical dryer in the eastern Algerian Septentrional Sahara," *Solar energy.*, vol. 83, no. 12, p. 2223, Dec. 2009.
- [19] M. Othman, "Development of advanced solar assisted drying systems," *Renewable Energy*, vol. 31, no. 5, pp. 703–709, 2006.
- [20] K. Bakirci, "Models of solar radiation with hours of bright sunshine: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 13, no. 9, pp. 2580–2580–2588, 2009.
- [21] H. Rodriguez Murcia, *Manual de radiacion solar en Colombia (Radiación sobre superficies horizontales)*. [S.l.: s.n.], 1992.
- [22] P. . Lancaster, "Cassava leaves as human food.," *Economic Botany*, vol. 37, no. 3, pp. 331–348, 1983.
- [23] D. . Rogers, "Cassava leaf protein.," *Economic Botany*, vol. 13, pp. 261–263, 1969.
- [24] E. M. Aregheore, "Nutritive Value and Inherent Anti-nutritive Factor in Four Indigenous Edible Leafy Vegetables in Human Nutrition in Nigeria: A Review," *Journal of Food Resource Science*, pp. 1–14, 2012.
- [25] L. Bertalanffy, *Teoría general de los sistemas: fundamentos, desarrollo, aplicaciones*. México: Fondo de Cultura Económica, 1976.
- [26] G. Spencer-Brown, *Laws of form*. London: Allen & Unwin, 1969.
- [27] L. Boi, P. Kerszberg, and F. Patras, *Rediscovering phenomenology phenomenological essays on mathematical beings, physical reality, perception and consciousness*. Dordrecht: Springer, 2007.
- [28] "ASHRAE," 19-Oct-2011. [Online]. Available: <http://www.ashrae.org/publications/page/158>. [Accessed: 19-Oct-2011].
- [29] "ASABE | Publications | Publications Catalog | Standards," 19-Oct-2011. [Online]. Available: <http://www.asabe.org/publications/publications-catalog/standards.aspx>. [Accessed: 19-Oct-2011].
- [30] Association of Official Agricultural Chemists (U.S.) and Association of Official Agricultural Chemists (U.S.). Committee on Editing Methods of Analysis, "Official methods of analysis of the Association of Official Agricultural Chemists," *Official methods of analysis of the Association of Official Agricultural Chemists*, 1950.
- [31] H. P. S. Makkar, S. Siddhuraju, and K. Becker, *Plant secondary metabolites*. Totowa, N.J.; Paisley: Humana ; Quantum, distributor], 2007.
- [32] "ASTM Site Search," 19-Oct-2011. [Online]. Available: <http://www.astm.org/search/site-search.html?query=solar+energy&cartname=mystore#25963280>. [Accessed: 19-Oct-2011].
- [33] G. Dieter, *Engineering design*, 4th ed. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2009.
- [34] F. Kreith and D. Y. Goswami, *Handbook of energy efficiency and renewable energy*. Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [35] D. Y. Goswami, F. Kreith, J. F. Kreider, and F. Kreith, *Principles of solar engineering*. Philadelphia, PA: Taylor & Francis, 2000.
- [36] O. Ekechukwu, "Review of solar-energy drying systems II: an overview of solar drying technology," *Energy conversion and management.*, vol. 40, no. 6, p. 615, 1999.

- [37] O. Ekechukwu, "Review of solar-energy drying systems III: low temperature air-heating solar collectors for crop drying applications," *Energy conversion and management*, vol. 40, no. 6, p. 657, 1999.
- [38] A. Topuz, "Moisture Ratio Prediction in Drying Process of Agricultural Products: A New Correlation Model," *Applied engineering in agriculture*, vol. 26, no. 6, p. 1005, 2010.
- [39] Z. Erbay, "A Review of Thin Layer Drying of Foods: Theory, Modeling, and Experimental Results," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 50, no. 5, pp. 441–464, May 2010.
- [40] S. Anwar, "Evaluation of convective heat transfer coefficient in crop drying under open sun drying conditions," *Energy conversion and management*, vol. 42, no. 5, pp. 627–637, 2001.
- [41] D. Jain, "Thermal aspects of open sun drying of various crops," *Energy: technologies, resources, reserves, demands, impact, conservation, management, policy*, vol. 28, no. 1, pp. 37–54, 2003.
- [42] G. N. Tiwari and S. Dubey, *Fundamentals of photovoltaic modules and their applications*. Cambridge, U.K.: Royal Society of Chemistry, 2010.
- [43] Y. Tripanagnostopoulos, "Hybrid photovoltaic thermal solar systems," *Solar energy*, vol. 72, no. 3, p. 217, 2002.
- [44] M. Othman, "Double-Pass Photovoltaic-Thermal Solar Collector," *Journal of energy engineering*, vol. 132, no. 3, p. 121, 2006.
- [45] V. . Tyagi, S. . Kaushik, and S. . Tyagi, "Advancement in solar photovoltaic/thermal (PV/T) hybrid collector technology," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 3, pp. 1383–1398, 2012.
- [46] A. Meinel, *Aplicaciones de la energía solar*. Barcelona: Reveré, 1982.
- [47] S. Anwar, *Convective heat transfer coefficient of crops in forced convection drying - an experimental study*. 520.
- [48] A. Hegazy, "Comparative study of the performances of four photovoltaic thermal solar air collectors," *Energy conversion and management*, vol. 41, no. 8, pp. 861–881, 2000.
- [49] A. Shahsavari, "Experimental investigation and modeling of a direct-coupled PV T air collector," *Solar Energy*, vol. 84, no. 11, pp. 1938–1958, 2010.
- [50] Anyanwu C.N, Oparaku O.U, Nwosu P.N, Onyegebu S.O, Ekwuatu U, Edem N.I, Egbuka K, and Sharma V.K, "Experimental Investigation of a Photovoltaic-Powered Solar Cassava Dryer," *Dry. Technol. Drying Technology*, vol. 30, no. 4, pp. 398–403, 2012.
- [51] Barnwal P and Tiwari G.N, "Grape drying by using hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) greenhouse dryer: An experimental study," *Sol. Energy Solar Energy*, vol. 82, no. 12, pp. 1131–1144, 2008.
- [52] A. Ibrahim, "Recent advances in flat plate photovoltaic thermal (PV T) solar collectors," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 1, pp. 352–365, 2011.
- [53] M. Alkilani, "Review of solar air collectors with thermal storage units," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 15, no. 3, pp. 1476–1490, 2011.
- [54] V. Belessiotis, "Solar drying," *Solar Energy*, 2010.
- [55] A. Sharma, "Solar-energy drying systems: A review," *Renewable and Sustainable energy reviews*, vol. 13, no. 6–7, pp. 1185–1210, 2009.
- [56] S. Østergaard Jensen, E. Fløjgaard Kristensen, and T. Forman, *Test of a solar crop dryer*. [Cph.]: Danish Technological Institute, 2001.

- [57] K. Ryu, J. G. Rhee, K. M. Park, and J. Kim, "Concept and design of modular Fresnel lenses for concentration solar PV system," *SOLAR ENERGY -PHOENIX ARIZONA THEN NEW YORK-*, vol. 80, no. 12, pp. 1580–1587, 2006.
- [58] F. P. Incropera and D. P. DeWitt, *Fundamentals of heat and mass transfer*. New York: Wiley, 1990.
- [59] Sze Pheng Ong and Chung Lim Law, "Hygrothermal Properties of Various Foods, Vegetables and Fruits," in *Drying of Foods, Vegetables and Fruits*, Sachin V. Jangam, Chung Lim Law and Arun S. Mujumdar., vol. Volumen 1, Singapor: , 2010, p. 232.
- [60] S. Jangam, "Conference Report: International Symposium on Processing and Drying of Foods, Vegetables and Fruits, April 11-12, 2011," *Drying Technology*, vol. 29, no. 9, 2011.
- [61] Y. Liu and Z. Jiang, "Reconsideration on the role of the specific heat ratio in Arrhenius law applications," *Acta Mechanica Sinica*, vol. 24, no. 3, pp. 261–266, 2008.
- [62] A. Marsh, "Solar Position and the Sun-Path," *Solar Position and the Sun-Path*. Oct-2012.
- [63] E. Aranovitch, "Thermal Collectors and Photovoltaic Cells," *Beghi, G., Ed; D. Reider*, pp. pp. 65–102, 1983.
- [64] D. Montgomery, *Design and analysis of experiments*, 3rd ed. New York: Wiley, 1991.
- [65] Hardenburg, R.E., *Almacenamiento comercial de frutas, legumbres y existencias de floristerias y viveros*. San José, Costa Rica.: , 1988.
- [66] S. A. Channiwala and P. P. Parikh, "A unified correlation for estimating HHV of solid, liquid and gaseous fuels," *Fuel.*, vol. 81, no. 8, p. 1051, 2002.
- [67] M. EL-Sharkawy, "Cassava biology and physiology," *Plant Molecular Biology*, vol. 53, no. 5, pp. 621–641, 2003.
- [68] A. Ayensu and V. Asiedubondzie, "Solar drying with convective self-flow and energy storage," *Solar & Wind Technology Solar & Wind Technology*, vol. 3, no. 4, pp. 273–279, 1986.
- [69] L. . Bal, S. Satya, and S. . Naik, "Solar dryer with thermal energy storage systems for drying agricultural food products: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 8, pp. 2298–2314, 2010.
- [70] R. Kumar and M. A. Rosen, "A critical review of photovoltaicthermal solar collectors for air heating," *Applied Energy Applied Energy*, vol. 88, no. 11, pp. 3603–3614, 2011.