

METODOLOGÍA PARA EL DISEÑO CONCEPTUAL DE COCINAS SOLARES

METHODOLOGY FOR THE CONCEPTUAL DESIGN OF SOLAR KITCHENS

A. F. MACÍA G.

*Instituto de Energía-Escuela Procesos. Y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín.
afmacia@unalmed.edu.co*

D.A. ESTRADA V.

Instituto de Energía-Escuela Procesos. Y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

F. CHEJNE J.

Instituto de Energía-Escuela Procesos. Y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

H. I. VELÁSQUEZ

Instituto de Energía-Escuela Procesos. Y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

R. RENGIFO

Instituto de Energía-Escuela Procesos. Y Energía, Facultad de Minas, Universidad Nacional de Colombia, Medellín

Recibido para revisar 10 de Junio de 2004, aceptado 3 de Agosto de 2004, versión final 17 de abril de 2005

RESUMEN: Se ha presentado una descripción detallada de la metodología para el diseño conceptual de cocinas solares, el cual permite su diseño detallado. La metodología se basa en tres fases principales que han sido natural e intuitivamente identificadas dadas las características y condiciones propias del proyecto: fase conceptual, fase de detalle y fase de ejecución.

PALABRAS CLAVE: Cocinas solares, energía solar, radiación

ABSTRACT: A detailed description of the methodology for the conceptual design of solar kitchens has appeared, which allows its detailed design. The methodology is based on three main phases that natural and have been very intuitively identified given to the characteristics and conditions of the project: conceptual phase, detail phase and execution phase.

KEYWORDS: solar kitchen, solar energy, radiation

1. INTRODUCCIÓN

Las cocinas solares son un ejemplo perfecto de tecnologías apropiadas que proveen alternativas para coadyuvar en el mejoramiento de las condiciones de vida de cientos de miles de personas en Colombia

(Ross,2002; Gordon, 1996). La desigual distribución de los recursos energéticos aunado a los bajos niveles de vida, los bajos ingresos y la adolescencia de adecuados servicios públicos (luz, acueducto, alcantarillado y teléfono), en muchas regiones y lugares del país, hacen necesario el estudio

y la aplicación de este tipo de tecnologías alternativas eficaces y de bajo costo.

Además la importante disponibilidad del recurso energético solar (Rodríguez y Gonzáles, 1992) a lo largo del año en nuestro país, los estudios e investigaciones recientes acerca de los materiales y principalmente acerca del mejoramiento de la eficiencia, sugieren reconsiderar el tema de las cocinas solares, reconstruyendo los prototipos existentes o desarrollando algunos nuevos. El uso de las cocinas solares permite reducir el consumo de combustibles convencionales, proteger los bosques y la degradación de los suelos, reduce la incidencia de las enfermedades respiratorias y oculares por los humos, puede reducir la incidencia de las enfermedades diarreicas, puede usarse para esterilizar diferentes elementos o instrumental quirúrgico.

En muchos países en desarrollo estos dispositivos pueden jugar un papel muy importante en el mejoramiento de la salud al permitir la disminución de la exposición a los gases producidos por la quema de madera para cocinar, a la vez que reduce la presión sobre los recursos forestales.

Por lo tanto los mercados identificados para el empleo de estos dispositivos son los lugares donde no hay disponibilidad o acceso a la energía eléctrica y/o al gas. Ejemplo de esto son regiones que se encuentran por fuera de la red de transmisión eléctrica nacional, donde incluso el consumo doméstico de energía eléctrica en zonas rurales electrificadas es generalmente muy bajo y los habitantes prefieren el uso de la leña u otro energético (GLP, gasolina, briquetas de carbón, etc) para la cocción de sus alimentos, y zonas marginales en las grandes ciudades. Los beneficios de las cocinas solares podrían también extenderse al campo del turismo, campamentos y campos de trabajo en regiones donde su aplicación sea viable.

Con el objeto de emprender un programa de diseño y construcción de cocinas solares para zona no interconectadas y de bajos recursos,

se plantea una metodología basada en tres fases principales que han sido natural e intuitivamente identificadas dadas las características y condiciones propias del proyecto: fase conceptual, fase de detalle y fase de ejecución. La fase conceptual considerada una de las más importantes de todo el proceso global y por tal motivo, se dará una descripción detallada en esta monografía.

El diseño conceptual (Pahl and Beitz, 1998; Wiston, 1994; Jenkins and Wiston, 1996; Feueman and Gordon, 1998; Harrison, 2001) es la etapa de contextualización, conceptualización, y formulación del proyecto. La idea principal de esta fase es hallar los parámetros básicos de diseño que a través de un marco teórico sólido posibilitan la presentación de propuestas de solución. En la fase de diseño de detalle se realiza la estructuración de la solución o soluciones previamente seleccionadas. Se hace un dimensionamiento detallado de los diferentes elementos que componen el sistema y se evalúan los métodos y materiales de construcción según su costo y disponibilidad.

En la actualidad los estudios e investigaciones en el área están encaminados al modelamiento, simulación y evaluación del desempeño y al nuevo diseño de prototipos o al mejoramiento de algunos ya existentes. En el Centro de Energía Solar de Florida trabajaron en simulación del desempeño térmico, simulación del desempeño óptico, estudio de materiales aplicables a las cocinas solares, desarrollo de un prototipo, realización de pruebas y la determinación en la factibilidad del policarbonato como material a emplear para lograr el efecto invernadero en las cocinas solares (Solar Energy Centre, 2002); Passamai y colaboradores realizaron estudio bibliográfico y puesta al día en el desarrollo de cocinas solares tipo caja, realizaron una comparación de dos cocinas: una pesada y una liviana con una cocina de gas convencional y adicionalmente, desarrollaron un modelo matemático que predice el comportamiento térmico de dichos equipos (Passamai et. al.,

2000; Passamai, 2000); Mohamad and Kader estudiaron los efectos de varios diseños de cocinas solares (Mohamad and Kader, 1998). Jonson and Edwards desarrollaron un metodo de diferencias finitas para la simulación de una cocina solar con almacenamiento sensible, las unidades de almacenamiento estan hechas de fundición y otra de granito (Jonson, R and Edwards J, 1994); El departamento de tecnología térmica solar realizó observaciones en las ratas de calentamiento y temperaturas máximas alcanzadas en la cocina solar de la empresa SUN OVEN (Sandia national laboratorios, 1997); EL comité para la energía solar estableció una prueba estándar cuyo objeto es promover uniformidad y consistencia en las pruebas y métodos de clasificación de las cocinas solares (ASAE, 2001); Harrison trabajó en la identificación de materiales reflectivos para posible uso en cocinas solares (Harrison, 2001); EL laboratorio nacional de energía renovable realizó la caracterización de superficies selectivas y descripción de los diferentes tipos de absorbedores (NREL, 2002); Wiston desarrollo un principio de

construcción de concentradores ideales con base en el método de rayos marginales (Wiston, 1996); Gordon (1998),elaboró un método de aceptación variable de rayos marginales para maximizar la concentración en absorbedor con una configuración determinada.

La descripción técnica de los sistemas de cocción se hace a partir de datos suministrados por los fabricantes o mediante pruebas realizadas por diferentes instituciones o grupos interesados en el área. Los factores que inicialmente sirven de evaluación que tratan de ser aspectos estándar de medición del desempeño, la aplicabilidad y aceptabilidad son: velocidades de calentamiento, temperatura máxima alcanzada, área de apertura, frecuencia de reposicionamiento, capacidad, dimensiones, peso, portabilidad y costos. En las Tablas 1, 2 y 3 se presentan un resumen de diferentes diseños de cocinas solares desde el punto de vista técnico, a la vez que pueden observarse numerosas configuraciones de estos sistemas.

Tabla 1. Resumen de especificaciones técnicas de algunas cocinas solares comerciales**Table 1.** Summary of engineering specifications of some commercial solar kitchens

Empresa productora	Modelos de cocinas				
Cocinas					
Tipo de cocina	Caja con reflectores externos	Caja con reflectores externos	Caja con reflectores externos	Caja	Caja con reflectores externos
Modelo	Villager Sun Oven	Global solar oven	T16	ULOG	Solar baked oven
Dimensiones (m)	1.2x1.2x1.8	0.5x0.5x0.28 sin reflectores	0.72x0.48x0.28	0.67x0.67x1.05	0.5x0.4x0.3 sin reflectores
Área de apertura (m ²)	-	0.25	-	0.24	0.20
Capacidad (L)	-	-	2.5	2.5	-
Máxima temperatura (agua)	-	-	-	91 °C en 120 min.	-
Máxima temperatura (aceite)	-	-	-	125°C en 130min.	-
Máxima temperatura (cocina vacía)	>260°C	>180°C	>180°C	-	>180°C
Peso (kg)	444	10	14	-	-

Tabla 2. Continuación resumen de especificaciones técnicas de algunas cocinas solares comerciales

Table 2. Summary of engineering specifications of some commercial solar kitchens

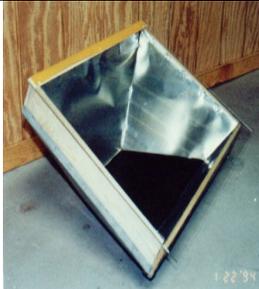
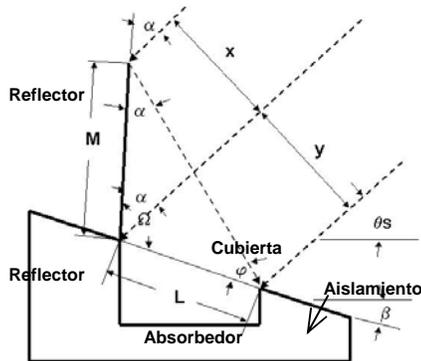
	Modelos de cocinas				
Empresa productora					
Cocinas					
Tipo de cocina	Caja	Concentración	Caja - eléctrica	Concentración	Concentración
Modelo	Sunstove	Freedom cooker II	Nutrenguard	SK12	Papillon
Dimensiones (m)	0.64x0.64x0.38	-	0.56x0.53x0.21	1.4x1.6x1.25	-
Área de apertura (m ²)	0.28	-	0.23	1.54 reflector	2
Capacidad (L)	1.5	-	-	6	6
Máxima Temperatura (agua)	87 en 120 min	-	-	96 en 150 min	80 en 20 min
Máxima temperatura (aceite)	114°C en 130 min	-	-	198 en 130 min	-
Máxima temperatura (cocina vacía)	-	>180°C	>150°C	-	>300°C
Peso (kg)	-	12	-	-	-

Tabla 3. Continuación resumen de especificaciones técnicas de algunas cocinas solares comerciales**Table 3.** Summary of engineering specifications of some commercial solar kitchens

	Modelos de cocinas				
Empresa productora					
Cocinas					
Tipo de cocina	Concentración	Concentración	concentración	Concentración	Concentración
Modelo	Solar reflex 600	Square parabolic	l'Zola stove	Sun flash	
Dimensiones (m)	0.6x0.6	0.9x0.9	0.9x0.8x0.3	-	
Área de apertura (m ²)	-	-	1.2	-	-
Capacidad (L)	-	-	-	-	-
Máxima Temperatura (agua)	-	-	-	-	-
Máxima temperatura (aceite)	-	-	-	-	-
Máxima temperatura (cocina vacía)	280°C	280°C	-	-	-
Peso (kg)	-	-	18	-	-

2. CONCEPTO Y GENERALIDADES DE LAS COCINAS SOLARES

Las cocinas solares representan una aplicación de la energía solar efectiva, simple y de bajo costo. Estos dispositivos, cuya construcción es factible a partir de diferentes materiales de disponibilidad local, emplean los principios básicos de la óptica geométrica y la física térmica para producir calor, lográndose temperaturas (alrededor de los 120° C) y tasas de calentamiento que permiten la cocción de una amplia variedad de alimentos, a la vez que amplían su utilización a la pasteurización de agua y la esterilización de elementos médicos.



2.1 ELEMENTOS COMUNES CONSTITUTIVOS DE LAS COCINAS SOLARES

Los principios de la óptica geométrica y la física térmica envueltos en el desarrollo de las cocinas solares son los relacionados con la reflexión y transmisión de la luz (radiación de onda corta), la absorción de la radiación, la transformación de ésta en energía térmica (radiación de onda larga) y la limitación de la transferencia hacia el medio circundante de la misma. El manejo físico y operativo de estos factores conlleva a que todos los sistemas de cocción solar tengan elementos comunes, ver Figura 1, con configuraciones y combinaciones diferentes, pudiendo estar presentes todos, o sólo parte de ellos, en un sólo diseño.

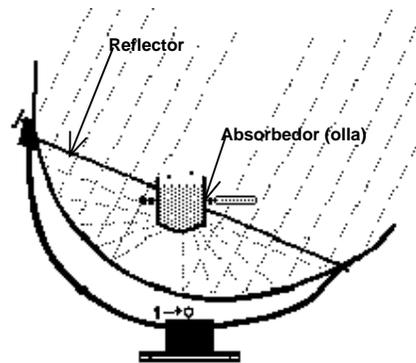


Figura 1. Elementos comunes constitutivos de una cocina solar

Figure 1. . Constituent common elements of a solar kitchen

2.1.1 Reflectores

Los reflectores se emplean como elementos de captación, transmisión y direccionamiento de la energía solar. La principal propiedad que deben tener es que puedan manejar la radiación con la mayor eficiencia posible, es decir, reduciendo las pérdidas ópticas (propias de la geometría del sistema) y las pérdidas térmicas (propias del material con el que están hechos).

2.1.2 Absorbedor

Con el absorbedor o receptor se logra un mayor control sobre el flujo de radiación que ingresa al sistema, ya que con él se pueden dar tasas de calentamiento más

rápidas (mayor velocidad transformando la energía solar en energía térmica y alcanzando la temperatura de equilibrio), permitiendo luego transferir esta energía por conducción al recipiente de cocción. El uso del absorbedor como entidad específica no siempre es necesario, en algunos diseños, el recipiente hace las veces de receptor con la ventaja de suprimir las pérdidas debidas a la transferencia por conducción, pero con la desventaja de requerir configuraciones geométricas que requieren reubicaciones mucho más frecuentes para una operación adecuada, además de que es propio de estas configuraciones tener valores de concentración más altos lo cual se traduce

en temperaturas de operación más elevadas lo que podría no ser del todo deseable.

2.1.3 Cubierta

Este componente puede tener diferentes formas dependiendo de dónde y cómo vaya ubicado. En una cocina tipo caja es la puerta de entrada para la radiación solar y define un encerramiento. En una cocina de concentración igualmente puede definir un encerramiento o estar solamente alrededor del recipiente de cocción. Su propiedad más importante es que debe ser transparente a la radiación solar y opaca a la radiación térmica para atrapar el calor y producir el efecto invernadero reduciendo de esta forma las pérdidas térmicas y aumentando la potencia del sistema.

2.1.4 Aislamiento

Como su nombre lo indica su objetivo es aislar el sistema del medio circundante y así

disminuir considerablemente el flujo de energía térmica hacia él.

2.2 CLASIFICACIÓN DE COCINAS SOLARES

Existen varios tipos de cocinas solares, cerca de cincuenta diseños principales, algunos de ellos patentados, y cerca de cien variaciones de éstos. Los diferentes tipos de cocinas pueden reunirse en tres grupos principales: cocinas tipo caja, cocinas concentradoras y cocinas indirectas.

Las cocinas tipo caja Consisten en una cámara térmica aislada, cubierta en su interior por superficies reflectoras y en donde por una de sus caras entra la radiación solar. Son muy populares y pueden construirse con materiales muy baratos. Su temperatura típica de operación se encuentra entre los 80 y los 120° C. Ver Figura 2.

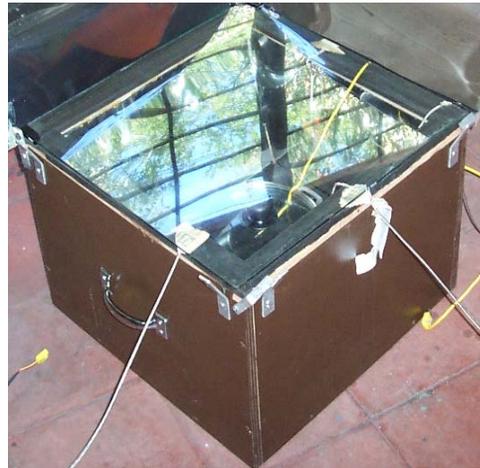


Figura 2. Algunos modelos de cocinas solares tipo caja.

Figure 2. Some models of solar kitchens type box.

Las cocinas de concentración se utiliza superficies reflectoras parabólicas, cilíndricas, cilindro-parabólicas, paraboloides o esféricas según sean bidimensionales o tridimensionales, o superficies simplemente planas. El recipiente que contiene los alimentos se

ubica en la zona focal. Su temperatura de operación se alcanza rápidamente y su magnitud depende en gran medida de la calidad de las superficies reflectoras, estas temperaturas se hallan entre los 70 y 220° C. Ver Figura 3.



Figura 3. Algunos modelos de cocinas solares de concentración
Figure 3. Some models of solar kitchens of concentration

Por último, en los hornos indirectos, se utilizan colectores solares convencionales usados en el calentamiento de agua, pueden ser colectores de placa plana o de tubos de calor, éstos calientan un fluido de trabajo que es enviado a calentar el horno o recipiente donde se cocinan los alimentos. Una de las ventajas de estos sistemas es que permite cocinar en el interior de la casa, pero son más complicados y costosos.

2.3 PRINCIPIOS DE DISEÑO

Los aspectos que deben tenerse en cuenta a la hora de diseñar, construir y/o optimizar una cocina solar se relacionan con la ganancia de energía, el almacenamiento de energía y con las pérdidas de energía.

En las cocinas tipo caja la ganancia de energía se da cuando la radiación incidente sobre la superficie receptora es absorbida y transformada en energía térmica, esta ganancia puede aumentarse al utilizar reflectores adicionales y con una orientación precisa de la cubierta. El almacenamiento de energía se obtiene debido a la irradiación térmica de los objetos en el interior del encerramiento que se van calentando, esta radiación de onda larga no puede escapar (efecto invernadero) y contribuye a la acumulación de energía en la cocina, por lo tanto la energía se almacena en el aire atrapado, en la superficie receptora y en el alimento que esta siendo cocido. Ver Figura 4.

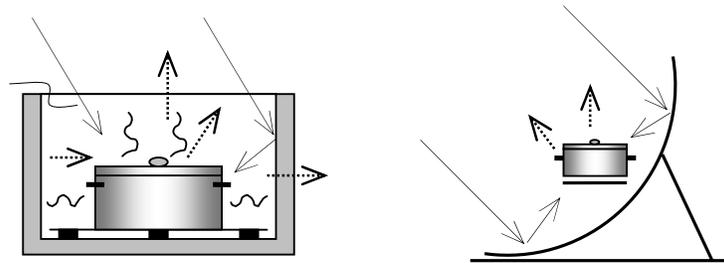


Figura 4. Principios de diseño, se muestran los flujos de energía: radiación incidente, efecto invernadero, pérdidas y cambios de aire en cocina tipo caja. Radiación incidente y pérdidas en cocina de concentración.

Figure 4. Principles of design, energy flows: incident radiation, effect conservatory, air losses and changes in kitchen type box. Incident radiation and losses in concentration kitchen

En las cocinas de enfoque la ganancia de calor se logra por concentración directa de la radiación solar sobre el recipiente que contiene los alimentos. El almacenamiento de energía se da dependiendo si la cocina tiene cubierta protectora ya sea para todo el sistema o sólo para el recipiente. En ambos casos las pérdidas de energía se dan por los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación.

2.4 SEGURIDAD ALIMENTARIA EN LA COCCIÓN

La salubridad de los alimentos cocidos por medio de cualquier método, sean éstos al vapor, húmedos o en seco, requiere que se cumpla con condiciones específicas y estrictas, ver Tabla 4, independientemente de si el proceso se lleva a cabo en estufas eléctricas, a gas, de leña, hornos microondas u hornos solares.

Tabla 4. Temperaturas mínimas internas recomendadas para algunos alimentos y tiempo mínimo requerido para la eliminación de agentes patógenos

Table 4. Internal minimum temperatures recommended for some foods and minimum time required for the elimination of pathogenic agents

Tipo de alimento	Temperatura mínima interna recomendada	Tiempo mínimo
Aves de corral sin despresar. Muslos y alas.	83°C	15 s
Aves de corral. Pechugas solamente. Carne de res y cerdo bien hechas	77°C	15 s
Rellenos y recalentamiento de comidas sobrantes	73,5°C	15 s
Carne de res y de cerdo término medio. Embutidos. Huevos.	72°C	15 s
Carne de res término bajo. Carne de cordero. Pescado	63°C	3 min
	ZONA PELIGROSA (10°C – 52°C) CRECIMIENTO DE BACTERIAS	Tiempo máximo de permanencia 2 horas

Todos los alimentos crudos de origen animal como huevos, pescado, carnes de ganado vacuno, porcino y de aves de corral y cualquier combinación de éstos deben ser suficientemente cocidos hasta que todos los microorganismos potencialmente dañinos sean destruidos. La temperatura interna mínima a la cual los patógenos son eliminados depende del tipo de alimento que esta siendo preparado (Ver tabla 4). Es importante cocer los alimentos en los valores prescritos para asegurar que sean aptos para el consumo humano o procurar que no permanezcan por más de dos horas en la zona de peligro si se encuentran en ella.

En lo referente a la operación de las cocinas solares es importante destacar que es

igualmente peligrosa la cocción parcial de los alimentos, dado que no se alcancen las temperaturas necesarias, como podría ocurrir en días de baja radiación solar o al final de la tarde. Por lo tanto los alimentos parcialmente cocidos deben ser enfriados a temperaturas por debajo de los 10°C o deben terminarse de cocer con alguna energía alterna. Si los alimentos han permanecido por más de dos horas en franja de peligro pueden causar intoxicación así no haya señales visibles que indiquen que el producto no está en buenas condiciones. Recalentar el alimento no corrige el problema ya que el calor no inactiva las toxinas ya liberadas por las bacterias.

3. DISEÑO CONCEPTUAL

Desde el punto de vista técnico los principios físicos que deben considerarse para diseñar y construir un dispositivo que permita la cocción y/o pasterización son simples; además, la disponibilidad de los insumos requeridos para su elaboración es muy alta, ya que son elementos de fácil consecución. Así, estos aspectos son los que allanan el camino para que exista un número muy alto tanto de diseños originales de hornos solares como variaciones de éstos, cuyo objeto último es facilitar medios asequibles, técnica y económicamente, por los cuales los alimentos puedan prepararse, y por ende contribuir a que una necesidad básica como lo es la alimentación pueda ser satisfecha.

En la revisión bibliográfica y del estado del arte no se encontraron mayores evidencias que indiquen que la metodología empleada en el diseño y construcción de los hornos solares sea diferente a la de ensayo y error, a excepción de lo hecho por parte de algunas instituciones universitarias y organizaciones no gubernamentales en distintos lugares del mundo. Sin importar el método siempre se busca obtener mejoras en cuanto a la practicidad y desempeño térmico del dispositivo de manera tal que se puedan lograr mayores niveles de aceptación entre los posibles usuarios de éstos, es decir, lograr diseños óptimos.

3.1 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

Se plantea algunos aspectos relevantes para la formulación global o generalizada del problema, cuyo fin es identificar el mayor número de elementos que facilite el establecimiento de una estrategia global de solución (Ver Tabla 5).

Para atacar los diferentes ítems planteados en la Tabla 5 se propone una estrategia que permita:

- Estudiar los principios y mecanismos físicos involucrados en la transferencia de energía solar desde la fuente hasta su recepción en los sistemas de cocción solar de manera tal que los parámetros determinantes sean identificados e incorporados a la solución a estructurar.
- Estudiar lo concerniente a la cocción de alimentos de manera tal que pueda diseñarse una aplicación cuya

operación sea segura para la salud humana.

- Estudiar algunos factores socio-culturales y prácticos que puedan afectar la aceptabilidad de los sistemas diseñados y a diseñar, y así por lo tanto tratar de encontrar un equilibrio entre la parte teórica, lo esperado y lo deseable en sistemas de esta índole.

Tabla 5. Lista de problemas esenciales identificados y su aplicabilidad en el desarrollo del proyecto

Table 5 List of essential problems identified and its applicability in the development of the project

Problemas esenciales	Aplicabilidad
Optimizar diseños actuales	Sí
Hacer diseños completamente nuevos o mejorar actuales	Sí
Hacer diseños modulares	No necesariamente
Hacer diseños funcionales y estéticos	Sí
Hacer diseños económicos	Sí
Identificar razones que afectan la aceptación por parte del usuario	Sí

3.2 FACTORES QUE AFECTAN LA ACEPTABILIDAD POR PARTE DE LOS USUARIOS DE LAS COCINAS SOLARES

Hasta ahora, no hay un estudio comparativo detallado de la aceptación de los diferentes modelos de cocinas solares por parte de los usuarios, por lo tanto no es completamente claro que tipo de cocina es mejor aceptada en ciertas condiciones. Algunas preguntas se plantean tratando de encontrar razones potenciales que puedan explicar los factores que afectan la aceptabilidad de estos sistemas:

- ¿Se adapta el sistema a las necesidades y hábitos del usuario?
- ¿Son las cocinas solares lo suficientemente prácticas, es decir, podrían usarse para freír, hornear, cocinar; además de cocinar en formas tradicionales, esto es, tener fácil acceso a los recipientes, poder revolver, etc.?, y si no, ¿Qué implicación tiene esto?
- ¿Se requieren mayores niveles de radiación solar?

- ¿Qué tan desfavorable es la implicación inherente de la dificultad para cocinar en las primeras horas de la mañana y las últimas de la tarde?
- ¿Son lo suficientemente económicas?
- ¿Son sus desempeños térmicos, ratas de calentamiento y temperaturas máximas, lo suficientemente buenos?
- ¿Los intervalos de reposicionamiento son muy cortos?

Estos cuestionamientos permiten establecer, más que respuestas definitivas, ciertas consideraciones a tener presentes en la búsqueda de soluciones que se ajusten a las condiciones mismas de operación y cualidades intrínsecas de este tipo de equipos. Por lo tanto lo más importante es evaluar la pertinencia de diseñar soluciones para cada aplicación en particular evaluando cada uno de los aspectos tratados anteriormente o tratar de lograr soluciones integrales en las que deben hacerse concesiones en los distintos aspectos funcionales para obtener un resultado balanceado y satisfactorio.

3.3 ESPECIFICACIÓN

En la Tabla 6 se presenta la lista de los requerimientos que deben lograrse en la solución final. Estas metas específicas son detalladas, claras, concisas y permite definir un mejor camino a seguir para la solución del problema.

3.4 ESTABLECIMIENTO DE LA ESTRUCTURA DE FUNCIONES

De acuerdo con los requerimientos presentados en la sección anterior se crea

una estructura de funciones con el objeto de ver claramente las diferentes y posibles relaciones que se dan entre las entradas y salidas del sistema considerado. En la Figura 5 se muestra la función principal (cocinar) con sus respectivas señales de ingreso (potencia solar, masa sin cocer) y de egreso (pérdidas térmicas, masa cocida), luego esta función es dividida en subfunciones tratando de esbozar los posibles mecanismos físicos involucrados en el proceso, de manera tal que se facilite la búsqueda subsecuente de soluciones particulares encaminadas a la consecución de las mejores propuestas que satisfagan de manera integral la función principal planteada.

Tabla 6. Lista de requerimientos

Table 6. List of requirements

Requerimientos	Estatus
Rango temperatura de cocción: 80 – 120°C	Exigido
Tiempo para alcanzar temperatura segura de cocción (60° C): máximo 1,5 horas	Exigido
Fácil construcción	Exigido
Manejo fácil y seguro	Exigido
Tolerancia a errores de orientación y baja frecuencia de reposicionamiento (cocción solar pasiva)	Deseable
Relación costo-beneficio adecuada	Deseable
Cocción desatendida por largos periodos de tiempo	Deseable
Multipropósito: asar, freír, cocinar	Deseable

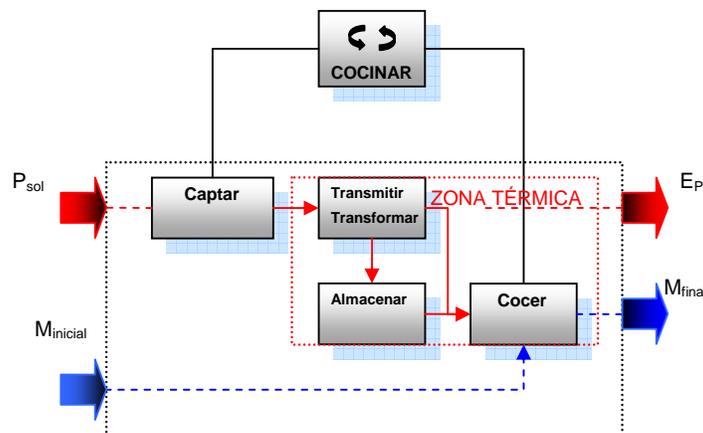


Figura 5 Estructura de funciones
Figure 5 Structure of functions

Cada una de las sub-funciones en las que se ha dividido la función principal se explicará en los siguientes ítems:

3.4.1 Captar

La forma en la que se lleve a cabo la captación de la energía solar es un factor crítico para el desempeño térmico del horno solar. La eficiencia con la que la radiación solar es colectada depende fuertemente de las configuraciones geométricas, la forma de las superficies y la orientación de las mismas. La frontera divisoria entre la captación y la transmisión de la energía no está muy definida, pero puede decirse que la captación tiene que ver más con aspectos espaciales condicionados por las características de distribución de la energía solar según las zonas de la tierra en las cuales se desarrolla la aplicación, es decir, la configuración global y disposición del sistema.

3.4.2 Transmitir, transformar

Habiendo definido la captación de energía en términos de configuraciones espaciales, la transmisión busca la forma de manejar la energía que ingresa al sistema de una manera eficiente, reduciendo al máximo las pérdidas ópticas y dirigiéndola a un punto específico para su transformación.

La transformación de la energía tiene que ver con la estrategia empleada para la ganancia rápida de energía térmica por parte del sistema al transformar la radiación de onda corta proveniente del sol.

3.4.3 Almacenar

El almacenamiento de la energía transformada se da como consecuencia de la necesidad de ir acumulando la energía ganada con miras a alcanzar mayor potencia energética disponible para la cocción y alcanzar mayores velocidades de calentamiento al disminuir la energía que por las condiciones termodinámicas del sistema y de no mediar un método de supresión se depositaría en el ambiente.

3.4.4 Cocinar

Esta subfunción tiene que ver con los recipientes como tal para la cocción. Los mecanismos mediante los cuales la cocción de alimentos se da están estrechamente

relacionados con todas las subfunciones anteriores, lo importante es hallar soluciones que permitan la utilización de la energía ganada de manera eficaz, manteniendo un equilibrio que no afecte significativamente el desempeño térmico y óptico del sistema.

3.4.5 Principios de solución

El plan general con el cual se abordará la búsqueda de los principios de solución para cada una de las subfunciones establecidas en la sección anterior, cuyo objeto es identificar, analizar y determinar los posibles principios físicos, y sus variables fundamentales, que satisfagan y den cumplimiento al grupo de acciones establecidas mediante la estructura de funciones, además de examinar la viabilidad de sus respectivas implementaciones, es el siguiente:

- Abordar el estudio de la radiación solar y hallar las consideraciones y los parámetros relevantes que deban ser tenidos en cuenta para la elaboración de un principio de solución para el sistema en desarrollo.
- Abordar el estudio de los principios de la óptica que sean de interés y/o cuya área de aplicación y/o principio intrínseco parezcan de interés para el presente proyecto, y determinar las consideraciones y los parámetros básicos requeridos para la elaboración de un principio de solución.
- Abordar el estudio de los diferentes mecanismos de transferencia de calor, y de masa si es necesario, que estén posiblemente involucrados en el desempeño térmico del sistema a desarrollar. Determinar las consideraciones y los parámetros básicos que sean importantes para la elaboración de un principio de solución.
- Emplear una metodología que permita depurar, evaluar y preseleccionar las propuestas de solución eventualmente planteadas. Plantear un modelo o modelos matemáticos, para diseños preseleccionados solamente, que den cuenta de la evolución del proceso y del desempeño térmico del sistema con miras a observar relaciones más estrechas entre cada uno de los

elementos del sistema y por ende tener mayores criterios para el dimensionamiento, la optimización y la presentación de un diseño final.

3.5 TEORÍA BÁSICA

En este ítem se presentan los principios físicos estudiados, en sus aspectos más importantes, sus resultados más significativos y sus fundamentos teóricos. Posteriormente a la exposición de los principios físicos de solución se elaboran propuestas de solución globales para el sistema de cocción, se sugieren detalles físicos más específicos y se estiman dimensiones generales. Al final de la sección estarán sentadas todas las bases preliminares a la simulación del desempeño de los diseños de sistemas preseleccionados.

3.5.1 Radiación solar, consideraciones geométricas básicas

El desempeño óptico y térmico del sistema esta condicionado fuertemente por las condiciones de radiación solar, es decir, condiciones climáticas, ubicación geográfica y orientación del sistema. Colombia por estar localizado muy cerca del ecuador terrestre tiene unas condiciones favorables de radiación solar a lo largo del año, sumado a las numerosas regiones del país donde las condiciones climáticas permiten su pleno aprovechamiento. Adicionalmente, en esta ubicación, los movimientos aparentes del sol en el cielo a lo largo del año no son drásticos y no representan una dificultad mayor a la hora de diseñar el sistema. El ángulo que hace la radiación solar con la normal a la horizontal en un lugar determinado cuando el sol se encuentra en el cenit esta dado por los movimientos aparentes a través del año y por la latitud del lugar, en Colombia este ángulo estaría, con mínimas cambios en el año, entre los 0° y los 10° , en el caso de Medellín este es 6.14° (6.14° latitud norte). Resta por conocer entonces la dirección de los rayos solares sobre una superficie específica a lo largo del día.

3.5.2 Principios de óptica aplicados a los concentradores de energía solar

En este apartado se hace mención y se presenta la óptica relacionada con los

concentradores formadores y no formadores de imagen de una manera concisa y clara buscando exponer los aspectos de mayor relevancia que este tipo de dispositivos presentan en su concepción. No se hará un desarrollo paso a paso ni demostrativo en este documento ya que esto escapa al alcance del mismo, además que provocaría la desviación completa del objetivo principal que es determinar los principios físicos útiles que sirvan para hallar y formular posibles soluciones a las subfunciones con anterioridad especificadas. Con el fin de dar continuidad pero sin afectar la congruencia del presente trabajo se hará referencia a los conceptos necesarios para exponer las ideas más importantes, pero se sugiere a lector dirigirse a la bibliografía que aquí ha sido empleada o a los anexos según sea el caso, cuando se desee hacer un análisis en mayor extensión y profundidad del tema.

El estudio de los sistemas de concentración solar se abordará sólo desde el punto de vista de la geometría óptica, es decir, el comportamiento de la luz cuando incide sobre superficies reflectoras y cuando penetra en superficies refractoras.

La idea intuitiva que fundamenta este estudio es el rayo de luz, definido toscamente, como el camino o el trayecto a través del cual la energía lumínica viaja, junto con dos tipos de superficies las cuales o bien reflejan o bien transmiten la luz. Cuando la luz es reflejada por una superficie suave ésta obedece la muy bien conocida ley de la reflexión la cual expresa que los rayos incidentes y los reflejados hacen ángulos iguales con respecto a la normal de la superficie en el punto de incidencia y que los rayos y la normal se encuentran sobre un mismo plano. Cuando la luz es transmitida la dirección del rayo es cambiada de acuerdo con la ley de la refracción, ley de Snell, la cual establece que la razón entre el seno del ángulo de incidencia y el seno del ángulo de refracción, cuando la luz pasa de un medio uno a un medio dos es una constante, conocida como el índice de refracción, siendo los tres igualmente coplanares.

3.5.3 Principios básicos de los concentradores solares no productores de imagen

Aunque las lentes y los espejos concentran la luz, no son los mejores dispositivos para este cometido. En realidad, el comportamiento de cualquier dispositivo óptico capaz de concentrar la luz formando una imagen se distancia bastante de lo esperado teóricamente. Esto se debe a que aunque las imágenes formadas por estos lentes y espejos son casi perfectas en el punto focal, dichas imágenes resultan distorsionadas lejos de éste. Por lo tanto mayores eficiencias en las concentraciones de la radiación se pueden lograr si se dejan de lado toda una serie de requisitos relacionados con la formación de una imagen. Los dispositivos diseñados con este fin reciben el nombre de concentradores sin imágenes, los cuales se comportan como un embudo.

La radiación que penetra al concentrador por una superficie mayor se refleja de tal manera que atraviesa una superficie menor. Este proceso destruye cualquier imagen de la fuente luminosa pero dado que el interés está sólo en el efecto de concentración la formación de imagen alguna es completamente innecesaria, lo realmente importante es tener una mayor intensidad de rayos solares por unidad de área.

El empleo de los dispositivos ópticos de no imagen obedece al deseo de diseñar concentradores solares que no necesiten orientarse para ir siguiendo la trayectoria del sol, ya que la utilización de sistemas de seguimiento se basan en el uso de máquinas complicadas y los gastos de la instalación y mantenimiento repercuten en el costo de la utilización de la energía solar.

3.5.3.1 Método de la cuerda (o de los rayos marginales). El concentrador se construye de manera tal que todos los rayos luminosos que entran el dispositivo según cierto ángulo de incidencia máximo (θ_a) sean dirigidos (Gordon, 1996), tras sufrir como mucho una sola reflexión, hasta el orificio de salida. Se puede comprender cómo funciona este dispositivo haciendo deslizar un trozo de cuerda (HBC) a lo largo de una barra (HA), tal como se puede apreciar en la Figura 6. En el diagrama se puede observar la cuerda en varias etapas

del proceso de desplazamiento, en cada etapa la cuerda se mantiene tensa en una dirección paralela a los rayos de luz incidente. Más tarde, la cuerda se dobla bruscamente para ir a buscar el orificio de salida (punto C), y así la longitud total de la cuerda permanece inalterada. Los puntos para los cuales la cuerda se dobla definen la pared del concentrador. Todos los rayos restantes del haz, correspondientes a los ángulos intermedios, se reflejan en algún punto del receptor CD, un fenómeno que en dos dimensiones se produce de manera perfecta y de forma casi perfecta en tres dimensiones.

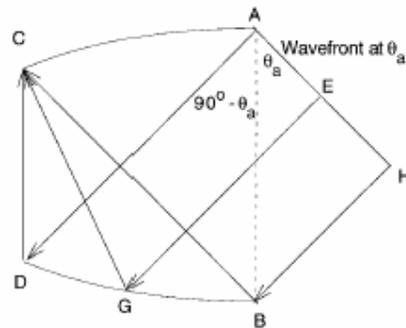


Figura 6. Construcción por el método de la cuerda de un concentrador parabólico compuesto (CPC) clásico. Receptor CD. Apertura de entrada AB. Frente de onda incidente máximo AH. Reflectores del concentrador parabólico compuesto (CPC) AC y BD. Longitud de la cuerda $AD+DC = EG+GC = HB+BC$.

Figure 6. Construcción por el método de la cuerda de un concentrador parabólico compuesto (CPC) clásico. Receptor CD. Apertura de entrada AB. Frente de onda incidente máximo AH. Reflectores del concentrador parabólico compuesto (CPC) AC y BD. Longitud de la cuerda $AD+DC = EG+GC = HB+BC$.

La longitud constante del camino óptico ($AD+DC = EG+GC = HB+BC$) requiere que el reflector sea el lugar geométrico de los puntos que equidistan de un punto y una línea, lo que representa un arco parabólico rotado, relativo al eje óptico, con un ángulo máximo θ_a y con el foco en C.

Los perfiles conseguidos a partir de este concepto se conocen como diseños de rayos marginales, de los cuales pueden realizarse algunas variaciones dependiendo de la

configuración geométrica del receptor (Ver Figura 7).

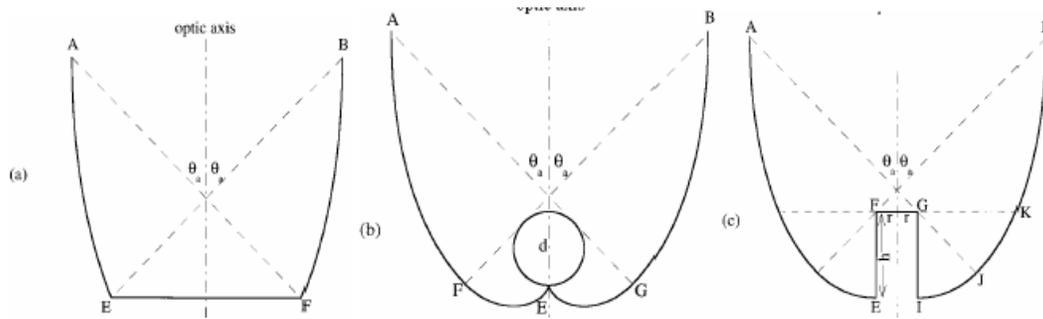


Figura 7 Secciones transversales de concentradores diseñados con el método de rayos marginales
Figure 7. Transversal sections of concentrators designed with the marginal ray method

En la Figura 7 se tiene:

- (b): Con un receptor circular (esférico en 3D) de diámetro d . Los reflectores BG y AF se obtienen a partir del requerimiento de que los rayos incidentes extremos sean reflejados tangentes al receptor. La sección del reflector GE, por debajo de la línea punteada, es la evoluta de un arco circular.
- (c): Con un receptor rectangular (cilíndrico en 3D) que incluye el extremo superior pero no el inferior. Los reflectores son una combinación de secciones de parábola y evolutas. IJ es un arco circular (la evoluta de una línea recta) de radio h y centro en G. JK es el arco de una parábola con su foco en G y GJ como su eje. KB es el arco de una parábola con su foco en F y su eje es paralelo a GJ.

Para lograr concentradores tridimensionales a partir de estas configuraciones lo único que se debe hacer es rotar la geometría alrededor del eje de simetría. Debe tenerse en cuenta que aunque los concentradores citados anteriormente son ideales en sus versiones bidimensionales, no lo son así en sus versiones tridimensionales.

3.5.3.2 Método del flujo vectorial geométrico. En este método se supone que el conjunto de los rayos ópticos que atraviesan un sistema se comporta en principio como un fluido. Luego, en vez de atravesar el espacio en el sentido usual de la

palabra, dichos rayos atraviesan un espacio físico, una región abstracta constituida por las posiciones y direcciones de los rayos. La magnitud del flujo vectorial geométrico está relacionado por lo tanto con los valores de estas posiciones y direcciones. El diseño de un concentrador para una aplicación determinada ocurre de suerte tal que dicho flujo se conserve, es decir, que no sufra ninguna perturbación.

3.5.4 Factor de concentración

Pueden darse dos definiciones de factor de concentración: La primera definición es estrictamente geométrica (concentración geométrica), la cual es la razón del área de apertura al área del receptor.

$$FC = FC_{\text{área}} = \frac{A_{\text{apertura}}}{A_{\text{receptor}}}$$

La segunda definición está dada en términos de la razón de la intensidad de la radiación en la apertura a la intensidad de la radiación que alcanza el receptor. Este factor considera, además de los efectos geométricos, los efectos de absorción.

$$FC = FC_{\text{intensidad}} = \frac{I_{\text{apertura}}}{I_{\text{receptor}}}$$

Estrechamente relacionado con el factor de concentración está el ángulo de aceptación, el cual es el rango angular en el cual todos o casi todos los rayos que se encuentran

dentro de él son aceptados sin necesidad de orientar o reorientar el colector.

El factor de concentración máximo posible está condicionado por la segunda ley de la termodinámica (Feuermann D et,al. 1998), por lo tanto para un ángulo de aceptación θ_a dado y un concentrador bidimensional, éste factor es:

$$C_{\text{ideal 2D}}^{\text{max}} = \frac{1}{\text{sen}(\theta_a)}$$

La correspondiente concentración máxima tridimensional es:

$$C_{3D}^{\text{max}} = \frac{1}{\text{sen}^2(\theta_a)}$$

El diseño de un concentrador no productor de imagen estará determinado principalmente por el grado de concentración que se requiera alcanzar según la aplicación, pero además debe tratar de hallarse un compromiso entre los desempeños térmico y óptico. Así, por ejemplo, el tamaño del absorbedor debe ser lo suficientemente pequeño para reducir las pérdidas térmicas pero aun lo suficientemente grande como para que pueda interceptar toda, o casi toda, la radiación incidente en el rango especificado.

3.5.5 Propiedades ópticas de los materiales para las aplicaciones de energía solar

Las dos propiedades ópticas más importantes son la absorción y la transmitancia, a continuación se hará una breve explicación de su influencia en el desempeño de los equipos.

3.5.5.1 Absortancia solar. La absorción de las superficies reales depende de la longitud de onda de la radiación incidente. En la mayoría de las aplicaciones de ingeniería se usan valores medios de esta propiedad que son medidos sobre longitudes de onda mayores, es decir, en el rango de la radiación térmica. Para muchas superficies la absorción de radiación de longitud de onda pequeña difiere de manera importante respecto a la absorción de

radiación de longitud de onda grande siendo por lo tanto este aspecto de especial cuidado al momento de seleccionar los materiales a ser empleados en los sistemas de cocción.

3.5.5.2 Transmitancia solar. La transmitancia de los materiales semitransparentes reales depende igualmente de la longitud de onda incidente; de esta manera, la transmitancia correspondiente a la radiación visible, de longitudes de onda pequeña, puede ser muy diferente de la transmitancia a la radiación infrarroja, de longitudes de onda grandes. Así, para el vidrio se tienen transmisiones elevadas de radiación de onda corta ($>2\mu\text{m}$), pero es casi opaco a longitudes de onda grandes ($>3.4\mu\text{m}$) (ver tablas 7 y 8).

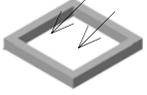
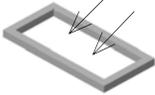
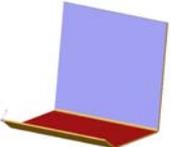
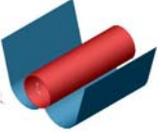
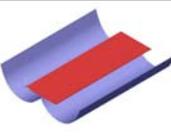
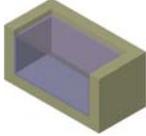
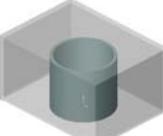
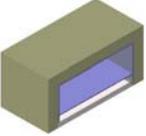
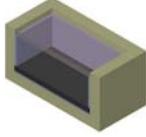
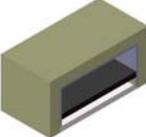
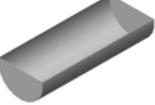
3.5.6 Combinación de los principios y determinación de las variantes de solución

El estudio de los principios y los fenómenos físicos involucrados de una u otra forma en las características de operación y desempeño de las cocinas solares ha permitido construir un campo propicio para el desarrollo de posibles soluciones que satisfagan los requerimientos establecidos. Haciendo una síntesis de los principios de solución expuestos y con base en la estructura de funciones propuesta se realiza un arreglo sistemático de éstos que facilite su identificación su combinación adecuada. Ver Tabla 7.

Organizados los principios de solución de manera clara y concisa se procede ahora a la combinación de los mismos bajo las siguientes consideraciones:

- Combinación sólo de subfunciones compatibles.
- Considerar sólo las combinaciones que cumplan los requerimientos.
- Hacer énfasis en combinaciones prometedoras.

Tabla 7. Principios de solución
Table 7. Principles of solution

			A	B	C	D	E	
I	Captar Energía	1	 Área de captación cuadrada	 Área de captación rectangular	 Área de captación invertida	 Área captación abierta		
ii		Transmitir Transformar	2	 Superficies reflectoras verticales	 Superficie concentradora, recepción por el recipiente en el foco	 Paneles reflectores	 Receptor de sección cilíndrica	 Sistema invertido
			3	 Superficies reflectoras inclinadas	 Superficie concentradora, recepción en placa	 Recepción adicional por debajo	 Receptor de sección cuadrada	SIN TRANSMISIÓN. TODAS LAS SUPERFICIES NEGRAS
			4	 Superficies reflectoras de perfil parabólico				
iii	Almacenar	5	 Aislamiento + efecto invernadero	 Cubierta transparente, E.I.	 Invertido, aislamiento + e.i.	SIN ALMACENAMIENTO		
		6	 Aislamiento + efecto invernadero + acumulación	 Cubierta transparente para el recipiente formando E.I.	 Aislamiento + acumulación + efecto invernadero			
I v	Cocinar	7	 Placa absorbente, placa de cocción	 Recipiente cilíndrico para receptor cilíndrico	 Recipiente tipo caja para receptor perfil cuadrado	 Recipiente convencional		

En las Tablas 8 y 9 se muestran las diferentes combinaciones efectuadas. En la

Tabla 14 se relacionan los diferentes colores.

Tabla 8. Combinación de los principios de solución
Table 8. Combination of the solution principles

			A	B	C	D	E
i	Captar Energía	1					
		2					
ii	Transmitir Transformar	3					
		4					
		5					
iii	Almacenar	6					
		7					
iv	Cocinar	7					

Tabla 9. Continuación combinación principios de solución
Table 9. Continuation combination solution principles

			A	B	C	D	E
i	Captar Energía	1					
		2					
ii	Transmitir Transformar	3					
		4					
		5					
iii	Almacenar	6					
		7					
iv	Cocinar	7					

Tabla 10. Lista de variantes de solución obtenidas a partir de la Tabla 8
Table 10. List of variants of solution obtained from Table 8

	Nº	Variante		Nº	Variante
	1	1B 2A 5A 7D		9	1B 2D 5A 7B
	2	1B 3A 5A 7D		10	1B 3D 5A 7C
	3	1B 4A 5A 7D		11	1B 3D 5A 7D
	4	1D 3B 5C 7D		12	1D 2C 6B 7D
	5	1B 3E 5A 7D		13	1B 4A 6A 7D
	6	1D 2B 6B 7D		14	1D 3C 5D 7A
	7	1C 2E 5C 7D		15	1B 3D 5B 7C
	8	1C 2E 5D 7A		16	1D 3B 5D 7A

La descripción de las variantes relacionadas en la Tabla 10 se ilustra en la Tabla 11.

Tabla 11 Descripción de las variantes de solución
Table 11. Description of the solution variants

Variante	Descripción
1	Cocina tipo caja- paredes reflectivas verticales- aislada- iluminada desde arriba- recipiente convencional
2	Cocina tipo caja- paredes reflectivas inclinadas- aislada- iluminada desde arriba- recipiente convencional
3	Cocina tipo caja- paredes reflectivas perfil CPC- aislada- iluminada desde arriba- recipiente convencional
4	Cocina de concentración-plancha aislada-iluminada desde abajo- recipiente convencional
5	Cocina tipo caja sin transmisión- todas las superficies negras- aislada- recipiente convencional
6	Cocina de concentración-recipiente ubicado en el foco- recipiente aislado- recipiente convencional
7	Plancha-iluminada desde arriba y desde abajo-recipiente convencional- recipiente aislado por caja transparente
8	Plancha- iluminada desde arriba y desde abajo- cocción directa sobre la plancha
9	Cocina de concentración-aislada-receptor cilíndrico-recipiente cilíndrico
10	Cocina de concentración- aislada- receptor de sección. cuadrada- recipiente de sección cuadrada
11	Cocina de concentración- aislada- receptor de sección cuadrada- recipientes convencionales
12	Paneles reflectores-recipiente aislado por cubierta transparente
13	Cocina tipo caja-perfil CPC-aislada-con acumulación
14	Cocina de concentración reflectores CPC- receptor plano- cocción directa sobre la plancha
15	Cocina de concentración- receptor transparente de sección cuadrada
16	Cocina de concentración-plancha en el foco

A pesar de haberse obtenido un gran número de variantes de solución es importante reducir el número de aquellas que aunque técnicamente viables no lo son así desde el punto de vista práctico. Sin embargo debe prestarse cuidado al hecho de

no eliminar variantes que pueden ser interesantes. Por lo tanto se han seleccionado algunos criterios de evaluación para esta etapa de manera tal que sólo las variantes más prometedoras sean preseleccionadas. Ver Tabla 12.

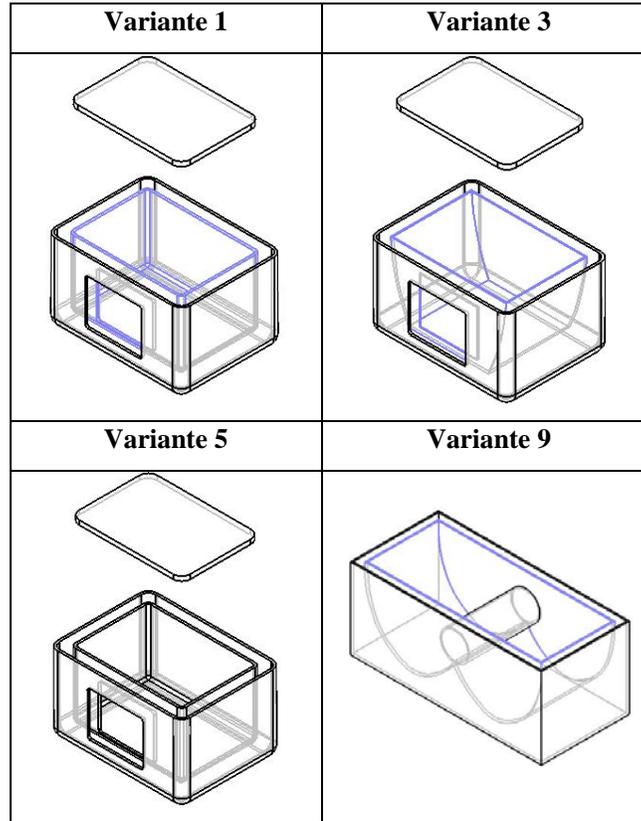
Tabla 12. Preselección de variantes de solución
Table 12. Preselection of solution variants

VARIANTE	Criterios							CRITERIOS EVALUACIÓN	DECISIÓN
	A	B	C	D	E	F	G	DETALLES	
	√: Sí -: No ?: falta información							A: Compatibilidad con la función principal. B: Cumplimiento de los requerimientos. C: Realizable en principio. D: Es factible económicamente. E: Preferencia. F: Información suficiente	
1	+	+	+	+		+			√
2	+	?	+			+		Cumple la función principal pero la información sugiere menor eficiencia óptica	-
3	+	+	+	+		-			√
4	+	?						Frecuencias de ubicación, obstrucción óptica, mayores pérdidas térmicas, menor tolerancia a los errores de ubicación	-
5	+	+	+	+		-			√
6	+		+			+		Frecuencias de ubicación, obstrucción óptica, mayores pérdidas térmicas, menor tolerancia a los errores de ubicación	-
7	?	?							-
8	?	?	+						-
9	+	+	+	?		+		¿Qué tan costoso es comparado con los otros sistemas?	√
10	+	?	+			-		No hay información suficiente	-
11	+	+	?			-		Tamaño del sistema, eficiencia	-
12	+	?	+			+		Temperaturas por debajo de los 100°C	-
13	+	+	+	-				Costoso	-
14	+	?	+			-		Falta más información. capacidad. forma de operación	?
15	+	?	+			-			-
16	+	?	+					Frecuencias de ubicación, obstrucción óptica, mayores pérdidas térmicas, menor tolerancia a los errores de ubicación	-

3.5.7 Esquematización de las variantes preseleccionadas

- Variante 1: Cocina solar paredes reflectivas verticales. Aislada. Recipiente convencional.
- Variante 3: Cocina solar paredes reflectivas de perfil CPC. Aislada. Recipiente convencional.
- Variante 5: Cocina solar todas las superficies interiores negras.
- Variante 9: Cocina solar de concentración. Aislada. Superficies reflectivas de perfil CPC. Ver Tabla 13.

Tabla 13. Esquema de las variantes de solución preseleccionadas
Table 13. Scheme of the preselected variants of solution



4. CONCLUSIONES

Se ha presentado una descripción detallada de la metodología para el diseño conceptual de cocinas solares, el cual permitirá definir con facilidad el diseño de detalle y la construcción final de un equipo como este. La metodología se basa en la descripción de las diferentes funciones que se deben cumplir por cada uno de los diferentes elementos constitutivos del equipo y por lo tanto, se analiza las diferentes opciones que cumplen la función deseada.

Con la aplicación de esta metodología de diseño se desarrollo satisfactoriamente un prototipo durable, resistente, funcional y económico empleando herramientas simples y sin la necesidad de incorporar procesos elaborados ni especiales. Así, además de las características del comportamiento térmico, se obtiene un diseño integral que se convierte en una opción viable para ser utilizada en aquellas regiones donde no se tiene acceso a la energía eléctrica y/o en condiciones donde

la consecución de otro tipo de energético, gas, carbón, leña, etc, es limitada.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen todo el apoyo financiero y logístico que brindó a la Universidad Nacional de Colombia a través del DIME, para que este proyecto se desarrollara con éxito.

NOMENCLATURA

- P_{sol} : Potencia que ingresa al sistema. Ésta está dada por la densidad de energía por unidad de superficie (w/m^2) provista por las condiciones de radiación solar de onda corta de un momento y lugar geográfico particular. Rango de longitud de onda aproximado: $0.3 \mu m$ a $2.5 \mu m$.
- $M_{inicial}$: Masa inicial de alimento introducido para su cocción. Esta cantidad es una carga térmica cuya magnitud debe ser proporcional a la capacidad del equipo (área de captación).

- E_p : Pérdidas térmicas y ópticas típicas de este tipo de sistemas.
- M_{final} : Alimento cocido.
- α : Latitud del lugar. Posición angular hacia el norte o hacia el sur del ecuador. Es positivo en el hemisferio norte y negativo en el hemisferio sur.
- δ : Declinación. Posición del sol al mediodía con respecto al plano del ecuador. Es positivo en el hemisferio norte. (+23.45, -23.45).
- θ : Ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal.
- ϕ : Ángulo acimutal. Desviación de la proyección de la normal de la superficie del meridiano local ($-180^\circ < \phi < 180^\circ$). ϕ es positivo para superficies orientadas hacia el occidente y negativo para superficies orientadas hacia el oriente.
- W : Ángulo horario. Desplazamiento angular del sol hacia el este o el oeste del meridiano local, debido al movimiento de rotación de la tierra alrededor del su eje ($w < 0$ para la mañana, $w > 0$ para la tarde, $w = 0$ para el medio día).
- β : Ángulo de inclinación de los rayos del sol con respecto a la normal de la cubierta.
- U : Coeficiente global de transferencia de calor.
- A : Área transversal de la pared compuesta.
- L : Espesor de la pared.
- k : Conductividad térmica de la pared.
- h : Coeficiente de transferencia de calor por convección, por radiación.
- A_p : Área de la placa.
- h_c : Coeficiente de transferencia de calor por convección.
- CL : Capa límite.
- CLS : Subcapa límite.
- F_{liq} : Flujo de líquido.
- θ_a : Ángulo de aceptación
- F_{calor} : Flujo de calor hacia el cuerpo.
- F_{vapor} : Flujo de vapor desde el cuerpo hacia el aire alrededor
- $h_{evaporación}$: Coeficiente de difusión de vapor.
- $A_{evaporación}$: Área superficial de la interfase de evaporación.
- $P_{saturada}$: Presión de saturación a las condiciones dadas.
- P_{vapor} : Presión de vapor a la presión de saturación.
- A, B, C : Constantes de la relación de Antoine sus valores se encuentran tabulados.
- T : Temperatura del agua.
- ϕ : Humedad relativa del aire (%).
- $P_{sat, T_{bs\ aire}}$: Presión de saturación a la temperatura de bulbo seco del aire.
- Q_i : Flujo de radiación para cada superficie.
- J_i : Radiosidad para una superficie gris opaca difusa.
- E_i : Radiación de cuerpo negro.
- ϵ_i : Emisividad de la superficie.
- F_{ij} : Factor de forma.
- A_i : Área de la superficie

REFERENCIAS

- [1] Associations Solar American Energy. Testing and reporting solar cooker performance. Sacramento.2002.
- [2] FEUERMANN, Daniel y GORDON, Jeffrey. Optical performance of axisymmetric edge-ray concentrators and illuminators. En: Applied optics. Vol. 37, No. 10. Abril 1998; P. 1905-1912.
- [3] GORDON, J. M. Complementary construction of ideal nonimaging concentrators and its applications. En: Applied optics. Vol. 35, No.28,Oct 1996; P. 5677-5682.
- [4] HARRISON, John. Investigation of polycarbonate as a suitable "green house material for solar cookers. FSEC, Florida. Noviembre 2001.
- [5] HARRISON, J. Investigation of reflective materials for solar cooker. FSEC; Florida. Diciembre 2001
- [6] JOHNSON R, EDWARDS J. Simulated performance of a storage type solar cooker. North Carolina: La Universidad, 1994.
- [7] JENKINS, D y WISTON, R. Integral desing method for nonimaging concentrators. En: Optical Society of America. Vol.13, No.10,Octubre 1996; p.2106-2112.
- [8] KENNEDY, C. Review of mid to high temperature solar selective absorber materials. NREL, Colorado.Julio 2002.

- [9] MILLS, Anthony, F. Transferencia de calor. Santa Fé de Bogotá: Mc Graw hill, 1995. P.17-35, 517-520, 860.
- [10] MOHAMAD M, ABDEL KADER A. Analitical and experimental performance of hot box solar cooker. Cairo: La Universidad: Facultad de ingeniería, 1998.
- [11] NICHOLS, A. Reflections on a solar cooker. Tucson.1993
- [12] PASSAMAI V; TILCA, F. Cocinas solares tipo caja. Salta: La Universidad. Facultad de ciencia exactas, 2000
- [13] PASSAMAI, V. Simulación del comportamiento térmico de una cocina solar. Salta: La Universidad. Facultad de ciencia exactas,2000
- [14] PAHL, G; BEITZ, W. Engineering desing a sistematic approach. Londres. The desing council.1998. p.45-309.
- [15] RODRIGUEZ M, Humberto; GONZALEZ B, Fabio. Manual de radiación en Colombia. Bogotá, 1992. P. 27.
- [16] ROSS, Mc Cluney. Solar oven development and testing. FSEC. Florida. Febrero 2002.
- [17] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Testing of the burn`s milwaukee`s solar oven. USA, Albuquerque, marzo 1997. Categoría UC 1300
- [18] SANDIA NATIONAL LABORATORIES. Testing of the sunstoves organization`s sun stoves. USA, Albuquerque, marzo 1997. Categoría UC 1300.
- [19] UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Curso sobre colectores solares cilindro-parabólico. Medellín: La Universidad. Facultad de Ingeniería, 2000.
- [20] WINSTON, Ronald. Óptica sin imagines. En: Investigación y ciencia. Vol. 18. No. 62 (agosto.1994); p. 52-58.