



ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

ACUMULADOR SOLAR TÉRMICO PASIVO DE MEDIANA TEMPERATURA CON MATERIALES LOCALES DE CAMBIO DE FASE Y CALOR SENSIBLE PARA SISTEMA SOLARES TÉRMICOS FAMILIARES EN AYACUCHO

Línea de investigación:

Física nuclear y ambiental

Tesis para optar el grado académico de doctor en Medio Ambiente y

Desarrollo Sostenible

Autor:

Janampa Quispe, Kléber

Asesor:

Naupay Vega, Marlitt Florinda

(ORCID: 0000-0003-1234-5869)

Jurado:

Tafur Anzualdo, Vicenta Irene

Ramos Vera, Juana Rosa

Jave Nakayo, Jorge Leonardo

Lima - Perú

2020



Referencia:

Janampa Quispe, K. (2020). Acumulador solar térmico pasivo de mediana temperatura con materiales locales de cambio de fase y calor sensible para sistema solares térmicos familiares en Ayacucho [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional UNFV. http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/5240



Reconocimiento - No comercial - Sin obra derivada (CC BY-NC-ND)

El autor sólo permite que se pueda descargar esta obra y compartirla con otras personas, siempre que se reconozca su autoría, pero no se puede generar obras derivadas ni se puede utilizar comercialmente.

http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/





ESCUELA UNIVERSITARIA DE POSGRADO

ACUMULADOR SOLAR TÉRMICO PASIVO DE MEDIANA TEMPERATURA CON MATERIALES LOCALES DE CAMBIO DE FASE Y CALOR SENSIBLE PARA SISTEMA SOLARES TÉRMICOS FAMILIARES EN AYACUCHO

Línea de investigación: Física nuclear y ambiental

Tesis para optar el grado académico de doctor en Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible

Autor:

Janampa Quispe, Kléber

Asesora:

Naupay Vega, Marlitt Florinda (ORCID: 0000-0003-1234-5869)

Jurado:

Tafur Anzualdo, Vicenta Irene Ramos Vera, Juana Rosa Jave Nakayo, Jorge Leonardo

> Lima - Perú 2020

Ínc	lice		II
Lis	sta de Figu	ras	IX
Lis	sta de Tabl	as	XV
Re	sumen		XVIII
Ab	ostract		XIX
I.	Introduce	ción	1
	1.1	Planteamiento del Problema	3
	1.2	Descripción del problema	4
	1.3	Formulación del problema	6
		1.3.1 Problema General	6
		1.3.2 Problemas Específico	6
	1.4	Antecedentes	7
	1.5	Justificación de la investigación	11
	1.6	Limitaciones de la investigación	13
	1.7	Objetivos	14
		1.7.1 Objetivo general	14
		1.7.2 Objetivos específicos	14
	1.8	Hipótesis	14
		1.8.1 Hipótesis general	14
		1.8.2 Hipótesis especificas	15
II.	Marco T	eórico	16
	2.1	Marco Filosófico	16

	2.1.1 Bases filosóficas de la naturaleza	16
	2.1.2 Bases filosóficas de la ciencia y tecnología	18
	2.1.3 Relación hombre y naturaleza: Desarrollo Sostenible	20
2.2	Teorías generales relacionadas con el tema	22
	2.2.1 Objetivos del desarrollo sostenible	25
	2.2.2 Sostenibilidad de la tecnología solar térmica en el Perú	28
	2.2.2.1 Panorama mundial.	28
	2.2.2.2 Energías renovables en el Perú	30
	2.2.2.3 Marco normativo para el uso eficiente	
	de la energía en el Perú	33
2.3	Bases teóricas especializadas sobre el tema	35
	2.3.1 Radiación solar	35
	2.3.2 Conversión fototérmica	36
	2.3.2.1 Captadores o colectores solares	36
	2.3.2.2 Tipos de colectores.	36
	2.3.2.2.1 De acuerdo a su temperatura de trabajo	36
	2.3.2.2.2 De acuerdo con su funcionamiento	37
	2.3.2.2.3 De acuerdo a su geometría	37
	2.3.3 Almacenamiento de Energía	44
	2.3.4 Métodos de Almacenamiento de Energía	45
	2.3.4.1 Mecánica	45
	2.3.4.2 Eléctrica	45
	2.3.4.3 Térmica	45

2.3.5 Almacenamiento de ener	gía térmica	46
2.3.6 Clasificación de sistema de almacenamiento en función		
del método de almacenar	niento del calor	49
2.3.6.1 Almacenamier	nto energético por calor sensible	50
2.3.6.1.1 Alt	macenamiento en forma sólida	50
2.3.6.1.2 Alt	macenamiento en forma líquida	53
2.3.6.2 Almacenamier	nto energético por calor latente	54
2.3.6.2.1 Alt	macenamiento de calor latente en	
fas	e sólida-sólida (SSPCM)	58
2.3.6.2.2 Alt	macenamiento de calor latente en	
fas	e sólida-líquida	58
2.3.6.2.3 Alt	macenamiento de calor latente en fase	
líq	uida-gas	58
2.3.6.3 Almacenamier	nto termoquímico	58
2.3.7 Clasificación en función	del estado de la sustancia almacenadora	59
2.3.7.1 Almacenamier	nto activo	59
2.3.7.2 Almacenamier	nto pasivo	60
2.3.8 Materiales de Cambio de	Fase (Phase Change Material: PCM)	60
2.3.8.1 Definición de l	РСМ	60
2.3.8.2 Funcionamient	to	62
2.3.8.3 Propiedades y	Características	63
2.3.8.4 Clasificación d	le materiales PCM	65
2.3.8.4.1 PC	M inorgánicos: sales hidratadas	65

	2.3.8.4.2 PCM orgánicos: parafinas y ácidos grasos	67	
	2.3.8.4.3 Eutécticos y mezclas de PCM	70	
	2.3.9 Parafina	70	
	2.3.10 Encapsulación	75	
	2.3.10.1 Macroencapsulados	77	
	2.3.10.2 Microencapsulados	80	
	2.3.11 Mejora de las propiedades de los PCM	82	
	2.3.11.1 PCM con granito o metal	82	
	2.3.11.2 PCM con HDPE: Forma estabilizada.	84	
2.4	Marco conceptual	87	
III. Método		89	
3.1	Tipo de investigación		
3.2	Población y muestra		
3.3	Operacionalización de variables		
3.4	Instrumentos		
	3.4.1 KD2 Pro: Analizador de propiedades térmicas	91	
	3.4.2 EBI 40 TC-01. EBRO ELECTRONIC	92	
	3.4.3 Radiómetro UNI con interfase y memoria	93	
3.5	Procedimientos	93	
	3.5.1 Caracterización térmica de los materiales locales de cambio de		
	fase y/o de calor sensible	94	
	3.5.1.1 Mediante el uso del KD2 Pro	94	
	3.5.1.2 Método de calorimetría para medir el calor específico)	

			de las mu	estras de parafina y piedra volcánica	97
	3.5.2	Diseño y	simulació	n mediante el COMSOL Multiphysics	97
	3.5.3	Evaluaci	ón térmica	de los prototipos incorporados en una	
		cocina y	secador so	lar	98
		3.5.3.1	Primer fa	ctor de mérito F1 y segundo factor de	
			mérito F2	2	98
		3.5.3.2	Potencia	de Cocción Efectiva	99
3.6	Análisi	s de datos			99
IV. Resulta	dos				102
4.1	Condic	iones clima	áticas de la	ciudad de Ayacucho	102
	4.1.1	Tempera	tura		102
	4.1.2	Radiació	n Solar		103
	4.1.3	Velocida	d de viento)	105
	4.1.4	Humedad	l Relativa		105
4.2	Propiec	lades térmi	cas de los	materiales locales de cambio de fase	
	y calor	sensible			106
	4.2.1	Parafina			108
		4.2.1.1	Propieda	des térmicas de la parafina comercial	
			de Ayacu	cho	111
			4.2.1.1.1	Medida de la conductividad térmica	
				de la parafina sólida y líquida	111
			4.2.1.1.2	Medida del calor específico de la	
				parafina sólida y líquida	116

	4.2.2	Piedra Volcánica Roja (Piedra Pómez)	118
4.3	Diseño	del prototipo de un acumulador solar térmico pasivo de mediana	
	tempera	atura con PCM parafina	120
	4.3.1	Simulación del comportamiento térmico con	
		COMSOL MULTIPHYSICS	122
		4.3.1.1 Creación del modelo y selección de la dimensión	122
		4.3.1.2 Selección de la física y el tipo de estudio	123
		4.3.1.3 Definición de parámetros y variables	124
		4.3.1.4 Selección de la geometría	124
		4.3.1.5 Selección de materiales	126
		4.3.1.6 Definición método físico	127
		4.3.1.7 Físicas y ecuaciones base de la interfaz de modelado	128
		4.3.1.8 Despliegue de estudio	130
		4.3.1.9 Selección de mallado	131
		4.3.1.10 Despliegue de resultados	131
	4.3.2	Espesor del módulo	132
	4.3.3	Determinación de la longitud de la aleta interna del módulo	137
	4.3.4	Determinación de la longitud de aletas externas del módulo PC	M143
	4.3.5	Módulo de PCM con dos aletas externas	147
4.4	Constru	acción del módulo PCM (parafina)	151
4.5	Evaluad	ción térmica de los módulos de PCM	155
	4.5.1	Ubicación geográfica los ensayos	155
	4.5.2	Comportamiento térmico del módulo PCM en la cocina solar	

tipo caja		156
4.5.2.1	Medición de la temperatura máxima sin carga y	
	obtención de primer factor de mérito	159
4.5.2.2	Segundo factor de mérito F2	162
4.5.3 Comporta	amiento térmico del módulo PCM en un secador	
solar tipo	cabina	167
4.5.3.1	Eficiencia Térmica del Colector Solar con y sin	
	módulo PCM	172
4.5.3.2	Secado de papa	176
4.6 Acumulador térmi	co con materiales reciclados y de bajo costo	178
4.7 Prueba de los resu	ltados obtenidos	188
4.7.1 Cocina so	olar	188
4.7.2 Secador s	olar	191
V. Discusión de resultados		193
VI. Conclusiones		203
VII. Recomendaciones		205
VIII. Referencias		207
IX. Anexos		222
Anexo A. Ficha Técnica de los In	nstrumentos a Utilizar	222
Anexo B. Temperatura de estanc	amiento en las cocinas solares	225
Anexo C. Temperatura en el seca	dor solar utilizando el módulo con PCM y libre	226
Anexo D. Ubicación de la Ciuda	d de Ayacucho	229

Lista de Figuras

Figura 1	Capacidades de energía renovable en el mundo, UE-28, BRICS y los seis países	29
	líderes, 2016	
Figura 2	Porcentaje estimado de energía renovable en el consumo total final de energía	30
	en el mundo.	
Figura 3	Efecto invernadero en el colector solar plano	38
Figura 4	Distribución espectral de la radiación y transmisividad del vidrio.	39
Figura 5	Balance energético del colector solar plano	40
Figura 6	Eficiencia instantánea de un colector	42
Figura 7	Captadores solares de tubo de vacío	43
Figura 8	Esquema de funcionamiento de un concentrador solar	44
Figura 9	Almacenamiento de energía térmica solar en un día	46
Figura 10	Perfil de temperatura en función del calor suministrado	47
Figura 11	Clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico.	49
Figura 12	Diferentes estructuras de interfase.	62
Figura 13	Proceso de sobrefusión o subenfriamiento	72
Figura 14	Principales métodos de encapsulación de PCM.	76
Figura 15	Cápsulas esféricas de acero inoxidable y cilindros.	77
Figura 16	Cápsulas esféricas de poliolefina y paneles de polipropileno.	78
Figura 17	Diferentes formas de presentación de macrocápsulas: cilíndricas	78
Figura 18	Macro-cápsulas plásticas de distintos tamaños y bolsas de polímeros con	79
	recubrimiento transparente.	
Figura 19	Perfiles de aluminio con aletas para mejorar la transferencia de calor.	80
Figura 20	Micronal PCM. Formato de dispersión fluida y en polvo	81
Figura 21	Fotografía ampliada de PCM Microencapsulados	82
Figura 22	Virutas de grafito. Forma comprimida. Grafito en polvo.	83
Figura 23	Relleno de estructuras VSP25 y VSP 50 de aluminio. Lámina de compuesto de	83
	PCM-grafito.	
Figura 24	Analizador de propiedades térmicas KD2 Pro	91
Figura 25	Registrador de datos de temperatura de 12 canales EBI 40 EBRO.	92

Figura 26	Radiómetro UNI y unidad de memoria.	93
Figura 27	Evolución de las temperaturas máximas, mínimas y media en Ayacucho	102
Figura 28	Isoterma de temperaturas para la ciudad de Ayacucho	103
Figura 29	Radiación global mensual en Ayacucho	104
Figura 30	Movimiento aparente del sol para la ciudad de Ayacucho.	104
Figura 31	Velocidad de viento por horas en Ayacucho	105
Figura 32	Humedad relativa en Ayacucho	106
Figura 33	Muestra de parafina y medidor de la conductividad térmica con KD 2 Pro.	112
Figura 34	Medida del calentamiento de una muestra de parafina en una probeta.	115
Figura 35	Curva de calentamiento de la muestra de parafina de 11.18 g, para determinar	115
	su temperatura de fusión. (20/03/19).	
Figura 36	Curva de calentamiento y enfriamiento de la parafina en el interior de un módulo	116
	de acumulación térmica con aletas internas.	
Figura 37	Muestra extraída de la cantera Acuchimay (Ayacucho)	119
Figura 38	Selección del asistente de modelo y dimensión espacial 3D.	123
Figura 39	Selección de la física y tipo de estudio del modelo.	123
Figura 40	Prototipo modular de acumulador térmico con PCM con aletas internas.	124
Figura 41	Prototipo modular de acumulador térmico con PCM, con aletas internas y aletas	125
	externas por ambos lados de la superficie.	
Figura 42	Prototipo modular de acumulador térmico con PCM con materiales reciclados	125
	de aluminio de forma cilíndrica (Modelo alternativo).	
Figura 43	Selección de los dominios de sólidos, flujo de calor y cambio de fase.	128
Figura 44	Mallado normal del módulo PCM.	131
Figura 45	Variación de la temperatura en el módulo PCM con aletas internas en relación	133
	al espesor del módulo de 10 mm a 60 mm.	
Figura 46	Distribución de temperatura en un corte vertical para diferentes espesores del	134
	Módulo PCM de 10 mm a 60 mm.	
Figura 47	Distribución de temperatura en la línea de corte central sobre la superficie	135
	superior del Módulo PCM, en relación al espesor del módulo de 10 mm a 60	
	mm.	

- Figura 48 Distribución de temperatura en la línea de corte central sobre la aleta interna del 136Módulo PCM en relación al espesor del módulo de 0 mm a 60 mm.
- Figura 49 Variación de la Radiosidad de la superficie con el espesor del módulo de 10 mm 137 a 60 mm.
- Figura 50 Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta 138 interna del Módulo PCM de 5 mm a 25 mm.
- Figura 51 Distribución de temperatura en un corte vertical para diferentes longitudes de la 139 aleta interna de 5 mm a 25 mm.
- Figura 52 Variación de la temperatura sobre la superficie horizontal del módulo PCM en 139 relación a la longitud de la aleta interna de 5 mm a 25 mm.
- Figura 53 Radiosidad para diferentes longitudes de la aleta de 5, 10, 15, 20 y 25mm. 140
- Figura 54 Variación de la temperatura en la aleta interna central para diferentes longitudes 141 de la aleta.
- Figura 55 Variación estacionaria de la temperatura sobre la superficie superior del Módulo 142 PCM para diferentes longitudes de la aleta interna.
- Figura 56 Variación temporal de la temperatura sobre la superficie superior del Módulo 142 PCM para 25 mm de altura de la aleta interna.
- Figura 57 Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta 143 externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.
- Figura 58 Distribución de la radiosidad en relación a la variación de a longitud de la aleta 144 externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.
- Figura 59 Planos isométricos del Módulo PCM con 25 mm de aleta externa. 144
- Figura 60 Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta 145 externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.
- Figura 61 Distribución de temperatura en la aleta en relación a la variación de la longitud 146 de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.
- Figura 62 Distribución de temperatura en la superficie del módulo en relación a la 147 variación de la longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm
- Figura 63 Distribución de temperatura en módulo PCM de dos aletas exteriores. 148

- Figura 64 Distribución de temperatura en líneas de corte horizontales paralelas al ancho 149 del módulo con dos aletas exteriores.
- Figura 65 Distribución de temperatura en líneas de corte verticales de 0 mm a 270 mm del 150 extremo de una aleta del módulo PCM con dos aletas exteriores.
- Figura 66 Isosuperficies térmicos en el módulo PCM de dos aletas exteriores. 150
- Figura 67 Módulo con PCM con sólo aletas internas de 30cmx20cmx3cm de estructura de 152 cobre y luego pintado con negro mate.
- Figura 68 Módulo con PCM de 30cmx20cmx3cm con aletas externas en los extremos del 152 módulo con estructura de cobre y luego pintado en negro mate.
- Figura 69 Unidades de los módulos PCM sin y con aletas externas pintadas en negro mate. 153
- Figura 70 Cocinas solares tipo caja equivalentes (tipo 1 y 2), con reflector plano. 156
- Figura 71 Calentamiento de las cocinas solares 1 y 2 sin PCM, temperatura de 157 estancamiento y enfriamiento.
- Figura 72 Temperatura de calentamiento del material de cambio de fase (parafina) al 158 interior de módulo colocada sobre la placa colectora de la cocina solar (22/02/19).
- Figura 73 Instalación de los módulos con PCM en el interior de la cocina solar tipo 1 159
- Figura 74 Comparación de la temperatura en la cocina solar con (cocina 1) y sin el módulo 160 de PCM (cocina 2). 04/04/19.
- Figura 75 Temperatura del aire en el interior de la cocina solar con (cocina 1) y sin módulo 161
 PCM (Cocina 2). 04/04/19.
- Figura 76 Calentamiento y enfriamiento de 3 litros de agua en las cocinas solares de tipo 1641 (con módulo PCM) y 2 (sin módulo PCM). 09/04/19.
- Figura 77 Rapidez de enfriamiento de 3 litros de agua en las cocinas solares de tipo 1 y 2. 166 09/04/19.
- Figura 78 Intercambio térmico entre la cocina caliente y agua a temperatura ambiente. 166 21/05/19.
- Figura 79Secador solar pasivo e indirecto para uso a escala familiar.167
- Figura 80 Temperatura del secador solar que utiliza dos módulos PCM. Radiación solar 169 media 745 W/m². (26/05/19).

- Figura 81 Temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado en el secador solar que 169 utiliza como acumulador térmico dos módulos PCM. (26/05/19).
- Figura 82 Temperatura del secador solar que no utiliza el módulo PCM. Para una radiación 170 media en las horas de calentamiento de 757 W/m². (25/05/19).
- Figura 83 Temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado en el secador solar que 170 no utiliza el módulo PCM. (25/05/19).
- Figura 84 Comparación de la temperatura que ingresa a la cámara de secado en el secador 172 solar cuando cesa la radiación solar.
- Figura 85 Eficiencia instantánea de colector solar con módulo PCM (dos unidades) 174 (26/05/19).
- Figura 86 Eficiencia instantánea de colector solar sin módulo PCM (25/05/19). 174
- Figura 87 Temperatura del secador solar que no utiliza el módulo PCM. Para una radiación 175 media en las horas de calentamiento de 781 W/m². (14/06/19).
- Figura 88 Eficiencia instantánea de colector solar con módulo PCM del secador solar, para 176 una intensidad de radiación solar de 781 W/m². (14/06/19).
- Figura 89Secado de papa cocida en el secador solar con PCM.177
- Figura 90 Variación de temperatura en la cámara de secado durante el proceso de secado 177 de 1 kg de papa cocida en el secador solar con PCM. (20/05/19).
- Figura 91 Prototipo 1 (a) llenado sólo con parafina (b) Prototipo 2: llenado con parafina y 179 malla metálica de la lata de aluminio.
- Figura 92 Prototipo 3: llenado con parafina, malla metálica y piedra volcánica. La piedra 180 volcánica absorbe parafina entre sus poros.
- Figura 93 Variación de la temperatura de enfriamiento en la superficie de las unidades 181 PCM, se compara el prototipo 1, 2 y 3.
- Figura 94Prototipo de la unidad del acumulador pintado de negro mate.182
- Figura 95Unidades cilíndricas del acumulador solar térmico182
- Figura 96 Simulación en Comsol Multiphysics de intercambio térmico de calor entre dos 183 cilindros con el aire entre ellos.
- Figura 97 Simulación de la variación de la temperatura del aire entre los cilindros en 183 relación a la distancia entre ellos de 3,0 cm, 2,5 cm hasta 0,5 cm.

- Figura 98 Variación de la temperatura del aire entre los cilindros en relación a la distancia 184 entre ellos de 0,5 cm, 1,0 cm a 3,0 cm.
- Figura 99 Variación de la temperatura del secador con acumulador PCM, para una 185 incidencia media de radiación solar desde las 10.00 am a 2.30 pm de 533 W/m².
 (21/03/19).
- Figura 100 Variación de la temperatura del secador con acumulador PCM. (21/03/19). 186
- Figura 101 Variación de la temperatura del secador sin acumulador PCM, para una 186 incidencia media de radiación solar desde las 10.00 am a 2.30 pm de 500 W/m². (22/03/19).
- Figura 102 Velocidad de enfriamiento del aire de salida del colector solar con acumulador 187 de cambio de fase (PCM). (21/03/19).
- Figura 103 Velocidad de enfriamiento del aire de salida del colector solar sin acumulador 188 de cambio de fase (PCM). (22/03/19).
- Figura 104 Variación de la temperatura en puntos de la línea central de la base superior del 197 módulo PCM obtenido mediante el COMSOL Multiphysics.
- Figura 105 Variación de la temperatura en puntos de la línea central de la base superior del 198 módulo PCM obtenido experimentalmente.

Lista de Tablas

Tabla 1	Potencial en energías renovables del Perú	31
Tabla 2	Tipos de colectores solares	37
Tabla 3	Materiales de almacenamiento de calor sensible para edificación	51
Tabla 4	Calor especifico de los materiales de construcción	52
Tabla 5	Conductividad térmica de los materiales de construcción.	52
Tabla 6	Características principales de materiales líquidos de almacenamiento de	53
	energía térmica sensible.	
Tabla 7	Comparación de la capacidad de almacenamiento de varias sustancias.	55
Tabla 8	Comparación de la densidad de almacenamiento de varias sustancias	56
Tabla 9	Propiedades termofísicas deseables para materiales PCM	61
Tabla 10	Ventajas e inconvenientes de los PCM inorgánicos.	65
Tabla 11	Valores típicos de sales hidratadas con temperaturas de fusión próximas a	66
	la temperatura de confort, para aplicación en construcción.	
Tabla 12	Principales ventajas e inconvenientes de los PCM orgánicos	68
Tabla 13	Características térmicas de algunos ácidos grasos.	69
Tabla 14	Algunos alcanos lineales disponibles comercialmente junto a algunas de sus	71
	propiedades termofísicas de equilibrio (estáticas) más relevantes.	
Tabla 15	Ventajas y Desventajas de los PCM.	74
Tabla 16	Operacionalización de las variables de investigación	89
Tabla 17	Conductividad térmica de materiales de construcción.	108
Tabla 18	Caracterización de la parafina comercial generalizada de peso molecular	109
	intermedio.	
Tabla 19	Propiedades termo físicas de la parafina.	109
Tabla 20	Propiedades termo físicas de la parafina RT60	110
Tabla 21	Densidad de la parafina comercial.	111
Tabla 22	Medida de la conductividad térmica de la parafina sólida. Sensor KS1.	112
Tabla 23	Medida de la conductividad térmica de la parafina sólida. Sensor KS1.	113
Tabla 24	Medida del calor específico volumétrico (C) y difusividad (D) de la parafina	114
	sólida. Sensor SH1.	

Tabla 25	Valores para determinar el calor específico de parafina sólida.	117
Tabla 26	Propiedades termo físicas de la parafina comercial de Ayacucho.	118
Tabla 27	Descripción Macroscópica Roca Volcánico	119
Tabla 28	Propiedades térmicas de la roca volcánica andesita	120
Tabla 29	Propiedades térmicas de la roca volcánica de Acuchimay (KD 2 Pro SH1).	120
Tabla 30	Propiedades térmicas de la parafina utilizada en el módulo de PCM.	126
Tabla 31	Propiedades térmicas del cobre (COMSOL)	126
Tabla 32	Dimensiones del módulo PCM con aletas externas.	151
Tabla 33	Energía acumulada en cada unidad PCM.	154
Tabla 34	Energía acumulada en masa de agua.	154
Tabla 35	Energía acumulada en cada unidad de PCM (91 °C).	155
Tabla 36	Energía acumulada en masa de agua.	155
Tabla 37	Primer Factor de mérito (04/04/19).	162
Tabla 38	Segundo factor de mérito de las cocinas solares con y sin módulo PCM	165
	(09/04/19).	
Tabla 39	Datos de la temperatura en el secador cuando permanece la temperatura del	171
	aire de la cámara de secado mayor a 40 °C.	
Tabla 40	Dimensiones de una unidad cilíndrica del módulo PCM.	178
Tabla 41	Energía Acumulada en cada unidad del módulo PCM.	179
Tabla 42	Temperatura de estancamiento de la placa de la cocina solar con y sin el	189
	módulo acumulador PCM.	
Tabla 43	Prueba de hipótesis mediante t Student para la temperatura en la cámara de	189
	cocción en la cocina solar con PCM.	
Tabla 44	Prueba de hipótesis mediante t Student para el tiempo que se mantiene la	190
	temperatura en la cámara de cocción en la cocina solar con PCM mayor a 50	
	°C.	
Tabla 45	Tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar	191
	y la temperatura de la cámara se mantiene mayor a 30 °C, el secador usa el	
	módulo PCM.	

- Tabla 46Tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar192y la temperatura de la cámara se mantiene mayor a 30 °C, el secador no usa
el módulo PCM.192
- Tabla 47Prueba de hipótesis mediante t Student para el tiempo que se mantiene la192temperatura en la cámara del secador con PCM mayor a 30 °C.
- Tabla 48Comparación de la cantidad de masa y volumen requerida para generar una193cantidad en calor sensible equivalente a 1 kg de agua y 1 kg de parafina en
calor sensible y latente.193

Resumen

En el presente trabajo se determina la influencia del acumulador solar térmico de cambio de fase y calor sensible en el funcionamiento de sistemas solares familiares como la cocina y secador solar. Para ello, se caracteriza las propiedades térmicas de la parafina como un material local de cambio de fase. La estructura del acumulador parte del concepto de ser modular de placa compacta, cuyas dimensiones se determinan mediante la simulación térmica en Comsol Multiphysics. Para mejorar la transferencia de calor desde el material de cambio de fase, se incorpora aletas internas y/o externas en el acumulador para acelerar el proceso de carga y descarga de la energía térmica. Se ha logrado diseñar 2 tipos de módulos de acumulador solar térmico de 30 cmx20 cmx3 cm uno que incorpora sólo aletas internar y otro, aletas internas y externas; cada módulo encapsula 1 kg de parafina y acumula energía hasta el punto de fusión de 0,06 kWh con densidad de energía de 51,81 kWh/m³. Dos módulos del acumulador se incorporan a una cocina solar y otros dos a un secador solar de cabina, con lo que se logra estabilizar la temperatura del aire de la cabina de cocción y del aire que ingresa a la cámara de secado durante el proceso de carga del acumulador. Cuando cesa la intervención de la radiación solar, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se mantiene mayor a 30 °C por un intervalo de 2 h lo que optimiza el proceso de secado del producto.

Palabras clave: acumulador térmico, cambio de fase, cocina solar, secador solar.

Abstract

In the present work, the influence of the solar thermal accumulator of phase change and sensible heat in the operation of family solar systems such as the kitchen and solar dryer is determined. For this, the thermal properties of paraffin are characterized as a local phase change material. The structure of the accumulator is based on the concept of being modular with a compact plate, the dimensions of which are determined by thermal simulation at Comsol Multiphysics. To improve heat transfer from the phase change material, internal and / or external fins are incorporated into the accumulator to speed up the process of charging and discharging thermal energy. It has been possible to design 2 types of 30 cmx20 cmx3 cm solar thermal accumulator modules, one that incorporates only internal fins and the other, internal and external fins; each module encapsulates 1 kg of paraffin and accumulates energy up to the melting point of 0,06 kWh with an energy density of 51,81 kWh / m³. Two accumulator modules are incorporated into a solar cooker and another two to a cabin solar dryer, thereby stabilizing the temperature of the air in the cooking cabin and the air that enters the drying chamber during the charging process accumulator. When the intervention of solar radiation ceases, the temperature of the air that enters the drying chamber remains above 30 °C for an interval of 2 hours, which optimizes the product drying process.

Keywords: thermal accumulator, phase change, solar kitchen, solar dryer.

I. Introducción

El desarrollo de la humanidad ha estado y está relacionado a las diversas formas y cantidad de energía disponible en las diferentes etapas de la historia. Actualmente, la creciente demanda de las necesidades sociales genera un mayor consumo de la energía, basada fundamentalmente en la energía de los hidrocarburos, que va generando un incesante impacto y deterioro del ambiente. Como una alternativa para disminuir dichos efectos, se viene planteando la necesidad de diversificar la matriz energética dentro del enfoque de eficiencia energética e incrementando el uso de las energías renovables consideradas energías limpias.

En la actualidad, a nivel mundial, las energías renovables son una importante fuente de energía que va incrementándose continuamente en la demanda energética; por otro lado, se considera que la mayoría de las diversas fuentes de energía renovables provienen de forma directa o indirecta, de la energía del Sol (Schallenberg et al., 2008). De manera que, para implementar una de las tecnologías renovables, se debe considerar la disponibilidad de las energías renovables en el lugar de la aplicación, conforme al requerimiento de la demanda específica. En este sentido se encuentra que las aplicaciones solares tienen entre una de sus mayores limitaciones la disponibilidad de la energía conforme a la demanda, ya que la energía solar se caracteriza por ser intermitente y temporal, generando un rendimiento inestable y diseños poco confiables (Escobar et al., 2017) lo que no garantiza la seguridad energética.

Una consecuencia de la inestabilidad en la disponibilidad energética solar, genera, por ejemplo, que la cocción y el secado solar sólo pueda hacerse mientras se disponga de la radiación solar, de manera que cuando se interrumpe la radiación puede generar problemas como el secado incompleto del producto, la condensación nocturna de la humedad dentro del secador, haciendo perder parte del secado logrado en el día (Glogower, 2015). Por lo que es necesario generar alternativas que permitan alargar el proceso de secado durante horas de la noche acumulando la energía solar durante las horas de sol.

El uso de acumuladores solares térmicos se presenta como una alternativa para contrarrestar la inestabilidad temporal de la energía solar. Los acumuladores que actualmente se viene desarrollando con mayor interés son los acumuladores que utilizan materiales de cambio de fase, donde se almacena la energía solar térmica durante el proceso de cambio de fase del elemento acumulador; estos acumuladores, tienen como ventaja, una mayor densidad energética térmica acumulada en comparación a los acumuladores de calor sensible y mayor estabilidad en la temperatura. Un material de cambio de fase que abunda en Ayacucho y que es muy utilizado tradicionalmente, es la parafina, cuyas propiedades térmicas son importantes para ser utilizadas como material de cambio de fase para aplicaciones térmicas solares de mediana temperatura, en el orden de 53°C a 61° C (Campos et al., 2014) que es la temperatura de fusión de la parafina.

En el presente trabajo se ha diseñado y construido un acumulador solar térmico que incorpora como material de cambio de fase a la parafina comercial, es de carácter modular con una estructura plana y rectangular de cobre, dispone de aletas internas y/o externas y se basa en el principio de intercambiadores de calor. Se utilizó el Comsol Multiphysic para la simulación térmica y optimizar los parámetros geométricos de cada módulo.

El diseño de los acumuladores solares térmicos está orientado a aplicaciones solares familiares, de cocción y secado. En el caso del secado, en buena parte de las familias ayacuchanas se generan un excedente de productos, que para conservarse se secan al sol.

Para evaluar el comportamiento térmico del acumulador, se ha instalado dos unidades en la cocina solar tipo caja y otras dos, en un secador solar de cabina; en la que se ha caracterizado el nivel influencia térmica del acumulador sobre el comportamiento térmico de la cocina y secador. Un resultado fundamental es que se ha logrado optimizar el proceso de secado en un secador solar de uso familiar; aumentando el tiempo disponible para el secado de productos en un orden de 2h con una temperatura del aire mayor a 30°C.

1.1 Planteamiento del Problema

Las tecnologías solares térmicas de uso familiar están orientadas a la cocción de alimentos, calentamiento de agua, secado de productos e invernaderos a escala familiar mediante el aprovechamiento de la energía solar térmica. No obstante que las tecnologías solares térmicas están ampliamente desarrolladas, confronta la desventaja de la disponibilidad de la energía solar que no guarda relación con la demanda. Ello se debe fundamentalmente a la intermitencia de la energía solar que depende factores estacionales y climáticos, lo que va generando en el usuario desconfianza en el sistema y que el mismo sistema responda con baja eficiencia; este hecho se muestra en Ayacucho con una escaza cantidad de unidades térmicas instaladas tanto en las zonas urbanas y rurales. Una alternativa que se presenta actualmente, para disponer la energía solar en el momento de la demanda, es implementar acumuladores solares térmicos sobre la base de materiales apropiados de cambio de fase y/o calor sensible. Y dentro del enfoque de sostenibilidad, se plantea la necesidad de caracterizar los materiales de la región que se comporten como materiales de cambio de fase y que puedan ser utilizados en acumuladores térmicos solares; así mismo, se debe evaluar las condiciones térmicas y geométricas de diseño de dichos acumuladores para su óptimo funcionamiento térmico, incorporados en tecnologías solares de uso familiar (cocina y secador solar) de mediana temperatura cuya temperatura de operación está entre 15 a 90 °C (Grande, 2016, p.42).

De manera que se propone desarrollador un acumulador solar térmico que utilice materiales locales de cambio de fase y/o calor sensible para resolver el problema de la intermitencia de la disponibilidad de la energía solar en la cocción de alimentos y/o secado de productos a escala familiar, hecho que a su vez contribuye a implementar los objetivos del desarrollo sostenible, objetivo 7 y 13 (Comisión Económica para América Latina y el Caribe [CEPAL], 2018, p.37), en la región de Ayacucho; estos objetivos plantean la necesidad de implementar alternativas que posibiliten la diversificación y eficiencia energética mediante el uso de las energías renovables como la energía solar (Congreso de la República de Perú, Ley 27345) (Ríos, 2016, pp.57-58), fundamentalmente a partir de las unidades familiares donde se incentive, fomente hábitos y una cultura de la eficiencia y responsabilidad ambiental.

La implementación de una tecnología parte de conocer el contexto donde se pretende aplicar, conocer sus características ambientales y culturales para la adaptación y apropiación de la tecnología. En tal sentido, se ha determinado a la ciudad de Ayacucho como la zona de estudio, dado que hay amplios sectores urbanos, urbano marginales y rurales donde aún no se ha difundido las tecnologías solares térmicas a escala familiar. Ayacucho se encuentra en la sierra central del Perú que cuenta con un potencial solar medio del orden de 6 kWh/m².

1.2 Descripción del problema

La energía es un elemento imprescindible para el desarrollo sostenible de los países. Dado que la matriz energética de nuestro país, está basada principalmente en la utilización de combustibles de origen fósil, 80% de energía primaria del petróleo, gas natural y derivados (Ríos, 2016, p.11), con el consecuente aumento de degradación de nuestro ambiente, de acuerdo a las cifras del Balance Nacional de Energía, se liberan 2,550 T/ h de CO₂ por el consumo de energía de combustibles fósiles (Gamio, 2010, p.19). Para cambiar la matriz energética del país, se plantea la necesidad de diversificar las fuentes de energía; las energías renovables son una alternativa para este propósito y específicamente en nuestra región de Ayacucho, donde la energía solar es un importante potencial de energía (Gamio, 2010, p.14), que no ha logrado aún insertarse a las necesidades energéticas familiares de Ayacucho, hasta el 2012 el 71% de familias utilizan leña para la cocción (García, 2013, p.16) y al 2004 sólo habían instaladas en Ayacucho 13 cocinas solares 44 termas y cero secadores (García, 2013, p.11). Para la sostenibilidad energética de la región y en general de nuestro país, es necesario diversificar el uso de las energías renovables a partir del necesidades energéticas de las unidades familiares, que permita generar en las familias la cultura de la eficiencia y la responsabilidad ambiental; de manera que se nos plantea la necesidad de evaluar las condiciones técnico científicas para el uso de las diversas aplicaciones de tecnología solar a nivel familiar con sistemas de fácil manejo, económicos y eficientes; aplicaciones que optimice el uso de la energía solar mediante la acumulación.

La energía solar es un recurso dependiente del tiempo, de igual manera, los requerimientos de energía también dependen del tiempo y que muchas veces no coinciden la disponibilidad de la energía solar con la demanda de energía (Nacif, 2011, p.4), por lo que los sistemas basados en energía solar, muestran limitaciones relacionadas a la dotación de energía, generando un rendimiento inestable y diseños poco confiables. Estas variaciones dependen de las condiciones climáticas propias de cada zona (Ochoa, 2016, p.13), fluctuaciones que contribuyen a la inestabilidad en la cantidad de energía disponible (Escobar et al, 2017, p.10). Por lo que hay la necesidad de desarrollar sistemas de almacenamiento de energía, que permitan guardar o acumular la energía obtenida. El uso de sistemas de almacenamiento es fundamental para evaluar la eficiencia y operación del sistema solar como conjunto y en cada una de las unidades que lo componen (Nacif, 2011, p.13), en este sentido encontramos los sistema de almacenamiento térmico basados en materiales de cambio de fase como una alternativa para desarrollar aplicaciones solares familiares que oferte sistemas eficientes, confiables, de bajo costo, que incremente la

capacidad de almacenamiento térmico y reduzca las elevadas variaciones de temperatura y el consumo energético. Sin embargo, existen algunas condiciones que limitan la selección del material de cambio de fase (Phase Change Material: PCM), como el calor de fusión, temperatura de fusión, la baja conductividad térmica (Oliver, 2009, p.54) y por otro lado el costo y disponibilidad del PCM para desarrollar un modelo apropiado a la zona de aplicación (Grande, 2016, p.43). También, se debe tomar en cuenta las condiciones que deben darse para que la aplicación con PCM tenga un desempeño óptimo tomando en cuenta las condiciones existentes del lugar donde se pretende utilizar (Rodríguez, 2015, p.ii).

En las aplicaciones solares de mediana temperatura, como por ejemplo, durante el proceso de secado solar muchas veces se interrumpe o no se completa el proceso de deshidratación, debido también a la interrupción de la incidencia de la radiación solar, lo que genera una mala calidad del producto seco (Gopi et al., 2017, p.462).

1.3 Formulación del problema

1.3.1 Problema General

¿Cómo el acumulador solar térmico pasivo de mediana temperatura con materiales locales de cambio de fase y calor sensible influye en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho?

1.3.2 Problemas Específico

- a. ¿Cómo el material local de cambio de fase influye en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho?
- b. ¿Cómo el intercambiador de calor influye en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho?
- c. ¿Cómo la energía acumulada influye en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho?

1.4 Antecedentes

La preocupación mundial por desarrollar la seguridad y la eficiencia energética, como consecuencia del aumento de los impactos al ambiente, ha generado en Latinoamérica la necesidad de potenciar sus recursos renovables (Arce et al., 2017). El incremento del uso de las fuentes de energías renovables como la solar, eólica y la geotérmica, caracterizados por su intermitencia o variabilidad, ha permitido desarrollar sistemas de almacenamiento de energía térmica para optimizar su uso y adaptar los periodos de suministro a los de la demanda energética. Los acumuladores son considerados como un potencial tecnológico para la eficiencia y sostenibilidad energética (Oliver, 2009). Actualmente se desarrollan aplicaciones tecnológicas que utilizan sistemas de almacenamiento de energía térmica para optimizar su uso y adaptar los periodos de calor sensible de un fluido o sólido, o calor latente de cambio de fase (Oliver, 2009).

El uso de los materiales de cambio de fase para almacenamiento de energía térmica se inicia a partir de 1950, desarrollándose investigaciones teóricas y experimentales que ha permitido modelar el comportamiento térmico de materiales de cambio de fase, caracterizar el desempeño térmico de las unidades de almacenamiento, investigar nuevas geometrías y proponer unidades modulares para aplicaciones residenciales y comerciales (Macía et al., 2010); así como, aplicaciones relacionadas a diversos ámbitos científicos y tecnológicos, como aplicaciones industriales, alimentarias, control térmico, intercambiadores de calor, purificación de agua etc. (Fernández, 2012).

Los sistemas de almacenamiento con materiales de cambio de fase tienen una gran variedad de tipos y clasificaciones, los que generalmente utilizan son materiales apropiados de cambio fase de sólido a líquido (Grande, 2016). La ventaja que ofrece los materiales de cambio de fase, es que tienen su punto de fusión y solidificación en un amplio rango de temperatura, tienen elevado calor latente de fusión por unidad de volumen y alto calor específico. Entre estos materiales se encuentran las parafinas, hidrocarburos saturados, ácidos grasos, mezclas eutécticas orgánicas e inorgánicas y polímeros (Ochoa, 2016). Los sistemas que utilizan almacenamiento en forma de calor latente tienen 50-100 veces mayor capacidad de almacenamiento que los que utilizan calor sensible en las mismas condiciones. Sin embargo, la mayoría de los PCM tienen el inconveniente de una baja conductividad térmica, que genera una baja velocidad de carga y descarga de la energía térmica (Grande, 2016). Para mejorar esta baja conductividad térmica, se proponen utilizar simultáneamente aletas y múltiples materiales de cambio de fase o se alternan sistemas de almacenamiento latente y sensible, se usan mezclas con grafito y una matriz o estructura soporte de un material con alta conductividad térmica en el cual se deposita el material de cambio de fase (Macía et al., 2010).

Macía et al. (2010) desarrollan un sistema de almacenamiento de energía térmica, el cual está conformado por dos tubos concéntricos. Por el tubo interior circula el fluido de transferencia de calor (HTF, Heat Transfer Fluid) que fue aceite térmico. En el espacio anular entre los dos tubos se ubica el material con cambio de fase MgC_{12} 6H₂O (Cloruro de magnesio hexahidratado: Punto de fusión 116 a 118 °C) (Macía et al, 2010).

En el 2006, Devahastin y Pitaksuriyarat investigaron la viabilidad del almacenamiento de calor latente utilizando la cera de parafina como material de cambio de fase, investigaron las características de transferencia de calor, los perfiles de temperatura, así como los efectos de la temperatura y velocidad del aire de entrada en los períodos de carga y descarga (Karunesh et al., 2016). Shabtay y Black (2013), desarrollan un intercambiador de calor de tubo de cobre con aleta de aluminio en un recipiente lleno de material de cambio de fase a base de cera. Así mismo inserta circuitos de tubos de cobre en un compuesto de cera mezclado con grafito de alta conductividad.

Juárez et al (2012) manifiesta que existe un amplio campo de investigación de los materiales de cambio de fase, como la micro/macro encapsulación, el desarrollo de nuevos materiales y de nuevos sistemas de almacenamiento; menciona a Fallahi y Fang que desarrollaron el encapsulamiento de micro PCMs en base a diferentes tipos de parafinas; Alkan estudia la preparación, caracterización y propiedades térmicas de un PMC micro encapsulado para el almacenamiento de energía térmica. Alvarado y Bukovec proceden al análisis del comportamiento de micro PCMs. Actualmente las investigaciones están orientadas a los nano fluido y nano-PCM que puede generar un importante avance de la tecnología basada en PCM (Juárez et al., 2012).

A la fecha se han desarrollado diversos sistemas de acumulación térmica mediante materiales de cambio de fase aplicados a los diferentes usos de la energía solar, como secadores, termas, cocinas, invernaderos y a la arquitectura bioclimática, dentro del enfoque de media y alta temperatura (Grande, 2016); de estas aplicaciones destacaremos algunas de ellas conforme al objetivo del presente trabajo.

En las aplicaciones a secadores solares, encontramos a Díaz et al (2010) que desarrollan un sistema de acumulación de calor con cambio de fase para secado solar con PCM de acetato de sodio trihidratado cuya temperatura de cambio de fase es 58 °C (Díaz et al., 2010). Gopi et al (2017) menciona los trabajos de Bal et al., que desarrollaron un secador solar que usa cera de parafina como PCM donde secaron productos a temperaturas constantes y moderadas de 40 -75° C; menciona también a Çakmak et al, que han estudiado un secador solar para secar la uva, que consistía de un colector solar de aire con material PCM y una cabina de secado; a su vez refiere a Esakkimuthu et al, que desarrollaron un secador solar indirecto, donde el sistema de secado contiene un calentador de aire solar, un soplador, una unidad de almacenamiento térmico PCM de lecho compacto y una cámara de secado. Gopi et al (2017) desarrollan un colector solar de doble paso en modo de convección natural integrado con una unidad de almacenamiento de calor para el secado de rábanos con una unidad de almacenamiento de energía sensible (guijarros) y una unidad de almacenamiento de energía de calor latente (cera de parafina). Ramiro Torres et al (2017) desarrolla un secador de yuca que dispone un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando como material de cambio de fase la parafina contenidas en latas de aluminio.

En la climatización de edificios se han diseñado y construido sistemas de almacenamiento de calor latente integrados con sistemas pasivos (captación solar, ventilación natural). Alicia Oliver (2009) incorpora de materiales de cambio de fase en placas de yeso para viviendas. Oró et al (2012) implementa un sistema de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones de enfriamiento solar y refrigeración, utilizando diferentes materiales de cambio de fase para enfriamiento y refrigeración solar en viviendas bioclimáticas.

En lo referente a invernaderos, se ha diseñado y experimentado prototipos de acumuladores de calor sensible, para ser utilizado como parte de un sistema de acondicionamiento térmico de un invernadero hidropónico en el que se utilizaron envases de politereftalato de etilenglicol (PET) llenos con agua como fluido de acumulación térmico (Díaz et al., 2010). Bistoni et al (2002) han desarrollado invernaderos solares, que utilizan un lecho de piedras para acumular calor sensible de la radiación incidente.

Leucona et al (2016) han desarrollado cocinas solares que integra captación, acumulación térmica y horno, en un conjunto robusto y apropiado para ser instalado permanentemente en exteriores, utiliza un material de alto poder acumulador de calor de cambio de fase; el diseño permite alcanzar temperaturas superiores a 100 °C.

1.5 Justificación de la investigación

La energía es la base de toda actividad humana, que debe ser utilizada con eficiencia y responsabilidad ambiental. El Perú es un país con un potencial de energía solar alto (Horn y Espinoza, 2017), y Ayacucho cuenta con una intensidad de radiación diaria promedio anual de 5,5 a 6,0 kWh/m² (SENAMHI, 2013) lo que muestra que la energía solar en Ayacucho es rentable; sin embargo de acuerdo al diagnóstico del uso de la energía solar y eólica en el país realizado por el Centro de Conservación de Energía y del Ambiente del Perú (CENERGÍA, 2010), se muestra que en Ayacucho existe una escasa cantidad de unidades de sistemas solares instaladas, siendo de esta escasa cantidad el sector familiar el que dispone de menor capacidad instalada, sobre todo en aplicaciones térmicas como cocinas solares, termas, secadores, etc. Este diagnóstico, no ha variado ostensiblemente en la actualidad, sobre todo a nivel familiar; aunque se muestran cambios positivos a nivel comercial. Este hecho muestra que la tecnología solar no es aún una tecnología apropiada por los usuarios tanto de la zona rural como de la zona urbana de nuestra ciudad; más aun considerando que la energía del Sol es económicamente más rentable, viable y ecológico. Por otro lado, de acuerdo al Decreto Supremo Nº 064-2010-EM del Ministerio de Energía y Minas Perú, entre sus objetivos se plantea una matriz energética diversificada con énfasis en las fuentes renovables y la eficiencia energética, así como lograr la autosuficiencia en la producción energética. Para el logro de estos propósitos es necesario incentivar, fomentar el uso eficiente y responsable del recurso energético solar desde la unidades familiares y generar una cultura de uso de las energías renovables en el marco de la eficiencia energética y desarrollo sostenible, lo que orienta a desarrollar tecnologías prácticas y sencillas que puedan ser apropiadas por el usuario y que incorporen a su cultura de vida; a su vez ello compromete a generar mecanismos de masificación del uso de la tecnología solar familiar que fortalezca la educación ambiental tomando

mayor conocimiento de los impactos nocivos de las energías convencionales y de esta manera fomentar el uso eficiente y responsable de la energía.

Uno de los problemas que afronta el aprovechamiento de la energía solar, es su almacenamiento (Zelota, 2013), por lo se encuentra un amplio desarrollo de acumuladores solares que permiten acumular la energía cuando se presenta en exceso, y la entrega cuando escasea. El empleo de materiales de cambio de fase permite reducir volúmenes de acumulación, ahorrar energía y controlar los cambios de temperatura en sistemas pasivos o activos (Zelota, 2013). Por lo que es importante investigar y conocer más acerca del comportamiento de los materiales de cambio de fase, para así diseñar acumuladores tanto desde el punto de vista de su dosificación, como su comportamiento térmico y optimizarlas en las aplicaciones de sistemas solares, por ejemplo, para un uso específico familiar como cocinas, secadores, invernaderos y termas. De ahí la necesidad de buscar formas de acumulación de energía térmica más eficiente. Por otro lado, es concordante con el fomento de la eficiencia energética como parte importante del conjunto de políticas y medidas necesarias para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la producción de las energías renovables (Zelota, 2013).

La inclusión de un sistema que utilice materiales de cambio de fase, permite proteger del exceso de temperatura, porque permite controlar los cambios de la temperatura; por ejemplo, en la cámara de secado, mantiene una temperatura media apropiada que prolonga el proceso de secado más allá de las horas de incidencia de la radiación solar, lo que reduce el tiempo de secado (Díaz et al., 2010); de igual manera, se puede optimizar el proceso de cocción en cocinas solares.

En esta medida, tomando en cuenta el enfoque del desarrollo sostenible que busca alternativas energéticas ambientalmente apropiadas y sistemas energéticamente eficientes (Rodríguez, 2015), el desarrollado de módulos o prototipos de acumuladores térmicos, en base a materiales de cambio de fase y/o materiales de calor sensible que se disponen en la localidad, va a permitir garantizar la demanda energética de los usuarios. El acumulador, puede adaptarse y acondicionarse en el uso familiar de cocinas, termas, secadores e invernaderos solares para de esta manera hacer más sostenible el uso de la tecnología solar, lo que contribuirá a mejorar la calidad de vida de los pobladores usando un recurso limpio y económico.

Con la finalidad de reducir costos del sistema, se encuentran sistemas pasivos, que se caracterizan por que no usan un aporte de energía adicional, sino que utilizan las condiciones ambientales y morfología del diseño para optimizar su funcionamiento. La acumulación térmica mediante calor latente a través de la selección apropiadas de materiales de cambio de fase, ofrece ventajas en aplicaciones de mediana y alta temperatura y se pueden integrar con relativa facilidad en las diferentes aplicaciones solares (Rodríguez, 2015).

1.6 Limitaciones de la investigación

El alcance del trabajo está orientado a aplicaciones de tecnología solar de escala familiar, cuya demanda de energía es mediana para uso del entorno familiar y que en algunos casos puede generar ciertos beneficios económicos. La sostenibilidad del uso de la energía solar se verá fortalecida en nuestro medio, en la medida que a través de las unidades familiares se incorpore la cultura de la eficiencia energética y renovable en los hábitos, costumbre y el modo de vida del usuario familiar.

La aplicación de una tecnología, y más aun de la tecnología solar, plantea la necesidad de apreciar no sólo el punto técnico de ingeniería, sino fundamentalmente ver el aspecto cultural y la realidad social de lugar donde se pretende aplicarla (Serrano, 1985); en este sentido el uso de la tecnología solar, fundamentalmente implica la exposición del usuario a la radiación solar, a su vez implica también adoptar ciertos hábitos para el control y manejo de la tecnología, aspectos que

van a limitar la apropiación de estas tecnologías. Es en este sentido, el trabajo de investigación sólo se ha limitado al aspecto técnico de dominio de la acumulación de la energía térmica a partir de la radiación solar.

Por otro lado, los acumuladores térmicos pasivos están fuertemente condicionados a la temporalidad de la energía solar, responden a escalas estacionales, por lo que se les denomina sistemas de acumulación estacional. De manera que, dada la latitud del lugar de aplicación, las variaciones del recurso solar entre las diferentes estaciones son suficientes como para que un sistema de acumulación estacional sea factible con la efectividad que se espera; por otro lado, constituye una alternativa ambiental y relativamente económica.

1.7 Objetivos

1.7.1 Objetivo general

Determinar la influencia del acumulador solar térmico pasivo de mediana temperatura con materiales locales de cambio de fase y calor sensible en el funcionamiento los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho.

1.7.2 Objetivos específicos

- a. Determinar la influencia de material local de cambio de fase en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho
- b. Determinar la influencia del intercambiador de calor en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho.
- c. Determinar la influencia de la energía acumulada en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho.

1.8 Hipótesis

1.8.1 Hipótesis general

El acumulador solar térmico pasivo de mediana temperatura con materiales locales de cambio de fase y calor sensible influyen significativamente en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho.

1.8.2 Hipótesis especificas

- a. El material local de cambio de fase influye significativamente en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho.
- b. El intercambiador de calor influye significativamente en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho
- c. La energía acumulada influye significativamente en los sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho.
II. Marco Teórico

2.5 Marco Filosófico

2.5.1 Bases filosóficas de la naturaleza

Para entender la naturaleza, se puede plantear desde el punto de vista científico o desde el punto de vista filosófico (Artigas, 2003, p.21). La ciencia, busca entender los fenómenos naturales en base a las relaciones causales en términos de otros fenómenos (Artigas, 2003, p.21); en tanto desde el punto de vista filosófico, a la que se denomina filosofía de la naturaleza, se "busca explicaciones que se refieren al «ser» y a los «modos de ser» de las entidades y procesos naturales" (Artigas, 2003, p.21), de manera que la filosofía es un "saber más radical, más profundo en su conocimiento de la naturaleza" (Ramón, 2018, p.3). Estas dos perspectivas de conocer la naturaleza se desarrollan independientemente, pero que sin embargo están relacionadas "las ciencias se apoyan en unos supuestos filosóficos y la filosofía debe contar con los conocimientos científicos" (Artigas, 2003, p.21).

Ramón (2018) afirma que hay planteamientos que reducen la filosofía de la naturaleza a la filosofía de la ciencia, de manera que la filosofía de la naturaleza o "es la visión sintética y reflexiva de la naturaleza", o es una disciplina "metodológica que equivaldría a una reflexión sobre los procedimientos y objetivos de las ciencias naturales" (Ramón, 2018, p.5); más adelante Ramón (2018) precisa que la filosofía de la naturaleza conoce la naturaleza desde un punto de vista más bien ontológico (Ciencia del ser), en tanto que la filosofía de las ciencias naturales se enfoca desde la perspectiva epistemológica (gnoseológic); no obstante son enfoques complementarios. Artigas (2003), sostiene que cuando en el siglo XIX, el idealismo empezó a invadir el terreno de la ciencia se generó una reacción anti-filosófica en la ciencia, desarrollándose el cientificismo, que planteaba que la ciencia experimental era el único conocimiento válido de la realidad; siendo una de sus

variantes el positivismo, "que pretendía reducir la ciencia a establecer relaciones entre fenómenos observables, evitando todo lo que traspasara ese límite" (Artigas, 2003, p.24). El objetivo fundamental de la filosofía de la naturaleza, es el ser humano, por ocupar el lugar central en la naturaleza. En el conocer del hombre y la naturaleza, se plantean dos posiciones, por un lado los naturalistas según la cual el mundo se explica en base a sus propias interacciones y las posiciones idealistas que sostienen la necesidad de encontrar causas más allá de su propia naturalidad (Artigas, 2003, p.24). Dewey, plantea el modelo teórico en el que el conocimiento pueda ser comprendido como mediado por relaciones naturales, causales, cognitivas y culturales (Magalhães, 2017, p.139).

Artigas (2003) sostiene la existencia de "genuinos problemas filosóficos" como la explicación última del orden que existe en la naturaleza, la explicación de las entidades, procesos, y propiedades de la naturaleza de modo general, la finalidad de la naturaleza, etc.

Desde la perspectiva marxista, es importante resaltar la dimensión de naturaleza como esencial de la existencia de los seres humanos, la naturaleza:

Se torna una naturaleza cualitativamente distinta, social, inmanente a las relaciones sociales de producción que contraen los hombres entre sí a la hora de producir el medio material y la vida social misma, independientemente de su conciencia y voluntad, realizando su ser socialmente (y que en tanto el hombre también es una especie natural es la mediación de la naturaleza a través de la especie. (Koppmann, 2013, p.30)

El marxismo plantea la naturaleza social que relaciona a los hombres. Por otro lado, el planteamiento marxista sobre la ontología, establece que la ontología es un término que "sostiene la filosofía burguesa para señalar la teoría del ser, de la existencia, a diferencia de la gnoseología, que es la teoría del conocimiento" (Rosental e Iudin, 1946, p.236). La crítica de la filosofía

marxista a la filosofía burguesa, es que la filosofía burguesa opone la teoría de la existencia a la teoría del conocimiento y busca "construir la teoría sobre las formas del pensar, fuera e independientemente de la existencia, de la realidad objetiva que es reflejada en ellos" (Rosental e Iudin, 1946, p.237).

La ontología en Marx se refiere a que los humanos son individuos reales, materiales y sensibles socialmente, se fundamenta en la realidad materialista y dialéctica. Se refiere al "ser social, históricamente constituido a partir de determinadas condiciones sociohistóricas" (Siqueira, 2015, p.3). La teoría social planteada por Marx se basa en tres pilares indisociables: "la teoría del valor-trabajo, la dialéctica materialista y la perspectiva de la revolución del orden burgués (como referencia objetiva y posible)" (Siqueira, 2015, p.3).

2.5.2 Bases filosóficas de la ciencia y tecnología

La ciencia es un cuerpo de ideas sistematizadas, que puede caracterizarse como conocimiento racional, exacto, verificable y por consiguiente falible (Bunge, 2001, p.11).

La ciencia pertenece a la vida social del hombre, con la cual cambia la naturaleza sometiéndola de acuerdo a sus necesidades y creando el mundo de los artefactos y el de la cultura. La ciencia en "cuanto se la aplica al mejoramiento de nuestro medio natural y artificial, a la invención y manufactura de bienes materiales y culturales,.. se convierte en tecnología" (Bunge, 2001, p.11).

Mario Bunge (2001) diferencia las ciencias formales (Matemática y lógica) y ciencias fácticas (física, química, fisiología, economía, etc.), las ciencias fácticas utilizan a la matemática como una herramienta "para realizar la más precisa reconstrucción de las complejas relaciones que se encuentran entre los hechos y entre los diversos aspectos de los hechos" (Bunge, 2001, p.14).

Bunge (2001) sostiene que las ciencias fácticas además de la racionalidad de sus enunciados deben ser verificables en la experiencia, indirectamente (hipótesis generales) o directamente (en el caso de las consecuencias singulares de las hipótesis). El enunciado de la ciencia fáctica se considera verdadero, después que se haya verificado empíricamente. No obstante, no garantiza que la hipótesis planteada sea la única verdadera; sólo establece que es probablemente adecuada y que existe la posibilidad de encontrar hipótesis que "pueda dar mejores aproximaciones en la reconstrucción conceptual del trozo de realidad escogido" (Bunge, 2001, p.14). El conocimiento fáctico, "aunque racional, es esencialmente probable: dicho de otro modo: la inferencia científica es una red de inferencias deductivas (demostrativas) y probables (inconcluyentes)" (Bunge, 2001, p.14).

La tecnología tiene hoy una importancia fundamental en la sociedad. Si bien, el estudio del fenómeno tecnológico se ha relegado frente al estudio de la ciencia (Gonzales et al, 2004, p.1) sin embargo cobra interés su reflexión dado el incesante impacto al medio ambiente.

Se han desarrollado diversas concepciones de la tecnología, como sostiene Gonzales et al (2004) desde planteamientos de la tecnología como ciencia aplicada o como meros instrumentos (p.1).

Considerando a la tecnología como ciencia aplicada, para entenderla se debe analizar el proceso científico. De manera que, si se considera que la ciencia es valorativamente neutral, los artefactos resultantes de su aplicación y la tecnología también son neutrales; es más bien el uso de la tecnología lo que plantea problemas éticos, políticos y sociales (Gonzales et al., 2004, p.1), no obstante, hay autores que sostienen que la tecnología no es neutral lleva una carga ideológica.

Llano (2015) menciona que la tecnología tiene una fuerza liberadora a partir de la instrumentalización de las cosas, pero que sin embargo termina degenerando y convirtiéndose en

un encadenamiento de la liberación, que significa, la instrumentalización del hombre (p.4). Para "evitar que la racionalidad tecnológica acabe legitimando la dominación y, lo que sería aún peor, dando aliento a la configuración de sociedades racionalmente totalitarias, es necesario establecer una suerte de intermediación entre la naturaleza, el hombre y la técnica" (Llano, 2015, p.4). Por lo que hay la "necesidad de hallar un punto de encuentro entre el progreso científico-técnico y lo que él denomina el mundo social de la vida" (Llano, 2015, p.4).

De acuerdo a Santandreu (1992), Ortega define la técnica como la reacción enérgica contra la naturaleza, que permite crear al hombre una sobre naturaleza en la considera más importante su bienestar. Mediante el uso de la técnica el hombre intenta ser independiente del mundo exterior y adapta el medio a voluntad; el hombre al buscar su bienestar busca satisfacer esas otras necesidades superfluas (Diéguez, 2013, p.75).

2.5.3 Relación hombre y naturaleza: Desarrollo Sostenible

Desde mediados del siglo XX, se va dando una creciente atención a los problemas de degradación del medio ambiente. Por lo que es necesario explorar la procedencia de la problemática, sus causas y consecuencias sobre el ambiente, la economía y la sociedad. De acuerdo a Ortiz (2014) es de interés filosófico y científico estudiar la relación hombre-naturaleza (p.3).

A partir del Renacimiento se produce el auge en el desarrollo de las ciencias, donde comienza una relación hombre-naturaleza en un sentido de contraposición, donde la naturaleza es considerada como objeto de transformación y dominación en relación al nivel de conocimiento. Aparece el dominio de la naturaleza por el hombre a través de la ciencia y la técnica (Ortiz, 2014, p.65).

Los filósofos alemanes Emmanuel Kant (1724- 1804) y G. F. Hegel (1770-1831), realizaron aportes significativos en el estudio filosófico de la relación hombre-naturaleza. Kant,

"valora la naturaleza como conjunto de fenómenos en espacio y tiempo, pero el hombre no puede llegar a conocerla por su base a priori y a su vez la naturaleza... es un todo cerrado en sí mismo, con su propio ordenamiento causal" (Kant, citado por Ortiz, 2014, p.66).

Para Hegel, la naturaleza no es más que "la materialización de algo preexistente como era el espíritu absoluto; de esta forma, separa las posibilidades del hombre como sujeto capaz de interactuar con la naturaleza" (Hegel, citado por Ortiz, 2014, p.66). Hegel plantea que la vida orgánica es el "momento más desarrollado de la naturaleza, en cuanto refleja la estructura de lo espiritual" (Ortiz, 2014, p.66).

Desde el punto de vista de Carlos Marx (1818-1883) y Federico Engels (1820-1895) sobre la relación del hombre con la naturaleza, se reconoce que la naturaleza sufre cambios por la intervención del hombre a través del trabajo (Marx, citado por Ortiz, 2014, p.66). Engels plantea la búsqueda de equilibrio con la naturaleza (Engels, citado por Ortiz, 2014, p.66).

Con el desarrollo de las investigaciones modernas y contemporáneas se han producido diferentes planteamientos de la naturaleza y el hombre; Ernest Mach (1838 – 1916) y Henri Poincaré (1854 – 1912) analizan la relación hombre – naturaleza, el primero desde la ciencia física y el segundo con una visión de la Matemática (Ortiz, 2014, p.66).

Herbert Marcuse (1898-1979), Max Horkeheimer y Teodoro Adorno plantean que el dominar sin fin la naturaleza, desarrolla en el hombre un sentimiento de poder y no de cuidado (Marcuse, citado por Ortiz, 2014, p.67).

Estos diversos planteamientos para conocer y entender al hombre, la naturaleza y su interrelación, ha permitido que diferentes agrupaciones como el Club de Roma, grupos ecologistas, los Partidos Verdes, la Conferencia de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (Estocolmo-1972), la Conferencia Intergubernamental de Educación Ambiental de la UNESCO (1977),

muestren interés y preocupación por conocer las causas y efectos el deterioro de la naturaleza. Por otro lado, la filosofía no ha estado ajena al llamado informe Brutland (1987) conocido como "Nuestro futuro común", donde se estableció los aspectos teóricos para el estudio el desarrollo sostenible (Ortiz, 2014, p.67) como una alternativa a mitigar la degradación de la biósfera.

Naturaleza y hombre, en este panorama filosófico descrito, mantienen un nexo (Ortiz, 2014, p.67). No se puede separar sociedad y naturaleza: "ni las sociedades humanas pueden escapar nunca del todo a sus determinaciones naturales,..., ni la naturaleza es desde hace ya milenios otra cosa que naturaleza humanizada" (Riechmann, 2011, p.2).

Los problemas ecológicos ambientales actualmente en interés, no se pueden reducirse a una cuestión de valores o construcciones simbólicas, tienen que ver con las relaciones establecidas entre los humanos y la naturaleza; de manera que Riechmann (2011) sostiene que "La crisis ecológica es una crisis social. Lo que está fallando no es la naturaleza, es nuestra sociedad: su estructuración interna y sus formas de intercambio con la naturaleza" (p.2). Daniel Tanuro, menciona que "La crisis ecológica y la crisis social son una y la misma crisis: la crisis del sistema capitalista. La expresión 'crisis ecológica' resulta engañosa: no está en crisis la naturaleza, sino la relación entre sociedad y naturaleza" (Tanuro, citado por Riechmann (2011, p.2).

La crisis ecológica global (denominado "cambio global") al decir de José Ortega y Gasset "no es sino el choque de las sociedades industriales contra los límites biofísicos del planeta. Esto apunta, claro, a una crisis sistémica" (Ortega y Gasset, citado por Riechmann, 2011, p.4).

2.6 Teorías generales relacionadas con el tema

2.6.1 Desarrollo Sostenible

A lo largo de la historia, se muestra que el hombre ha aprovechado los diversos ecosistemas y sus recursos para satisfacer sus necesidades vitales, generando impactos sobre el ambiente que se van incrementando con el tiempo, a medida que se intensifica la influencia antrópica sobre los recursos y su dominio sobre la naturaleza. Estos impactos al ambiente, cobran mayor interés por el acelerado proceso de deterioro de la biósfera, como consecuencia del límite en la naturaleza a la explotación de los recursos, el crecimiento económico descontrolado, etc. amenazando con ello la calidad de vida de las personas (Pérez, 2012).

En este contexto, surge el concepto de desarrollo sostenible, como resultado de la primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano (Estocolmo-Suecia 1972) (Conte y D'Elia, 2017), donde se discutió por primera vez la problemática ambiental a nivel global. El Club de Roma preparó el informe: Los límites del crecimiento (The Limits to Growth), donde se concluye que si permanecen sin cambios: las tendencias actuales del crecimiento de la población mundial, la industrialización, la producción desproporcionada y la contaminación ambiental; el crecimiento en nuestro planeta alcanzará su límite dentro de los próximos 100 años (Fauzer et al., 2018). En referencia a este informe, en 1982 se creó la Comisión Mundial sobre el Medio Ambiente y el Desarrollo, que en 1987 dio origen al Informe Nuestro Futuro Común (Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future), conocido como Informe Brundtland, en referencia a Gro Harlem Brundtland, exprimera ministra de Noruega que presidió la comisión, y en el que se define el concepto de desarrollo sostenible (Conte y D'Elia, 2017). El desarrollo sostenible amplía el concepto tradicional de desarrollo, dado que integra la dimensión económica y social con la dimensión ambiental. El Informe Brundtland plantea que: "El desarrollo sostenible es un desarrollo que satisface las necesidades del presente sin comprometer la capacidad de las generaciones futuras para satisfacer sus propias necesidades" (Fauzer et al., 2018, p.121).

En 1992 se lleva a cabo la conferencia de la ONU denominada la Cumbre de la Tierra (Río de Janeiro- Brasil), donde se inició el estudio y evaluación del desarrollo sostenible a nivel mundial y, se aprueba la Agenda 21, un plan de acción para lograr implementar el desarrollo sostenible en el mundo en el siglo XXI.

Posteriormente, la ONU desarrolla dos documentos importantes: uno la Declaración del Milenio (2000) que contiene 8 objetivos de desarrollo que deben alcanzarse hasta 2015 y 21 metas (United Nations Millennium Declaration. Resolution adopted by the General Assembly), y el otro documento denominado Transformando nuestro mundo: la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, en la que se definieron 17 objetivos y 169 metas. Mucho de estos objetivos relacionan los problemas sociales y económicos que confronta los diferentes países del mundo, los procesos laborales, la erradicación de la pobreza, la erradicación del hambre, la buena salud y el bienestar, la calidad de la educación, igualdad de género, trabajo decente, crecimiento económico, y la reducción de la desigualdad (Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development.) (Fauzer et al., 2018).

En el año 2002, la ONU desarrolla la Cumbre Mundial sobre el Desarrollo Sostenible (Johannesburgo: Sudáfrica). En 2012, la mayoría de las naciones del mundo participan en Río de Janeiro en la llamada "Cumbre Río+20", donde se plantea la declaración llamada: "El futuro que queremos" que propone retos por alcanzar para enfrentar las crisis financieras, la escasez de agua y de recursos, contaminación ambiental como problemas mundiales (Fauzer et al., 2018).

A partir de las reuniones previas a Río+20 se empezaron a emplear términos alternativos al desarrollo sostenible, como "economía verde" en el Nuevo Acuerdo Verde Global (Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente: PNUMA) en el año 2009, "crecimiento verde" en la Declaración sobre Crecimiento de la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE). Estos nuevos vocablos "verdes" al decir de Conte y D´Elia (2017), tendrían como objetivo dinamizar, agregar operatividad y ser un medio para llegar al desarrollo sostenible. En este sentido, el desarrollo sostenible aparece como un concepto más amplio que los restantes (Conte y D´Elia, 2017).

El concepto de desarrollo sostenible, armoniza los objetivos sociales y económicos con los del medio ambiente, tomando en cuenta a las futuras generaciones; esto no significa crecimiento cero, significa, plantear una "búsqueda de otro tipo de crecimiento, que proporcionen métodos y usos de crecimiento económico que conlleven progreso social y sean compatibles con la conservación de los recursos naturales y ambientales" (Sachs citado por INFOAGRO, 2015, p.4). La época actual exige transformar el paradigma de actual modelo de desarrollo, dado que los patrones de desarrollo tradicionales ya no son viables dentro del marco de un desarrollo sostenible, inclusivo y con visión de largo plazo (CEPAL, 2016).

2.6.2 Objetivos del desarrollo sostenible

El desarrollo sostenible debe entenderse, sostiene Pérez (2012), no como un objetivo final, sino como un proceso dinámico de adaptación, aprendizaje constante y acción permanente para establecer, explorar y utilizar las relaciones armónicas entre la economía, la sociedad y el medio ambiente. La implementación del desarrollo sostenible en diferentes países del mundo, muestran resultados nada alentadores, indican un grado de "estancamiento" o en algunos casos "retroceso" de las metas (Bissio, 2017); de manera que se ha hecho necesario desarrollar instrumentos, indicadores, métodos para realizar el seguimiento del cumplimiento de las metas y la medición del nivel de progreso, lo que permitirá aprender de las experiencias y retroalimentar las acciones (Kociuba y Szafranek, 2018).

En 2015, se proclamaron la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, con 17 Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) y 169 metas (CEPAL, 2016). Los ODS tienen una orientación inclusiva, que abordan los problemas fundamentales contemporáneos como la pobreza, discriminación, fallas estructurales de los sistemas económicos y financieros globales, etc. (SPOTLIGHT, 2017, p.8). La Agenda 2030 tiene un sentido transformador, pone la igualdad y dignidad de las personas en el centro y plantea un nuevo paradigma de desarrollo, sobre la base del respeto al ambiente y la inclusión social (CEPAL, 2016).

Para los fines de la presente tesis resaltamos algunos objetivos del desarrollo sostenible, no obstante que ningún objetivo está aislado del resto, y cada uno requiere enfoques integrales y participativos.

Objetivo 1. "Poner fin a la pobreza en todas sus formas en todo el mundo" (CEPAL, 2018, p.15)

Según el Banco Mundial, la pobreza extrema a nivel mundial registró su nivel más bajo 10% en el 2015, se advierte que esta tasa disminuye a un ritmo muy lento, que compromete no alcanzar este objetivo al 2030 (Banco Mundial, comunicado de prensa septiembre 19, 2018).

Objetivo 2. "Poner fin al hambre, lograr la seguridad alimentaria y la mejora de la nutrición y promover la agricultura sostenible" (CEPAL, 2918, p.19).

El cambio climático acelerado está haciendo que se ponga mayor atención en la explotación indiscriminada de los recursos, que va aumentando los riesgos asociados a desastres como las sequías, inundaciones, contaminación del aire, etc. La explotación indiscriminada genera impactos sociales como el desplazamiento de sus tierras de las poblaciones originarias, como consecuencia de la agresión de las mineras que contaminan sus tierras y agua que les obliga a emigrar a las ciudades (CEPAL, 2018), dejando de lado las actividades agrícolas y van engrosando los sectores de mayor pobreza.

Concordante con este objetivo, una alternativa a escala familiar es el desarrollo de la agricultura familiar para diversificar los modelos agrícolas existentes y para lograr la evolución de lo que antaño fue un modelo familiar de agricultura sostenible (AMBIENTA, 2014). La agricultura familiar en biohuertos e invernaderos, son sistemas de producción agrícola más antiguos y son una alternativa doméstica a las prácticas tradicionales de conservación de la diversidad vegetal.

Objetivo 7. "Garantizar el acceso a una energía asequible, segura, sostenible y moderna para todos" (CEPAL, 2018, p.37)

La agenda 2030 reconoce que la energía es una de las necesidades básicas de la humanidad y un componente fundamental para el progreso de la humanidad. El objetivo 7, está relacionado a los demás ODS (SPOTLIGHT, 2017). La energía es una fuente principal para las diversas actividades realizadas por el hombre; para los empleos, el cambio climático, la producción de alimentos o para aumentar los ingresos (CEPAL; 2018). La energía es fundamental para el logro de la seguridad alimentaria y una mejor nutrición; de manera que concordante con este objetivo debe diversificarse la energía hacia fuentes renovables, desvinculándose gradualmente de la dependencia de combustibles fósiles (FAO, 2015).

Objetivo 13. "Adoptar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos" (CEPAL, 2018, p.59).

El cambio climático es un impacto ambiental que está afectando a todos los países del mundo, genera cambios en los patrones climáticos y en los fenómenos meteorológicos que se hacen más extremos. El incesante aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero causadas por las actividades humanas, durante estos últimos años, ha generado un acelerado cambio de la temperatura media de la superficie de la tierra, que podría aumentar 3º C este siglo; ello demanda adoptar medidas urgentes para minimizar el cambio climático y sus efectos (CEPAL; 2018).

El Perú ha adoptado los ODS, comprometiéndose con su ejecución, seguimiento y evaluación de los progresos conseguidos (Ministerio del Ambiente, 2016) en el país. Siendo el Centro Nacional de Planeamiento Estratégico (CEPLAN) el impulsor de la construcción de la visión país al 2030 y la formulación del Plan Estratégico de Desarrollo Nacional (PEDN).

La ejecución de los ODS en el Perú se ve muy comprometida por la presencia cada vez más crítica, de las desigualdades económica y sociales de la población, por los conflictos sociales que van incrementándose, conflictos que actualmente cobran su mayor expresión en las posiciones anti mineras de las poblaciones rurales fundamentalmente, la corrupción generalizada de los diversos sectores del país, los conflictos sociales, etc.

2.6.3 Sostenibilidad de la tecnología solar térmica en el Perú

2.6.3.1 Panorama mundial. A nivel del país, va aumentando el interés y la concientización sobre la importancia de la energía renovable por su ventaja ambiental y económica; cuyo uso se ha extendido significativamente en términos de capacidad instalada y energía producida; siendo el sector eléctrico solar fotovoltaico, eólico e hidráulico los que muestran un incremento sustancial. Por otro lado, el desarrollo de aplicaciones térmicas con energía renovables para la calefacción, el enfriamiento y el transporte se muestran muy limitadas.

El panorama mundial de las energías renovables (REN21, 2017), muestra que la capacidad total de energía renovable instalada en el mundo, hasta finales del 2016, fue de alrededor de 921 GW/h como podemos ver en la Figura 1; no se considera la energía hidroeléctrica dentro de esta representación.

Figura 1



Capacidades de energía renovable en el mundo, UE-28, BRICS y los seis países líderes, 2016

Nota. Adaptado de Capacidades de energía renovable en el mundo, 2017, "Energías renovables 2017: Reporte de la situación mundial. Hallazgos claves", Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21).

De la producción de energía a nivel mundial al 2017, se estima que el porcentaje que corresponde a la participación de energía renovable es de 19,3%. De los cuales, el 10,2% corresponde a la energía renovable moderna entre ellos la energía solar fotovoltaica, térmica, eólica, geotérmica, etc. (REN21, 2017) (ver Figura 2). En lo referente al empleo de tecnología solar térmica, se muestra que se ha tenido un continuo pero lento progreso. El requerimiento de energía solar térmico, se orienta hacia demandas de calentamiento doméstico de agua en termas solares, fundamentalmente en hoteles, escuelas y otros complejos de gran tamaño (REN21, 2015), siendo el sector familiar el que menos incorpora dichas tecnologías. Actualmente viene

incrementándose el interés por aplicaciones tecnológicas en viviendas o edificaciones bioclimáticas para el acondicionamiento térmico. Dentro del sector solar térmico para calentamiento y enfriamiento se está desarrollando gran variedad de tecnologías alternativas que incorporan nuevos materiales y procesos, como los sistemas de almacenamiento de energía térmica (TES, por sus siglas en inglés), los materiales de cambios de fase (REN21, 2015).

Figura 2

Porcentaje estimado de energía renovable en el consumo total final de energía en el mundo.



Nota. Adaptado de Porcentaje estimado de energía renovable, 2017,"Energías renovables 2017: Reporte de la situación mundial. Hallazgos claves", Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (REN21).

2.6.3.2 Energías renovables en el Perú. El Perú, tradicionalmente produce energía hidroeléctrica y es de los países que utilizan una alta tasa de energías renovables. Sin embargo, el sistema energético del Perú tiene una matriz que depende de un 80% de energía primaria del petróleo, gas natural y sus derivados (Ríos, 2016); en lo referentes a la energía eléctrica, el 50% proviene del agua y el otro de hidrocarburos (principalmente gas).

En lo referente a las fuentes de energías renovables en el Perú, en el 2017, del total de la producción de energía para la red, solamente el 2,17% vinieron de fuentes eólicas y el 0,51% de fuentes solares (COES, 2017). Pero sin embargo, de acuerdo a las cifras del Balance Nacional de Energía, en el Perú se liberan alrededor de 2,550 T/h de CO₂ por el consumo de energía de combustibles fósiles (Gamio, 2015).

El Perú es uno de los países con un enorme potencial en energías renovables, todavía no es aprovechada no obstante que dispone de una alta capacidad de generación eléctrica con energías renovables. La Tabla 1 ilustra el potencial en energías renovables del Perú al 2013.

Tabla 1

Fuente de energía	Potencial total	Capacidad	
Renovable	(MW)	Instalada	
		(MW)	
Hidráulica	75 000	2 954	
Eólica (viento)	22 000	142	
Solar	Indefinido	80	
Biomasa	Indefinido	27,4	
Geotérmica	3000	0	

Potencial en energías renovables del Perú

Nota. Adaptado de Potencial en energías renovables, 2015, P Gamio, Matriz Energética y Desarrollo Sostenible, Perú.

En referencia a la energía solar, el Perú es considerado entre los 6 países del mundo con mayor incidencia de energía solar, debido a que se encuentra entre el paralelo 0° 08´ Latitud Norte y 18° 13´ Latitud Sur, dentro de los trópicos; por la que presenta poca variación anual de la energía

solar, en comparación con latitudes medias y altas (Loayza, 2012). De acuerdo al Atlas de Energía Solar del Perú (SENAMHI, 2013) la zona de mayor potencial solar del Perú se encuentra en la costa sur (Arequipa, Moquegua y Tacna) entre los 16° y 18° de latitud sur, con un promedio anual de energía solar incidente diaria entre 6,0 a 6,5 kWh/m². Otras zonas con alta disponibilidad diaria, entre 5,5 a 6,0 kWh/m², se encuentran en la costa norte, en las regiones de Piura y Tumbes (entre los 3° y 8° de latitud sur) y en gran parte de la sierra, sobre los 2 500 msnm. Debe destacarse que en los Andes, la radiación solar promedio mensual es alta durante todo el año, con días de sol en el orden del 65% de días del año. La zona con menores valores de energía solar es la selva, las regiones de Loreto, Ucayali y Madre de Dios, que registran valores de 4,5 a 5,0 kWh/m², con una zona de mínimos valores en el norte de la región Loreto (entre los 0° y 2° de latitud sur).

En el departamento de Ayacucho, en estos últimos años se ha incrementado el uso de la tecnología solar, principalmente enfocados a aplicaciones fotovoltaicas en el suministro de energía eléctrica, bombeo de agua, cargador de batería, telecomunicaciones, etc., siendo esta tecnología la que más se adapta al requerimiento del usuario; en tanto que las aplicaciones térmicas más difundidas están orientados fundamentalmente al calentamiento de agua en termas solares para hoteles y en menor escala en el uso de secadores e invernaderos.

El uso de energía solar térmica en la cocción de alimentos o calentamiento de agua, tiene un interés primordial en las zonas rurales del Perú fundamentalmente dentro de las unidades familiares, dado que el consumo de leña procesada y quemada como combustible, corresponde al 50% de la madera recogida en todo el planeta; y en referencia a latinoamericana, el 40% de la producción y procesamiento de madera, termina siendo combustible para cocción, calentamiento, etc. (Montalvo y Zamora, 2009, p.3). No obstante, las ventajas ecológicas y económicas de las aplicaciones solares térmicas, la tecnología de las cocinas solares no constituye aún una tecnología sostenible para el usuario, sobre todo en las zonas rurales de nuestro país, como Ayacucho. Ello plantea que la construcción y aplicación de las cocinas solares, debe tomar en cuenta características, mecanismos de operación y funcionamiento correspondientes a la cultura de la población usuaria. Se deben incluir características de ergonomía y antropometría, y posibles interacciones incidentales entre el producto y el usuario. La aplicación térmica para cocción de alimentos es la menos difundida en la región de Ayacucho, debido entre otros aspectos, a la intermitencia de la disponibilidad energética y la exposición continua al sol por parte del usuario.

En el Perú, a causa de precios muy favorables del gas de Camisea y de las centrales hidroeléctricas, el costo de la energía convencional es más bajo en comparación al de las energías renovables no tradicionales; por lo que el uso de aplicaciones tecnológicas solares, que son rentables a largo plazo (Delta Volt, 2019), se ven relegados a veces a los sectores rurales.

2.6.3.3 Marco normativo para el uso eficiente de la energía en el Perú. Son muchos los países del mundo, entre ellos el Perú, que han adoptado objetivos para el logro de la eficiencia energética y las energías renovables, en el marco de desarrollo sostenible, pero aún no cuentan con las políticas adecuadas para alcanzarlos y no están suficientemente integradas a nivel mundial (Ríos, 2016). No obstante se considera al Perú como un país que no destaca por tener una cultura de uso racional e inteligente de la energía, de ahorro y eficiencia energética en los diferentes sectores de la economía nacional. Ello puede deberse, conforme lo plantea Ríos (2016), a dos factores: primero, el discurso de las élites de poder nacionales que ofertan una energía barata, y segundo, los intereses particulares de las empresas del sector eléctrico, que no se interesan en el ahorro y eficiencia energética, puesto que atenta con sus intereses económicos.

En el Perú, en el año 2000, se aprueba la Ley 27345 de "Promoción del Uso Eficiente de la Energía" (Congreso de la República de Perú, Ley 27345), que declara de interés nacional la promoción del uso eficiente de la energía con la finalidad de asegurar el suministro de energía, reducir el impacto ambiental, proteger al consumidor y fomentar la competitividad de la economía nacional. En el 2007, se aprueba el Reglamento (MINEM: Reglamento de la Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía) de la mencionada Ley. En el año 2009, se aprueba el Plan Referencial para el Uso Eficiente de la Energía 2009-2018 (MINEM), cuya implementación permitiría dar cumplimiento a los lineamientos establecidos en la Ley 27345. Además, el mencionado Plan Referencial serviría como línea de base para la elaboración del Plan de Eficiencia Energética 2012- 2040 y del Plan de Eficiencia Energética de cada Región. En el 2010, se crea la Dirección General de Eficiencia Energética en el MINEM.

La Ley 27345 establece que el Estado, a través del MINEM, es el Organismo competente encargado de dar cumplimiento al desarrollo de los objetivos planteados para incrementar la eficiencia energética en el uso de la energía. Considerando los propósitos de la investigación, los objetivos que destacan son (Ley 27345, 2000):

Promover la creación de una cultura orientada al empleo racional de los recursos energéticos;

Promover la mayor transparencia del mercado de la energía, ..., divulgando los procesos, tecnologías y sistemas informativos compatibles con el uso eficiente de la energía;

La elaboración y ejecución de planes y programas de eficiencia energética; Promover el consumo eficiente de la energía en zonas aisladas y remotas (Ríos, 2016, p.57) Entre las actividades más importantes, para el logro de ahorro y eficiencia energética, se destacan: "La creación de una cultura de eficiencia energética, con ayuda de campañas de sensibilización y capacitación. Formulación de una Política de Eficiencia Energética" (Ríos, 2016, p.58).

En el sector residencial, se han identificado 34 acciones de las destacan, los relacionados a las energías renovables:

- "Sustitución de 1 millón de cocinas tradicionales por mejoradas eficientes;
- Mejoramiento de los hábitos de consumo de la población;
- Sustitución de 100 mil calentadores eléctricos por solares" (Ríos, 2016, p.61).

No obstante las propuestas claras, pero a la actualidad no se muestran avances significativos en la implementación de las acciones planteadas.

2.7 Bases teóricas especializadas sobre el tema

2.7.1 Radiación solar

La radiación solar está constituida por el conjunto de ondas electromagnéticas emitidas por el Sol. La radiación solar que atraviesa la atmósfera va atenuándose debido a sus interacciones en la atmósfera (difusión, absorción, reflexión) llagando a la superficie de la Tierra en forma de radiación directa en un orden del 47% de la radiación incidente. La energía solar disponible para su aprovechamiento, se caracteriza por su:

Dispersión: su densidad energética apenas alcanza 1 kW/m², muy por debajo de otras densidades energéticas, lo que hace necesarias grandes superficies de captación o sistemas de concentración de los rayos solares.

Intermitencia: porque depende de las condiciones climáticas y características locales; ello hace necesario el uso de sistemas de almacenamiento de la energía captada. (González, 2015, p.48)

2.7.2 Conversión fototérmica

La energía del Sol se emite en un espectro continuo, en un intervalo de frecuencias de onda característico. La componente térmica de la radiación se encuentra en el rango del infrarrojo. Para realizar la conversión fototérmica de la radiación solar, se requiere de un termoconversor que puede ser una superficie metálica, recubierta con un material de alta absorción de la radiación solar, lo que provoca la elevación de la temperatura (García et al., 2017).

2.7.2.1 Captadores o colectores solares. El colector solar es el componente más importante de los sistemas térmicos de captación, cumple la función es transformar la energía solar en energía térmica útil (Gonzales, 2013) con la mayor eficiencia posible. La elección del tipo de captador depende fundamentalmente del tipo de aplicación que se va a implementar y también de las condiciones climáticas del lugar.

2.7.2.2 Tipos de colectores. Se puede clasificar:

2.7.2.2.1 *De acuerdo a su temperatura de trabajo.* Son de baja, media y alta temperatura cuyas características se muestra en la Tabla 2 (Gonzales, 2013).

Los colectores de baja y mediana temperatura, son los componentes fundamentales de las diversas aplicaciones solares de uso familiar de menor escala, por ejemplo en el caso de las cocinas solares domésticas se puede alcanzar temperaturas del orden de 100 °C para la cocción de alimentos, en tanto que para los secadores solares se alcanza temperaturas que están en el orden de 40 a 60 °C.

Tabla 2

Tipos de colectores solares

De baja temperatura	De media temperatura	De alta temperatura	
(hasta $60^{\circ}C$)	(60-400°C)	(400 -3000°C)	
Colectores planos	Colectores de vacío	Concentradores	
	Concentradores	Parques de helióstatos	
ACS	Calefacción	Procesos industriales	
Calefacción	Refrigeración	de alta temperatura	
Piscinas	Climatización	Generación eléctrica	
Secaderos	Procesos industriales y químicos		

Nota. Adaptado de Tipos de colectores (p.46), 2013, Gonzales, Instalación distric heating con energía solar y almacenamiento estacional de calor. Universidad Carlos III, Madrid, España.

2.7.2.2.2 De acuerdo con su funcionamiento. Se distingue los pasivos y activos.

Los **pasivos**, no necesitan energía externa adicional para funcionar. El agua o fluido dentro del sistema se mueve por gradiente de temperatura, por el principio de convección natural (efecto termosifón).

Los **activo**s, cuentan con una bomba o algún tipo de dispositivo que suministra energía externa para mover el agua o fluido caloportador dentro de su circuito.

2.7.2.2.3 De acuerdo a su geometría. Tenemos colectores planos, captadores de tubo de vacío, captadores parabólicos compuestos, etc.

El **Colector solar plano**, está formado por una superficie plana metálica, una parrilla de tubos o conductos unidos a la placa metálica, todos, revestido de una superficie negra absorbente selectiva. El conjunto se encuentra dentro de una caja revestido de material aislante térmico y está cubierta por la parte superior con un material transparente, que puede ser vidrio.

El principio de funcionamiento del colector solar plano es el efecto invernadero que se genera al interior del colector, y que está relacionado a las propiedades de transmisión de la cubierta:

De la radiación solar incidente, cuya longitud de onda corta está entre de 0,3-3 μ m, una parte es reflejada, otro pequeño porcentaje es absorbido por la cubierta y una gran parte la atraviesa e incide sobre el absorbedor que la transforma en calor aumentando su temperatura.

El absorbedor, al calentarse, emite radiación en una longitud de onda larga (3-30 μ m), que no puede salir al exterior debido a que la cubierta es opaca frente a esa radiación. (PNUD, 2010, p.54)

Figura 3

Efecto invernadero en el colector solar plano



Nota. Adaptado de Sistemas Solares Térmicos, (p.55); 2010, Programa de las Naciones Unidas (PNUD)

La Figura 3, muestra la sección transversal de un colector solar plano, se ilustra el efecto invernadero entre la placa colectora negra y la cubierta de vidrio. La Figura 4, muestra el gráfico de la transmitancia del vidrio y la distribución aproximada de la energía en cada longitud de onda de las radiaciones del Sol (6 000 K) y de la placa colectora (absorbedor) cuando se calienta hasta la temperatura de 127 °C (400 K). A dicha temperatura, la placa emite ondas electromagnéticas que corresponden al sector del infrarrojo y para esa frecuencia la cubierta (vidrio) tienen una baja transmitancia, de manera que el vidrio se comporta como un material opaco para el infrarrojo, quedándose atrapado al interior del colector aumentando su temperatura (PNUD, 2010).

Figura 4

Distribución espectral de la radiación y transmisividad del vidrio.



Nota. Adaptado de Sistemas Solares Térmicos, (p.55); 2010, Programa de las Naciones Unidas (PNUD).

Sobre la placa absorbedora se dispone un circuito hidráulico por donde circula el fluido caloportador, que absorbe calor mediante los mecanismos de transferencia de calor por conducción y convección entre el absorbedor y el fluido. Cuando. De manera que va incrementándose la temperatura del fluido, siendo éste el efecto útil esperado. Al calentarse el absorbedor se va generando una mayor gradiente de temperatura con el ambiente exterior, que hace que la energía térmica se pierda desde el interior al exterior, por lo que es necesario revestir los lados laterales y la base con aislante térmico (PNUD, 2010).

El **balance térmico del colector solar plano**, en estado estable, establece que el calor absorbido es igual a la energía útil más las pérdidas, térmicas y ópticas (ver Figura 5) (Duffie y Beckman, 2013).

Figura 5

Balance energético del colector solar plano



Por lo general, el balance térmico del colector solar se presenta como:

$$Q_{ABS} = Q_U + Q_P \tag{1}$$

En donde Q_{ABS} es el calor absorbido, Q_U el calor utilizable, Q_P el calor total perdido (por radiación convección y conducción).

La eficiencia del colector solar plano, que establece la eficiencia de conversión térmica del colector solar (García et al., 2017), depende de:

- a. las propiedades ópticas de los materiales, de la absortancia (α) de la placa absorbedora y de la trasmitancia (ζ) de la cubierta; la eficiencia máxima corresponde a la eficiencia óptica, que es el producto de la absortancia por la trasmitancia (αζ);
- b. la diferencia entre la temperatura promedio del fluido térmico (T_{fav}) y la del medio ambiente $(T_{amb}): \Delta T = T_{fav} - T_{amb};$
- c. la radiación solar incidente por unidad de superficie (I_T);
- d. el coeficiente total de pérdidas térmicas (U_C), y
- e. la eficiencia de extracción del calor acumulado (F´).

La eficiencia del colector (η) resulta:

$$\eta = F' \left[\zeta \alpha - \frac{U_c}{l_T} \left(T_{fav} - T_{amb} \right) \right] \tag{2}$$

La eficiencia térmica instantánea del colector (η) se puede relacionar y graficar en términos de la expresión:

$$\frac{\Delta T}{I_T} = \frac{T_{fav} - T_{amb}}{I_T} \tag{3}$$

Mediante datos experimentales y de una regresión lineal, o bien cuadrática, se obtiene la curva característica del colector: (García et al, 2017)

$$\eta = \eta_0 + \eta_1 (\frac{\Delta T}{I_T}) \tag{4}$$

$$\eta = \eta_{0} + \eta_{1} \left(\frac{\Delta T}{I_{T}}\right) + \eta_{2} \left(\frac{\Delta T^{2}}{I_{T}}\right)$$
(5)

Donde η_0 , η_1 y η_2 son las constantes de la curva y ΔT es la diferencia entre T_{fav} y T_{amb} en el caso de la norma ISO 9806 (García et al., 2017).

Figura 6

Eficiencia instantánea de un colector



Nota. Adaptado de Eficiencia instantánea de un colector, 2017, de García et al., Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. Instituto de Energías Renovables, UNAM.

Los **captadores solares de tubo de vacío, e**stán formados por tubos de cristal en las que se ha realizado el vacío para reducir las pérdidas de calor por conducción y convección, consta de tubos instalados en paralelo y conectados a un colector horizontal. Su geometría tubular soporta las altas diferencia de presiones entre la atmosférica y el vacío interior. Se clasifican en dos grupos:

Tubos de flujo directo: ... su funcionamiento es idéntico al de los captadores solares planos, en donde el fluido caloportador circula por el tubo expuesto al sol, calentándose a lo largo del recorrido (Figura 7-a).

Tubos tipo heat pipe o flujo indirecto: es una evolución del tubo de flujo directo... En este sistema, se utiliza un fluido que se evapora al calentarse, ascendiendo hasta un intercambiador ubicado en el extremo superior del tubo. Una vez allí, se enfría y vuelve a condensarse, transfiriendo el calor al fluido principal (Figura 7-b) (Gonzales, 2013, p.47).

Figura 7





Nota. Los captadores solares de tubo de vacío pueden ser (a). Flujo indirecto (b). Flujo directo. Adaptado de Eficiencia instantánea de un colector, 2017, de García et al., Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial. Instituto de Energías Renovables, UNAM.

Los captadores Parabólico compuestos (concentradores), concentran la radiación solar incidente mediante el uso de reflectores parabólicos, la radiación incidente para cierto ángulo de aceptación es colectado mediante reflexiones en la dirección del absorbedor como se ilustra en la Figura 8 (Gonzales, 2013). El gran ángulo de aceptación del concentrador permite captar la radiación solar tanto directa como indirecta. Puede utilizarse en rangos de baja y mediana temperatura.

Figura 8

Esquema de funcionamiento de un concentrador solar



Nota. Adaptado de Centro de Investigaciones de la Energía Solar (CIESOL)

2.7.3 Almacenamiento de Energía

El consumo de energía está relacionado con la calidad de vida y al grado de industrialización de un país, lo que hace necesario disponer un suministro de energía de las 24 horas y atender la demanda diaria. Actualmente, el abastecimiento de energías convencionales se puede considerar en equilibrio entre el consumo y la producción de energía (Moscoso, 2016). Sin embargo, al integrar fuentes de energía renovables el equilibrio entre la producción y consumo es más difícil de establecerla; ya que son fuentes muy fluctuantes, intermitentes y dispersas. Para contrarrestar la aleatoriedad en la producción energética, se presenta como alternativa la tecnología del almacenamiento de energía, que permita garantizar el suministro durante períodos de demanda (Moscoso, 2016).

El almacenamiento de energía consiste en reservar o conservar parte de la energía producida, para su posterior uso al momento de ser requerido en la demanda de interés y mantener un suministro constante de energía. Los sistemas que almacenan la energía se denominan acumuladores. Cada tipo de energía potencial, cinética, eléctrica o térmica puede ser almacenada con un método, sistema o tecnología específicos. Un determinado tipo de energía tiene su propio

tipo de acumulador (Almagro, 2012), en la que se debe controlar el proceso de carga y descarga del sistema así como las pérdidas que ocurren. La energía almacenada puede ser de naturaleza diferente al que se produce, pero también puede ser en la misma forma (Grande, 2016).

2.7.4 Métodos de Almacenamiento de Energía

Existen principalmente tres formas de energía que pueden ser almacenadas: mecánica, eléctrica y térmica (Moscoso, 2016).

2.7.4.1 Mecánica. La energía mecánica es la capacidad de realizar trabajo en virtud a la posición (energía potencial) y al movimiento (energía cinética) del cuerpo. Existen sistemas de almacenamiento de energía mecánica que incluyen el almacenamiento de energía gravitacional, almacenamiento de energía hidroeléctrica por bombeo (PHPS), por aire comprimido (CAES) y por Batería Inercial (FES) (Moscoso, 2016).

2.7.4.2 Eléctrica. La energía eléctrica resulta de la diferencia de potencial entre dos puntos, que establece un flujo de cargas eléctricas a través de un conductor en cuyo transcurso puede realizar trabajo. Las baterías son dispositivos que almacenan energía química a través de procedimientos electroquímicos, mantienen una diferencia de potencial eléctrico entre sus bornes de manera que al conectar un receptor se genera corriente eléctrica (Moscoso. 2016).

2.7.4.3 Térmica. La energía térmica se debe al movimiento de las partículas fundamentales que componen la materia, depende de su temperatura y de su masa. El calor es la energía térmica en tránsito entre cuerpos de diferente temperatura. La energía térmica puede ser almacenada como un cambio en la energía interna de un material, en forma de reacciones químicas, calor sensible o calor latente (Moscoso, 2016).

En lo referente al almacenamiento de la energía térmica solar, el Sol no brilla todo el tiempo, debido a las condiciones meteorológicas del lugar (heliofanía) o a los movimientos de

rotación y traslación terrestres (Cora, 2006), de manera que la demanda no coincide con la disponibilidad de la energía solar. El mayor consumo de energía es por las noches, donde no hay presencia de la radiación solar, por lo que es necesario utilizar sistemas de almacenamiento de energía térmica a través de procesos de conversión fototérmica. De esta manera, el exceso de energía térmica producida durante el día se almacena para su uso posterior durante la noche o para proporcionar energía en los días nublados (Figura 9) (Cora, 2006).

Figura 9

Almacenamiento de energía térmica solar en un día



Nota. Adaptado Almacenamiento de energía térmica, 2006, Cora, Acumulación solar térmico de energía. INENCO, UNSA –CONICET. Salta. Argentina (p.1).

2.7.5 Almacenamiento de energía térmica

La materia se encuentra generalmente en tres estados de agregación: sólido, líquido y gaseoso, dependiendo de las condiciones de presión y temperatura; de manera que, mediante la variación de la temperatura o presión se puede transformar un material de un estado a otro. Cuando a determinada presión constante se calienta una cantidad inicialmente sólida de una sustancia, la energía suministrada se emplea inicialmente en incrementar la energía cinética media de las

partículas de la sustancia, correspondiendo el aumento de su temperatura. El aumento de energía se emplea en vencer las fuerzas de cohesión intermoleculares de las partículas del sólido, hasta que las características físicas de la sustancia cambian y se produce el cambio de estado de sólido a líquido (fusión), que se da una temperatura determinada (temperatura de fusión); la temperatura permanece constante hasta que todo el sólido se encuentra en estado líquido. Si se sigue suministrando más energía, ésta se emplea en aumentar nuevamente la energía cinética de las partículas del líquido, aumentando su temperatura (Grande, 2016), llegando finalmente a la temperatura en la que toda la energía se emplea en el cambio de fase de la sustancia de líquido a gas (vaporización), que se da isotérmicamente hasta que todo el material esté en estado gaseoso y a partir del cual se produce un nuevo aumento de la temperatura (Grande, 2016).

En sentido inverso, la sustancia pierde la energía acumulada cediéndolos al medio. En general, los cambios de estado pueden ser de sólido a líquido y de líquido a gas. La Figura 10 muestra cómo aumenta la temperatura en función de la energía suministrada a una sustancia.

Figura 10

Perfil de temperatura en función del calor suministrado



La energía almacenada en forma de calor latente, es la energía acumulada durante el proceso de cambio de estado y está relacionada con cierta cantidad de energía almacenada en forma de calor sensible, debido al cambio de temperatura hasta la temperatura de transformación; el proceso inverso es exactamente igual. Durante el proceso de cambio de estado la temperatura permanece constante, de manera que el proceso de carga y descarga del acumulador por calor latente también se da a temperatura constante (Grande, 2016).

La cantidad de energía (Q) que es capaz de almacenar una sustancia de masa (m), se obtiene mediante la ecuación:

$$Q = Q_s + Q_L + Q'_s \tag{6}$$

$$Q = \int_{T_m}^{T_m} mC_p dT + ma_m \Delta h_m + \int_{T_f}^{T_f} mC_p dT$$

$$T_i \qquad T_m \qquad (7)$$

$$Q = mC_{sp}(T_m - T_i) + ma_m \Delta h_m + mC_p(T_f - T_m)$$
(8)

En estas ecuaciones se representa en el primer término de la igualdad, la energía que es capaz de almacenar en forma de calor sensible (Q_s) desde su temperatura inicial (T_i) hasta que comienza el cambio de fase (T_m), que depende de la cantidad (m) y calor específico (C_p) de la sustancia. El segundo término de la igualdad, corresponde a la energía total almacenada en forma de calor latente (Q_L), tiene en cuenta la cantidad de material (m), el calor latente del cambio de fase (Δ h) y la fracción del material que ha experimentado la transformación (a_m). Si una vez finalizado el cambio de fase se continúa calentando el material, se toma en cuenta el tercer término de la ecuación (Q'_s) (Grande, 2016).

El almacenamiento de la energía térmica permite confinar la energía por un periodo de tiempo, incrementa el uso efectivo de la energía y facilita el control de la producción térmica a gran escala (Rodríguez, 2015, p.21). El almacenamiento de energía térmica ofrece beneficios

energéticos, ambientales y económicos; permite la reducción y optimización del consumo de energía y reduce la emisión de CO₂ asociado a su consumo (Rodríguez, 2015).

El almacenamiento de la energía térmica puede generar beneficios al:

- "Aumentar la utilización de las energías renovables.
- Aprovechar la energía térmica excedente provenientes de fuentes naturales o artificiales
- Incrementar la eficiencia de equipos o dispositivos" (Rodríguez, 2015, p.22).

2.7.6 Clasificación de sistema de almacenamiento en función del método de almacenamiento

del calor

Según el método que se utiliza para almacenar la energía térmica, puede ser un sistema de almacenamiento de calor sensible, de calor latente o químico (Figura 11) (Grande, 2016).

Figura 11

Clasificación de las sustancias usadas para almacenamiento térmico.



Nota. Tomada de clasificación de sustancias usadas para almacenamiento térmico, 2009, Oliver, Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, Tesis Doctoral. 2.7.6.1 Almacenamiento energético por calor sensible (Sensible heat storage, SHS). El almacenamiento de energía térmica por calor sensible, consiste en acumular energía al aumentar la temperatura del material, sin que se produzca cambio de fase (Grande, 2016). La densidad de energía térmica que es capaz de acumular un material, por calor sensible, depende de su calor específico (C_p). La difusividad térmica α del material, donde $\alpha = \kappa / \rho.C_p$ (con: k: conductividad térmica, ρ : densidad del material) determina el ratio a la que esta energía puede ser introducida y extraída (Almagro, 2012). Un material adecuado para almacenar energía térmica por calor sensible, debe tener alto calor específico, estabilidad a largo plazo, bajo ciclos térmicos y compatibilidad con el recipiente que la contiene (Grande, 2016).

La energía que un material almacena en forma de calor sensible se mide mediante:

$$Q = \int_{T_i}^{T_f} mC_p dT = mC_{ap}(T_f - T_i)$$
⁽⁹⁾

Donde, Q es la energía almacenada, m es la masa, C_p es el calor específico y $\Delta T=T_f -T_i$ es el cambio de temperatura (Almagro, 2012). Dentro de este tipo de almacenamiento hay dos categorías, según el estado del material de almacenamiento (Grande, 2016):

2.7.6.1.1*Almacenamiento en forma sólida.* Es utilizado para almacenar calor de baja e incluso alta temperatura, no presenta sobrepresiones.

Almacenamiento con rocas. Se han utilizado lechos de rocas con alto calor específico, en donde el fluido (que puede ser aire) que transporta el calor intercambia energía con las rocas, dejando calor almacenado. La cantidad de energía acumulada depende de las propiedades termofísicas del material, del tamaño y forma de las rocas, de la densidad de empaquetamiento, de las propiedades del fluido transportador de calor, etc.

Almacenamiento en metales. Utilizado mayormente para almacenar altas temperaturas entre 120 y 1400°C. Ejemplos: aluminio, magnesio y zinc.

Tabla 3

Referencia	Material	Propiedades			
		Densidad (kg/m ³)	Conductivida d Térmica (W/m °C)	Capacidad calorífica específica	Capacidad calorífica volumétrica
180	Veso (revestimiento)	1000	0.4	(K J/Kg K) 1	(K J/III ^e K) 1000
10456:2007	Yeso (panel)	900	0,25	1	900
(Tudela, 1982)	Ladrillo cerámico	1800	0,73	0,92	1656
· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·	Baldosa cerámica	2000	1	0,8	1600
ISO10456:20	Mortero de cal	1600	0,8	1	1600
07	Mortero de cemento	1800	1	1	1800
	Hormigón	2000	1,35	1	2000
-	Hormigón (alta densidad)	2400	2	1	2400
	Hormigón armado 2%	2400	2,5	1	2400
	Madera	450	0,12	1,6	720
	Roca	2800- 1500	3,5-0,85	1	2150
	Caliza	1600- 2600	0,85-2,3	1	2100
	Arena y grava	1700- 2200	2	0,910-1,180	2072
	Arcilla o Limo	1200- 1800	1,5	1,670-2,500	3252

Materiales de almacenamiento de calor sensible para edificación

Nota. Adaptado de Materiales de almacenamiento de calor sensible para edificación, 2017, Lizana et al, Caracterización de materiales de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones en edificación.

Una característica importante de estos materiales es tener mayor conductividad térmica y menor precio. Algunos materiales de almacenamiento sólidos son rocas, piedras, ladrillos, hormigón, suelo, cartón-yeso y corcho. La Tabla 3 resume las propiedades térmicas de los principales materiales de calor sensible (ISO 10456:2007; Tudela citado por Lizana et al, 2017).
Otros factores tomados en cuenta son la compatibilidad entre el HTF, el fluido de almacenamiento y el recinto donde circula o se almacena (Grande, 2016), la Tabla 4 y 5 muestran la conductividad térmica y calor específico de materiales de construcción más utilizados.

Tabla 4

Materiales de construcción	Calor específico (J/kg K)
Piedra	1243,12
Guano	2382,91
Madera	2268,09
Agua	4186,01
Cobre	390,09

Calor especifico de los materiales de construcción

Nota. Adaptado de Calor específico de materiales de construcción, 2018, Holguino et al,

Thermal comfort in an adobe room with heat storage system in the Andes of Peru. Journal of

High Andean Researc; 20(3): 289 – 300.

Tabla 5

Conductividad térmica de los materiales de construcción.

Materiales de construcción	Conductividad Térmica(W/m K)
Adobe	0,176
Madera	0,274
Aire	0,026
Yeso	0,149
Vidrio	0,84

Nota. Conductividad térmica de materiales de construcción, 2018, Holguino et al, Thermal comfort in an adobe room with heat storage system in the Andes of Peru. Journal of High Andean Researc; 20(3): 289 – 300.

2.7.6.1.2*Almacenamiento en forma líquida*. Los fluidos utilizados para transportar el calor son agua, aire, aceites térmicos, sodio o sales fundidas. Las sales fundidas son las más utilizadas por sus mejores características térmicas, y además son líquidas a presión atmosférica, son de bajo costo, tienen un rango de temperaturas óptimo, son ignífugas y no tóxicas.

Aunque las sales fundidas se presentan como una opción muy ventajosa y económica frente a los aceites térmicos, sin embargo presentan el inconveniente de tener un punto de congelación muy elevado, en torno a 100-200 °C, la tabla 6 muestra las características térmicas de ciertos fluidos.

Tabla 6

Características principales de materiales líquidos de almacenamiento de energía térmica sensible.

Medio de almacenamient o	<u>Tem</u> Frío (ºC)	n <u>peratura</u> Caliente (ºC)	Densid ad media (kg/m ³)	Conductivida d térmica media (W/m K)	Capacida d calorífica media (kJ/kg K)	Calor específico volumétric o (kWht/m ³)	Costo medio por kg (US\$/k g)	Costo medio por kWht (US\$/kWh)
Sal solar HITEC	120	133						
Aceite mineral	200	300	770	0.12	2.6	55	0.30	4.2
Aceite sintético	250	350	900	0.11	2.3	57	3.00	43.0
Aceite de	300	400	900	0.10	2.1	52	5.00	80.0
silicona								
Sal de nitrito	250	450	1825	0.57	1.5	152	1.00	12.0
Sal de nitrato	265	565	1870	0.52	1.6	250	0.50	3.7
Sal de	450	850	2100	2.0	1.8	430	2.40	11.0
carbonato								
Sodio liquido	270	530	850	71.0	1.3	80	2.00	21.0

Nota. Adaptado de Característica principales de materiales líquidos de almacenamiento de energía térmica, 2016, Grande, Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura, Tesis.

2.7.6.2 Almacenamiento energético por calor latente. (Latent heat termal energy storage, LHS). El almacenamiento de energía por calor latente se da durante el proceso de cambio de estado, donde el material absorbe una gran cantidad de energía térmica cuando cambia su estructura molecular, su fase o su estado de hidratación (Oliver, 2009). Tiene la ventaja de tener una alta densidad de almacenamiento de energía y que suministra a temperatura constante. Sin embargo, la mayoría de éstos materiales tiene una baja conductividad térmica, que puede contrarrestarse mejorando la transmisión energética para aumentar el rendimiento y la utilidad del sistema de almacenamiento (Grande, 2016). Esta energía de transformación o cambio de estado, se almacena en forma de energía térmica hasta que sea necesaria, recuperándose gran parte de la energía inicial acumulada mediante un proceso inverso.

Los cambios de fase pueden ser del tipo sólido-sólido, líquido-vapor y sólido-líquido, siendo el cambio de estado de sólido- líquido la más utilizada, debido a que presentan bajos índices de expansión volumétrica en comparación a la transición líquido-vapor y por otro lado, tienen un alto calor latente respecto a la transición sólido-sólido (Almagro, 2012).

La cantidad de energía almacenada (Q) para un cambio de estado sólido-líquido, cuando el material se calienta desde una temperatura inicial T_s en estado sólido hasta una temperatura final T_f en estado líquido, viene dada por la siguiente expresión:

$$Q = mC_{Ps}(T_f - T_s) + mh + mC_{Pl}(T_l - T_f)$$
⁽¹⁰⁾

Donde C_{Ps} y C_{Pl} son los calores específicos medios del material en las fases sólidas y líquidas respectivamente, h es el calor latente de cambio de fase, T_f es la temperatura de fusión, T_s es la temperatura inicial del sólido y T_f es la temperatura del líquido (Almagro, 2012).

Los materiales usados para almacenar energía térmica en forma de calor latente son conocidos como Phase Change Materials (PCMs) (Grande, 2016) y los sistemas de almacenamiento por calor latente (Latent heat termal energy storage) LHS.

Tabla 7

Material	Masa	Masa	Volumen	Volumen
	(kg)	Relativa	(m ³)	Relativo
Grava	67,000	22	30	10
Agua	16,000	5,3	16	5,3
Material de Cambio de Fase Orgánico	5,300	1,8	6,6	2,2
Material de Cambio de Fase Inorgánico	4,350	1,5	2,7	0,9
Hielo	3,000	1,0	3	1,0

Comparación de la capacidad de almacenamiento de varias sustancias.

Nota. Se compara para una energía almacenada de 1000 MJ o 278 kWh. Cambio de temperatura 15 °C. Cantidad de material requerido para equivalente masa térmica. Adaptado de Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura, 2016, Grande.

La Tabla 7 compara la capacidad de almacenamiento térmico en varias sustancias, en donde se muestra que para acumular 100 MJ de energía térmica se requiere 67 toneladas de masa de grava que corresponde aproximadamente a cuatro veces más que la masa requerida de agua. La Tabla 8, muestra la densidad de almacenamiento de energía de diversas sustancias (Oliver, 2009), siendo los valores más altos al almacenamiento por calor latente.

Tabla 8

Material	Densidad de	Sistema de
	Energía (kJ/dm ³)	Acumulación
Grava	50	Calor sensible, 20 °K
Agua	84	Calor sensible, 20 °K
Hielo	330	Calor latente
Zeolita+vapor	500	Adsorción*
Vapor de amoniaco	806	Calor latente
CaO+vapor	900	Reacción*
CaO+CO ₂	2000	Reacción*
Vapor	2165	Calor latente

Comparación de la densidad de almacenamiento de varias sustancias

Nota. Sólo se ha considerado el peso y volumen de la parte sólida. Se ha considerado el calor de reacción sin tener en cuenta el de condensación. Adaptado de Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura, 2016, Grande.

Los sistemas de almacenamiento térmico con cambio de fase, presentan las siguientes ventajas:

a "Son fuentes de calor a temperatura constante: .. permite obtener un foco térmico a igual temperatura durante el proceso de cambio de fase" (Grande, 2016, p.45). Esto es muy útil porque proporciona control y estabilidad frente a la aleatoriedad de la energía solar. Al no aumentar la temperatura, tampoco aumentan las pérdidas energéticas (Zelota, 2013). La temperatura de trabajo necesaria (proceso de carga y descarga) se puede seleccionar dentro del rango de temperaturas requeridas para la aplicación específica (Oliver, 2009).

- b "Gran densidad de almacenamiento. ... en el orden de 50-100 veces mayor capacidad de almacenamiento mediante calor sensible, para una misma cantidad de material" (Grande, 2016, p.45).
- c Se recuperación la energía térmica sin necesidad de que se establezca una mayor diferencia de temperatura. Lo que implica elegir el PCM que mejor se adapte al punto de trabajo del fluido caliente. Este hecho, muestra una gran ventaja desde el punto de vista energético y exergético (Grande, 2016).
- d "Uso repetitivo. El número de ciclos de fusión-solidificación que pueden soportar sin mostrar degradación es muy elevado" (Grande, 2016, p.45).
- e No requiere de grandes instalaciones, ni grandes infraestructuras (Oliver, 2009). Permite disminuir el tamaño de los equipos, haciéndolos más compactos y empleando menos material de almacenamiento con lo que disminuye su costo (Grande, 2016).

Desde el punto de vista de las energías renovables, ofrece la ventaja de:

- "Gran durabilidad
- No es tóxico
- Posibilidad de reutilización y de reciclable
- Reduce la emisión de CO₂" (Rodríguez, 2015, p.11)

Los sistemas de almacenamiento térmico por calor latente, también presentan ciertas desventajas, como:

- a. "La mayoría de los materiales usados en esta tecnología tienen una baja conductividad calorífica.
- b. Posibles problemas de corrosión según los materiales utilizados.
- c. Degradación con el número de ciclos" (Grande, 2016, p.45).

2.7.6.2.1 *Almacenamiento de calor latente en fase sólida-sólida (SSPCM).* Se basan en la propiedad que tienen algunos materiales de cambiar su estructura interna sin modificar su estado sólido (Grande, 2016, p.46); ésta propiedad lo tienen, por ejemplo, ciertas aleaciones de acero (Grande, 2016). Sin embargo, presenta como **desventaja** que el calor latente de transición es menor que el calor latente del cambio de fase de sólido-líquido (Grande, 2016).

2.7.6.2.2 Almacenamiento de calor latente en fase sólida-líquida. Es el método más utilizado en los sistemas de almacenamiento térmico de calor latente. Tiene una expansión volumétrica del orden del 10% en comparación al volumen original (Cárdenas, citado por Grande, 2016). Una gran desventaja de los materiales utilizados como acumuladores térmicos de cambio de fase, es la baja conductividad térmica, la segregación y el sub-enfriamiento (Grande, 2016).

2.7.6.2.3 *Almacenamiento de calor latente en fase líquida-gas.* El almacenamiento de calor mediante el cambio de fase de líquido a gas, permite almacenar más energía el cambio de estado sólido-líquido. Sin embargo, presenta un gran cambio de volumen entre la fase líquida y gaseosa, siendo el almacenamiento de energía por este proceso una operación compleja y poco práctica (Grande, 2016).

2.7.6.3 Almacenamiento termoquímico. El almacenamiento de energía térmica mediante el método termoquímico se basa en las reacciones químicas producidas, fundamentalmente en reacciones endotérmicas reversibles (Grande, 2016). En aplicaciones solares, el calor procedente de la radiación solar debe producir las reacciones químicas reversibles, donde el medio de almacenamiento ha de tener la capacidad de disociarse completamente en el rango de temperaturas del campo solar (Gil et al., citado por Almagro, 2012).

Las reacciones que se producen en el período de carga son endotérmicas y las que se producen en la descarga son reacciones exotérmicas. La cantidad de energía almacenada por este método depende del calor liberado en la reacción, el grado de conversión está dado por:

$$Q = a_r m \Delta h \tag{11}$$

Donde a_r es la fracción de masa que ha reaccionado, Δh es el calor de reacción por unidad de masa, m la masa del medio de almacenamiento (Almagro, 2012).

La ventaja del almacenamiento termoquímico es que los productos químicos pueden almacenar energía indefinidamente a temperatura ambiente reduciendo considerablemente las pérdidas térmicas. Además, los procesos exotérmicos ocurren a temperatura constante si el calor es extraído sin generar el calentamiento espontáneo. No obstante, el almacenamiento termoquímico presenta limitaciones en la transferencia de calor, en la inestabilidad cíclica, la reversibilidad en las reacciones y su elevado costo (Almagro, 2012).

2.7.7 Clasificación en función del estado de la sustancia almacenadora

Se clasifica en sistema activo y pasivo, según la relación del medio de almacenaje con el entorno y según cómo llega el flujo de energía desde la fuente al medio de almacenaje (Rodríguez, 2015).

2.7.7.1 Almacenamiento activo. Un sistema de almacenamiento térmico se considera activo, cuando se requiere un fluido intermedio de transferencia y transporte de la energía térmica entre el medio de almacenamiento y el ambiente; la energía térmica es transferida al medio de almacenamiento por convección forzada (Rodríguez, 2015).

Al decir de Grande (2016) el sistema de almacenamiento es activo, cuando la sustancia de almacenamiento es líquida y tiene la capacidad de fluir en el tanque de almacenamiento.

2.7.7.2 Almacenamiento pasivo. El sistema de almacenamiento térmico pasivo, es aquel sistema que no requiere equipos ni energía adicional para almacenar o transferir la energía térmica; el medio de almacenamiento es cargado y descargado térmicamente al entrar en contacto directo con el fluido (Rodríguez, 2015). Es pasivo cuando el material de almacenamiento es sólido, o PCM, el HTF pasa a través de él durante el proceso de carga y de descarga (Grande, 2016).

2.7.8 Materiales de Cambio de Fase (Phase Change Material: PCM)

Cada material de cambio de fase se podría clasificar dentro de un rango de temperaturas, como materiales de:

Baja temperatura, por debajo de los 15°C utilizadas normalmente en sistemas de aire acondicionado y en la industria alimenticia.

Media temperatura, entre 15-90°C utilizadas fundamentalmente en aplicaciones de ahorro de energía térmica a nivel doméstico, en el diseño de edificios, o en aplicaciones solares, textiles y electrónicas.

Alta temperatura, por encima de 90°C desarrolladas principalmente para aplicaciones aeroespaciales e industriales (Grande, 2016, p.42).

Las ceras de parafina están disponibles en el mercado, pero las sales hidratadas son más baratas y también están disponibles en el mercado, pero tienen la desventaja de tener bajas temperaturas de fusión y son corrosivos a los metales (Oliver, 2009).

2.7.8.1 Definición de PCM. Los materiales de cambio de fase (PCM: Phase Change Materials), son sustancias que absorben gran cantidad de energía térmica durante su proceso de cambio de estado, dicho proceso se lleva acabo a una temperatura determinada que permanece constante (Moscoso, 2016).

Los PCM son sustancias con alto calor latente que son capaces de almacenar grandes

cantidades de energía y en el proceso inverso pueden liberar grandes cantidades de energía (Vélez,

2018).

Tabla 9

Propiedades termofísicas deseables para materiales PCM

 Propiedades térmicas Temperatura de fusión adecuada al uso Calor latente de cambio de fase elevado Alta la conductividad térmica 	 Propiedades físicas Mínima variación de volumen Alta Densidad Alta La capacidad calorífica No debe producirse subenfriamiento
Propiedades químicas	Otras Propiedades
- Estabilidad	- Barato
- No debe existir separación en su fase condensada	- Abundante
- Compatibilidad con materiales	
- No toxico, no inflamable, no	
contaminante, no corrosivo	

Nota. Adaptado de Propiedades termofísicas de PCM, 2018, Vélez, Conductividades térmicas de sistemas con cambio de fase: nano-fluidos y nano-compuestos, Tesis.

El interés en los PCM, es porque durante el proceso de cambio de fase, la temperatura del material se mantiene constante, mientras que sigue absorbiendo energía. Este hecho supone una mayor densidad energética, 5-14 veces más calor por unidad de volumen de almacenamiento que los otros materiales de almacenamiento de calor como los de calor sensible (Moscoso, 2016).

Los PCM de uso más común son compuestos orgánicos, como hidrocarburos, parafinas y algunos ácidos grasos de cadena corta (Vélez, 2018).

La mayoría de los PCM utilizados en la práctica no satisfacen todas las propiedades deseables que se muestran en la Tabla 9. De manera que, para las diversas aplicaciones, "los materiales disponibles se utilizan tratando de compensar los déficits en las propiedades físicoquímicas mediante una buena ingeniería, con un adecuado diseño del sistema de almacenamiento" (Vélez, 2018, p.41).

2.7.8.2 Funcionamiento. Los cuerpos en los diferentes estados de agregación tienen una estructura molecular característica, correspondiendo a la presencia de fuerzas de cohesión entre los átomos que las componen (Vidal, 2007). Cuando un material cambia de estado, implica transferencia de calor, puede implicar también transferencia de masa, subenfriamiento, cambios en las propiedades termofísicas, efectos superficiales, etc.

Figura 12

Diferentes estructuras de interfase.



Nota. Adaptado de Modelización del cambio de Fase sólido líquido. Aplicación a sistemas de acumulación de Energía térmica (p.24), 2007; Vidal, Universidad Politécnica de Catalunya. Centro Tecnológica de Transferencia de Calor Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Tesis.

La transición de un estado a otro, se debe a la absorción o cesión de calor latente que se da a una temperatura definida en la cual la estabilidad de la fase se rompe en favor de la otra en función de la energía disponible. La región de transición donde coexisten la fase sólida-líquida o líquido-gas se denomina interfase. En la mayoría de materiales puros cuando se solidifica, la interfase que separa los dos estados tiene una estructura compleja, generalmente una configuración planar (ver figura 12) y con un espesor de pocos Angstroms hasta algunos centímetros (Vidal, 2007, p.28).

Los distintos PCM tienen su propia temperatura de cambio de fase, en las aplicaciones solares térmicas durante el día absorbe la máxima cantidad de energía y durante la noche se entrega la energía para el fin que se ha implementado; de manera que, correspondiendo a las variaciones de temperatura entre el día y la noche, se dan los ciclos de fusión y solidificación del PCM (Moscoso, 2016).

2.7.8.3 Propiedades y Características. Los materiales de cambio de fase deben tener las siguientes propiedades, para el óptimo almacenamiento energético:

Criterios Termodinámicos:

El PCM debe tener:

- Temperatura de cambio de fase definida y adecuada a la aplicación deseada es decir a la temperatura de operación
- Alto calor latente de fusión por unidad de masa, de modo que una menor cantidad de material, almacene mayor cantidad de energía.
- Fusión congruente, el material debe fundir homogéneamente de manera que las fases líquida y sólida sean idénticas en composición.
- Poca variación de volumen durante la transición de fase.
- Alta conductividad térmica para facilitar la transferencia de calor, en ambas fases (Moscoso, 2016, p.9).

• "Elevado calor sensible, útil para añadir de manera adicional un porcentaje de energía almacenada en forma de calor sensible" (Grande, 2016, p.43)

Criterios Físicos:

- "Un incremento/disminución de volumen lo menor posible durante el cambio de fase
- Una baja presión de vapor a la temperatura operativa
- Mezcla congruente de los distintos materiales que puedan formar el PCM
- Alta densidad" (Grande, 2016, p.43)

Criterios Cinéticos:

- "Un alto ratio de nucleación" (Grande, 2016, p.43).
- "Poco o ningún subenfriamiento (proceso en que se enfría un líquido por debajo de su punto de congelación sin que se haga sólido), la masa fundida debe cristalizar en su punto de congelación termodinámico.
- Poseer suficiente tasa de cristalización" (Moscoso, 2016, p.9).

Criterios Químicos:

- "Estabilidad química a largo plazo
- Ciclo totalmente reversible. Ninguna descomposición química o degradación luego de haber completado numerosos ciclos de fusión - congelación.
- No produzca corrosión en los materiales que lo rodean.
- Ser no tóxico, no inflamable y no explosivo" (Moscoso, 2016, p.9-10)

Criterios Económicos:

- "Disponibilidad en grandes cantidades a bajo coste, de modo que sea viable técnica y económicamente.
- Razonable ciclo de vida útil de acuerdo a su coste.

• Reciclable" (Moscoso, 2016, p.10).

2.7.8.4 Clasificación de materiales PCM. Existe un gran número de materiales identificados como PCM, se clasifican en tres grandes grupos: orgánicos, inorgánicos y eutécticos (Moscoso, 2016).

2.7.8.4.1 PCM inorgánicos: sales hidratadas (Sales inorgánicas y compuestos salinos).

Los materiales inorgánicos se subdividen en Sales Hidratadas y Metálicos (Moscoso, 2016). La Tabla 10 muestra las ventajas y desventajas de los PCM inorgánicos.

Tabla 10

Ventajas e	inconve	nientes	de los	РСМ	inorgánicos.
------------	---------	---------	--------	-----	--------------

VENTAJAS	INCONVENIENTES
Generalmente baratos	El encapsulado y preparación para su uso ocasionan algunos problemas *
Densidad de almacenamiento térmico elevada	Su uso prolongado necesita de aditivos
Elevada conductividad térmica	Son susceptibles de subenfriamiento
Temperatura de cambio de fase claramente	Los aditivos utilizados para evitar una fusión
definida	incongruente reducen su capacidad de
	almacenamiento latente por unidad de volumen en más de un 25%
No inflamables	Potencialmente corrosivos con algunos metal
Reciclables y biodegradables	
Compatibilidad con contenedores	Pocas propiedades de nucleación
plásticos.	
Poca variación de volumen durante la	
transición de fase.	

Nota. Las sales hidratadas absorben agua fácilmente y necesitan un encapsulado semipermeable. Adaptado de Ventajas e inconvenientes de los PCM inorgánicos, 2009, Oliver, Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. Las sales hidratadas son aleaciones de sales inorgánicas y agua, con la molécula de agua en el interior de una red cúbica. La transformación sólido-líquido de los hidratos de sal se puede considerar como la deshidratación e hidratación de la sal, proceso que, se asemeja a los ciclos de fusión y cristalización. Estos materiales, tienen una alta capacidad de almacenamiento de calor por unidad de volumen (Moscoso, 2016, p.11) (Tabla 11); por otro lado, durante ciclos de carga y descarga pierden progresivamente su reversibilidad y son corrosivos (Vidal, 2007), presentan dificultades de re-solidificación, tendencia al subenfriamiento y fusión incongruente. La fusión incongruente, significa que cuando se funde, se separa en dos fases distintas: una fase acuosa saturada y una sólida que generalmente es un hidrato inferior de la sal original. Este fenómeno es irreversible y de esa manera va perdiendo sus propiedades térmicas de PCM.

Tabla 11

Valores típicos de sales hidratadas con temperaturas de fusión próximas a la temperatura de confort, para aplicación en construcción.

РСМ	T° fusión	Q fusiór	n Referencia
	(°C)	(kJ/kg)	
KF·4H ₂ O	18,5	231	Nagano et al
Na ₂ SO ₄ ·10H ₂ O	32,4	254	Nagano et al
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$	24–29	192	Stritih U, et al
$CaCl_2 \cdot 6H_2O$ +Nucleador +MgCl_2 $\cdot 6H_2O$ (2:1)	23		Cabeza et al

Nota. Adaptado de Valores típicos de sales hidratadas, 2009, Oliver, Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno.

Los **metálicos**, está compuesta por metales que tienen un bajo punto de fusión. Su uso en la tecnología de los PCM, presenta el inconveniente por su elevado peso, sin embargo, cuando el volumen es un factor importante, es una buena alternativa, debido a su alto calor latente de fusión por unidad de volumen y su alta conductividad térmica (Moscoso, 2016).

Las **sales inorgánicas** estudiados como PCM, son las mezclas con nitratos, carbonatos, hidróxidos y otras sales; sin embargo, las sales de cloro y flúor han sido las más estudiadas debido al alto calor latente de fusión y a su bajo precio (Grande, 2016). Las sales inorgánicas son de gran interés para aplicaciones de un rango de temperaturas por encima de los 300°C.

La mayoría de las sales inorgánicas presenta baja conductividad térmica, por lo que se les puede añadir otros materiales como grafito, fibras metálicas y otros de gran conductividad, con lo que se consiguen mejorar las propiedades térmicas del sistema (Grande, 2016).

2.7.8.4.2 *PCM orgánicos: parafinas y ácidos grasos.* Los PCM orgánicos poseen propiedades que los hacen muy útiles para sistemas de almacenamiento de calor latente. Son más estables químicamente que las sustancias inorgánicas, se funden y solidifican convenientemente, sin necesidad de agentes nucleadores y no sufren subenfriamiento o histéresis. Aunque el coste inicial de un PCM orgánico es superior al de un inorgánico, su coste es competitivo (los ácidos grasos cuestan el doble que las parafinas), (Tabla 12).

Dentro de los PCM orgánicos se encuentran tres grupos de sustancias: parafinas, ácidos grasos, y mezclas orgánicas.

La **parafina** es esencialmente un alcalino sólido refinado (Oliver, 2009). Ofrecen ventajas y desventajas que se analizan más adelante.

Los **ácidos grasos**, son derivados de productos animales y vegetales, su estructura molecular es una larga cadena alifática, con más de 12 carbonos. Su cadena alquílica puede ser saturada o insaturada (Oliver, 2016). Están caracterizados por la fórmula química CH₃ (CH₂)2COOH (en general R–COOH). La mayoría de los ácidos grasos naturales poseen un par de

átomos de carbono, debido a que son biosintetizados a partir de acetato (CH₃CO₂-), el cual posee dos átomos de carbono. Su temperatura de fusión aumenta de acuerdo a la longitud de la cadena (Moscoso, 2016).

Tabla 12

Característica	Ventajas	Inconvenientes
Térmicas	Estabilidad térmica	Calor latente y entalpía más bajos
	No tienden a degradarse	Menor conductividad térmica
Encapsulamiento	Compatible con contenedores de metal	Mayor cambio de volumen
У	Micro encapsulado disponible	Ácidos grasos: algunos son algo
practicidad	Parafinas: no corrosivos	corrosivos
		Ácidos grasos: algunos presentan un
		fuerte olor
Seguridad	Seguros y no reactivos	Parafinas: inflamables
	No tóxicos	Parafinas: al arder, los humos y los
	Ácidos grasos: menos inflamables que	gases podrían ser tóxicos
	parafinas	
Ambientales	Bio-PCM: biodegradable en poco	Parafinas: mayor impacto ambiental
	tiempo	en su ciclo de vida que las sales y los
	Bio-PCM: Se puede producir a partir de	ácidos grasos
	residuos o subproductos	Parafinas: degradación muy lenta
Coste	Alta disponibilidad	Podría ser necesario añadir aditivos
	Bio-PCM: menor precio cuando vienen	retardadores de llama
	de la industria agrícola o alimentaria	Parafinas: mayor coste que los
	Algunos son más caros	hidratos de sal
		Parafinas: precio vinculado al precio
		del petróleo

Princi	nales	ventaias	P	inconvenien	tes d	le los	PCM	oroánicos
IIIICI	pules	veniujus	e	inconvenien	ies u	ie ios	$I \cup M$	<i>orgunicos</i>

Nota. Adaptado de Principales ventajas e inconvenientes de los PCM orgánicos, 2012, Cancillo,

Transferencia de calor avanzada mediante materiales de cambio de fase.

Los ácidos grasos muestran excelentes propiedades térmicas (ver Tabla 13), sin embargo, dado su elevado costo no han generado interés en aplicaciones de sistemas de acumulación térmico (Oliver, 2016).

Ventajas: Los ácidos grasos presentan:

- "Estabilidad química.
- Auto nucleación, tasa de cristalización con poco o nada de subenfriamiento.
- Fusión congruente, ciclos homogéneos de fusión y congelamiento sin segregación de fases.
- Alto calor latente de fusión por unidad de masa (Moscoso, 2016, p.11).

Desventajas: Los ácidos grasos presentan:

- "Baja conductividad térmica.
- Coste elevado, 2-2,5 veces el precio de las parafinas.
- Corrosividad debido a su carácter ácido, no compatible con metales" (Moscoso, 2016, p.11).

Tabla 13

Características térmicas de algunos ácidos grasos.

Mezcla	Tm	Ti-	Tm	ΔHm
(ácidos grasos)	°C	°C	°C	kJ/kg
Cáprico	31,5	30,1	1,4	158
Laurico	42,0-44,0	41,3	0,7 -2,7	179
Pentadecano	52	-	-	159
Mirístico	54,0	52,1	1,9	190
Palmítico	63,0	54,1	8,9	183
Esteárico	70,0	64,5	5,5	196
Eritrol	116-118	-	-	126

Nota. Adaptado de Características térmicas de ácidos grasos, 2016, Oliver, Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno.

2.7.8.4.3 *Eutécticos y mezclas de PCM*. Un material eutéctico es la composición de dos o más componentes cuyos puntos de fusión es menor al de cada componente, los cuales se funden y congelan congruentemente formando una mezcla de los cristales de cada componente. "A diferencia de las sales hidratadas, las mezclas eutécticas se funden y cristalizan con poca o ninguna segregación, debido a que cada uno de sus componentes se funden simultáneamente y cuando cristalizan, crean una mezcla íntima de los cristales" (Moscoso, 2016, p.13), de manera que actúan como un solo componente sin oportunidad de separarse. Las mezclas eutécticas pueden ser mezcla de materiales orgánicos y orgánicos, inorgánicos e inorgánicos, orgánicos e inorgánicos; obteniéndose una amplia variedad de combinaciones de acuerdo al interés de la aplicación (Moscoso, 2016).

2.7.9 Parafina

Químicamente, las ceras de parafina o parafinas, son mezclas de hidrocarburos, en particular n-alcanos lineales con fórmula C_nH_{2n+2} y con número de carbonos 12<n<40. Las parafinas son materiales orgánicos, inodoros, insípidos y no tóxicos; sus características térmicas lo destacan como PCM en sistemas de almacenamiento térmico de energía solar y otras aplicaciones (Vélez, 2018), es de los PCM más utilizados en la práctica.

Las parafinas tienen una amplia gama de calores latentes, puntos de fusión, densidades y calores específicos. Las temperaturas de fusión son relativamente bajas, de -5 °C hasta 66 °C (Vélez, 2018); no obstante Ochoa (2016) menciona que las temperaturas de fusión oscilan entre los 30 y los 90 °C. La densidad en estado líquido oscila de 750 a 850 kg/m³, y en estado sólido de 800 a 900 kg/m³. Los cambios de volumen en la transición de fase no superan, normalmente, un 10%. La Tabla 14 presenta las parafinas químicamente puras más habituales (Vélez, 2018).

Tabla 14

Algunos alcanos lineales disponibles comercialmente junto a algunas de sus propiedades

Material	Temperatura	Entalpía de	Densidad
	fusión (°C)	fusión (kJ/kg)	(kg/m ³)
n-Tetradecano (nC ₁₄)	6	230	-
$C_{14}H_{30}$			760 (l)
n-Pentadecano (nC15)	10	212	770 (1)
$C_{15}H_{32}$			-
n-Hexadecano (nC ₁₆)	18	210	760 (l)
C16H34			-
n-Heptadecano (nC ₁₇)	19	240	776 (l)
C ₁₇ H ₃₆			814 (s)
n-Octadecano (n C_{18})	28	200	774 (l)
$C_{18}H_{38}$			779(s)
n along $(n\mathbf{C}_{ij})$	29	202	770(1)
Π -elcosano (Π C ₂₀)	30	203	779(1)
$C_{20}H_{42}$			785 (s)
n-Triacontano (nC ₃₀)	66	252	806(s)
			775 (l)
$C_{30}H_{62}$			
n-Tetracontano (nC ₄₀)	82	272	817 (s)
			-
$C_{40}H_{82}$			
n-Pentacontano (nC50)	95	276	779 (l)
			825(s)
$C_{50}H_{102}$			
Polietileno C _n H _{2n+2}	110-135	200	870-940 (s)
<i>n</i> hasta 100000			-

termofísicas de equilibrio (estáticas) más relevantes.

Nota. Adaptado de Algunos alcanos lineales disponibles comercialmente, 2018, Vélez, Conductividades térmicas de sistemas con cambio de fase: nano-fluidos y nano-compuestos, Tesis doctoral. Sobrefusión limitada de la parafina. La sobrefusión, llamada también subfusión, superenfriamiento o subenfriamiento (Figura 13), es la propiedad de algunos materiales de enfriarse por debajo de su punto de solidificación sin pasar a estado sólido (Cancillo, 2012).

Figura 13

Proceso de sobrefusión o subenfriamiento



Nota. Adaptado de Proceso de sobrefusión, 2012, Cancillo, Transferencia de calor avanzada mediante materiales de cambio de fase.

Estructura y obtención:

Las parafinas son hidrocarburos saturados que pueden ser cadenas simples (parafinas normales), o bien cadenas ramificadas (iso-parafinas). La fórmula general de la parafina es: C_nH_{2n+2} .

Para el almacenamiento de energía térmica se suelen utilizar las parafinas normales ya que tienen una mayor entalpía de cambio de fase. La cera parafínica de grado comercial se obtiene de la destilación del petróleo, y no es una sustancia pura, sino una combinación de diferentes hidrocarburos" (Rodríguez V, p. 13).

Punto de fusión: Está relacionado con el número de átomos de carbono de su estructura. En general, cuanto mayor sea su peso molecular, mayor es su temperatura de fusión.

Capacidad de almacenamiento de energía: La parafina tiene calor específico del orden de 2,1 kJ/kg°C y una entalpía de cambio de fase de 200 kJ/kg, la parafina acumula tanto energía de calor sensible y calor latente (Rodríguez V, p. 13).

Conductividad térmica: Tienen una conductividad térmica muy baja, del orden de 0,2 W/m°C. Lo que es una desventaja que se refiere a baja capacidad de transmitir la energía (Rodríguez V, p. 14).

Variación de volumen: Las parafinas varían de volumen durante el cambio de fase aproximadamente en 10%, que debe tenerse en cuenta en el diseño del acumulador (Rodríguez V, p. 14).

Otras propiedades:

- Buena estabilidad térmica: Las parafinas mantiene sus propiedades durante los ciclos de carga y descarga térmica.
- Baja corrosión: tienen poca afinidad química con otros materiales.
- Bajo impacto ambiental: no son tóxicas y son reciclables.

Por otro lado, se debe tener en cuenta:

Las parafinas presentan un bajo subenfriamiento.

Sobrecalentamiento: Este proceso ocurre cuando, una vez producido el cambio de fase, continúa la aportación de energía al PCM, aumentando así la temperatura hasta llegar al sobrecalentamiento. Si se alcanzan temperaturas del orden del punto de ignición de la

parafina (en torno a los 200°C), pueden ocasionarse graves daños en la instalación. Este es el mayor inconveniente de las parafinas. (Rodríguez V, p.14).

En la Tabla 15, se presenta un cuadro comparativo como resumen de las ventajas y desventajas de los PCM orgánicos, inorgánicos y eutécticos (Moscoso, 2016).

Tabla 15

Ventajas y Desventajas de los PCM.

Tipo	Ventajas	Desventajas
Orgánicos	- Estabilidad química	- Baja conductividad térmica
	- Fusión congruente	- Alta variación de volumen durante la
	- Poco o nada de subenfriamiento	transición de fase
Inorgánicos	- Mayor capacidad de	- Fusión incongruente, segregación de
	almacenamiento de calor latente	fases
	de fusión por unidad de masa que	- Pocas propiedades de nucleación,
	los orgánicos	mayor probabilidad de
	- Alta conductividad térmica	subenfriamiento
	- Poca variación de volumen	
	durante la transición de fase	
Eutécticos	- Capacidad de obtener	- Alto costo
	propiedades deseadas para una	- Información limitada sobre las
	aplicación en concreto	propiedades termofísicas de muchas
		de sus posibles combinaciones.

Nota. Adaptado de Tomado de Resumen Comparativo Ventajas y Desventajas de los PCM, 2016, Moscoso, Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura.

2.7.10 Encapsulación

La incompatibilidad entre los PCM y sus contenedores, genera inestabilidad a largo plazo, degrada las propiedades del PCM y provoca corrosión con los recipientes que lo contiene. Una alternativa para superar estos inconvenientes, es la encapsulación de los PCM; las cuales ofrecen ventajas significativas, como:

- "Aumento del área de transferencia de calor.
- Reducción de la reactividad hacia el ambiente exterior.
- Control de los cambios en el volumen, éstos ocurren dentro de la capsula.
- No hay absorción de humedad" (Moscoso, 2016, p.14).

La técnica de encapsulación aumenta la superficie de la transferencia de calor. Por ejemplo, se ha logrado desarrollar cápsulas de 10mm de diámetro rellenas de PCM con lo que se ofrece 300m² de contacto por metro cúbico. Otra ventaja del encapsulado de PCM, es la reducción de la reactividad del material con el ambiente y el mejor control de los cambios de volumen cuando hay cambio de fase. Con encapsulado, se ha conseguido espesores de decenas de milímetro hasta menores de un milímetro; sin embargo, tamaños reducidos generan un mayor costo de fabricación, así como mayor nivel de desarrollo tecnológico (Grande, 2016).

Los materiales empleados en fabricar las cápsulas deben tener las siguientes características: Niveles adecuados de flexibilidad, resistente tanto a fuerzas como a la corrosión y estabilidad térmica.

Actuar como barrera para proteger el PCM de interacciones dañinas con el fluido caliente.

Ser lo suficientemente pequeñas como para ofrecer la máxima superficie de transferencia posible.

Proporcionar estabilidad estructural y tener fácil manejo (Grande, 2016, p.55).

Hasta la actualidad, se ha logrado desarrollar cápsulas de 1-2cm (Macro-Cápsulas) hasta el rango de los micrómetros (Grande, 2016).

En la Figura 14 muestra los principales métodos de encapsulación (Grande, 2016); que de acuerdo a su tamaño, pueden ser: micro y macro encapsulados.

Figura 14

Principales métodos de encapsulación de PCM.



Nota. Adaptado de Principales métodos de encapsulación de PCM, 2016, Grande, Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura.

2.7.10.1 Macroencapsulados. La macro-encapsulación consiste en el encapsulado o empaquetado de PCM en un recipiente, que pude ser tubos, bolsas, esferas, paneles u otros. El tamaño de estos macro-encapsulados es más de 1 cm³, almacenando desde varios mililitros hasta varios litros (Moscoso, 2016), (Zelota, 2013) (Figura 15, 16, 17).

Ventajas

- "Evitar cambios en la composición de los PCM.
- Dependiendo de su rigidez, puede añadir estabilidad mecánica al sistema.
- Utilización de recipientes ya disponibles en el mercado" (Moscoso, 2016, p.15).

Desventajas

- "Tendencia a solidificar / fundir en los bordes del recipiente, reduciendo el tiempo de absorción y liberación de energía y evitando que el sistema se descargue completamente durante la noche. La geometría del recipiente juega un papel importante.
 - Su tamaño implica que tienen que ser protegidos contra la destrucción o la perforación, al igual que una mayor dificultad para integrarlo a otros sistemas" (Moscoso, 2016, p.15).

Figura 15

Cápsulas esféricas de acero inoxidable y cilindros.



Nota. Corresponde a la empresa EPS Ltd. Adaptado de Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, 2009, Oliver.

Figura 16

Cápsulas esféricas de poliolefina y paneles de polipropileno.



Nota. Corresponde a la empresa TEAP. Adaptado de Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, 2009, Oliver.

Figura 17

Diferentes formas de presentación de macrocápsulas: cilíndricas



Nota. Corresponde a FMC-PCM (Internacional Energy Agency) y las esféricas a Deltathermal. Adaptado de Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, 2009, Oliver.

Los materiales utilizados en la macro-encapsulación de PCM, son envases y bolsas de plástico o metal, de formas cilíndricas, prismáticas o esféricas. Se utilizan envases plásticos por su

ventaja de disponibilidad en el mercado y su facilidad de producirlos en la variedad de formas que se requiera y además, son compatibles con la mayoría de PCM (Moscoso, 2016). Pero, como los plásticos tienen una baja conductividad térmica, no es una opción para mejorar la transferencia de calor. En este caso, una buena alternativa serían los recipientes metálicos pero sin embargo se debe tomar en cuenta la compatibilidad con el material de cambio de fase (Moscoso, 2016). La Figura 18 y 19 muestran diversos modelos de macroencapsulamiento que usa plástico o bolsas de polímeros transparentes.

Figura 18

Macro-cápsulas plásticas de distintos tamaños y bolsas de polímeros con recubrimiento transparente.



Nota. Fabricante: Rubitherm Technologies GmbH. Adaptado de Macrocápsulas plásticas, 2016, Moscoso, Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura, Tesis.

Figura 19

Perfiles de aluminio con aletas para mejorar la transferencia de calor.

Nota. Izquierda, Fabricante: Climator. Derecha, Placa recubierta de aluminio. Fabricante: Rubitherm Technologies GmbH. Adaptado de Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura, Tesis, 2016, Moscoso.

2.7.10.2 Microencapsulados. La microencapsulación es el proceso donde partículas de PCM, sólido o líquido (el núcleo) son recubiertos de una película continua de material polimérico (la cáscara) (Zelota, 2013), produciendo cápsulas de tamaños del orden de los micrómetros a la de milímetros (1 µm a 1000 µm de diámetro) (Moscoso, 2016), son microcápsulas de PCM sólidos, líquidos o gases, de formas esféricas o asimétricas, de tamaños variables, con membrana o cáscara dura para protegerlo del entorno que lo rodea. El material de la membrana exterior debe ser compatible con el PCM y, a su vez, ser capaz resistir las tensiones mecánicas sobre las paredes del recipiente, como consecuencia de las variaciones de volumen durante el cambio de fase (Zelota, 2013).

Las ventajas y desventajas que ofrece la micro encapsulación para sistemas de almacenamiento térmico son:



Ventajas:

- "Mejora de la transferencia de calor, debido a la gran superficie en relación al volumen de las cápsulas.
- Mejora de la estabilidad de ciclos, ya que la separación de fases está restringida por distancias microscópicas" (Moscoso, 2016, p.14).

Desventajas:

- "Aumento de la probabilidad de subenfriamiento.
- No recomendado para sales hidratadas" (Moscoso, 2016, p.14).

Los PCM micro-encapsulados que se encuentran en el mercado se presentan dos formas: dispersión fluida (donde las cápsulas son dispersadas en agua) o en polvo (para la elaboración de mezclas en seco) (Figura 20 -21). Los procesos físicos que se empelan para microencapsular son: el pulverizado, centrifugado, en lecho fluido o recubrimiento como los cilindros de laminación (Zelota, 2013).

Figura 20

Micronal PCM. Formato de dispersión fluida y en polvo



Nota. Fabricante BASF, The Chemical Company. Adaptado de Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura, Tesis, 2016, Moscoso.

Figura 21



Fotografía ampliada de PCM Microencapsulados

Nota. A la izquierda una fotografía ampliada de PCM Microencapsulados (Deltathermal), a la derecha pasta con PCM microencapsulado (Internacional Energy Agency). Adaptado de Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, 2009, Oliver.

2.7.11 Mejora de las propiedades de los PCM

2.7.11.1 PCM con granito o metal. El encapsulado de PCM mejorara la conductividad térmica de la unidad del almacenamiento. Por ejemplo, la cera de parafina tiene baja conductividad térmica 0,24 (W/m·K) de manera que, para mejorarla se necesita incorporar materiales con buena conductividad térmica en los encapsulados (Oliver, 2009). Uno de estos materiales es el grafito cuya conductividad térmica es k= 150 W/mK (ver Figura 22). Oliver et al (2001) describen en su trabajo sobre una matriz porosa de grafito que contiene cera de parafina como PCM (Oliver, 2009). El compuesto obtenido logra tener una elevada capacidad de almacenamiento de energía térmica y una buena conductividad térmica total. La conductividad depende de la porosidad del grafito, que presenta una elevada anisotropía y una gran variedad (Oliver, 2009).

Figura 22

Virutas de grafito. Forma comprimida. Grafito en polvo.



Nota. Adaptado de Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, 2009, Oliver.

Otra técnica para mejorar la transferencia de calor en la unidad de almacenamiento, se puede introducir el PCM en una matriz porosa metálica (Figura 23), dado la elevada conductividad térmica de los metales. Sin embargo, como los metales tienen una densidad mayor al grafito el compuesto resultaría muy pesado.

Figura 23

Relleno de estructuras VSP25 y VSP 50 de aluminio. Lámina de compuesto de PCM-grafito.



Nota. Adaptado de Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno, 2009, Oliver.

2.7.11.2 PCM con HDPE: Forma estabilizada. En los últimos años, se ha desarrollado un compuesto llamado "PCM de forma estabilizada" (shape-stabilized PCM), que permite superar los principales problemas del encapsulado, entre ellos su elevado costo (Cerezuela, 2012).

La mezcla está compuesta de parafina como PCM y de HDPE (polietileno de alta densidad) o de otros compuestos como material de soporte, como la masa de la parafina es del 80%, la energía almacenada es comparable con la de los PCM tradicionales. Se ha investigado el rendimiento térmico del PCM estabilizada, así como varios tipos de polietileno de alta densidad (HDPE) con diferente temperatura de fusión para su uso como material de soporte (Cerezuela, 2012).

También se desarrollaron otras técnicas de estabilizar como, el de introducir directamente el PCM en los huecos de los bloques de construcción. Así, Salyer et al., desarrollaron métodos para contener el PCM y los aplicó a bloques de construcción huecos. También desarrolló una nueva composición (K-18/HDPE/EVA/ABS mezcla-fundida), para ser mezclada mecánicamente y formar pellets secos que contienen el PCM. Por ejemplo, en los huecos establecidos en los bloques de hormigón se pueden introducir una gran cantidad de pellets PCM/HDPE, PCM/sílice en polvo, o PCM-fundida (Salyer et al., citado por Cerezuela, 2012).

2.8 Marco conceptual

- "Almacenamiento Energético: proceso mediante el cual se propende por conservar en la medida de lo posible una cierta cantidad de energía en un determinado dispositivo.
- Calor latente: Se define como la cantidad de energía calórica que necesita una sustancia para pasar de su fase sólida a su fase líquida o de su fase líquida a su fase gaseosa sin experimentar cambios de temperatura y presión.

- Calor sensible: Energía recibida por un sistema que hace aumentar la temperatura del mismo, sin afectar su estructura molecular, la cantidad de calor necesaria para calentar o enfriar un sistema es directamente proporcional a su masa.
- Calor: Es una forma de energía que se transfiere entre dos sistemas, debido a una diferencia de temperatura, dicha transferencia se hace del sector de mayor temperatura al de menor temperatura.
- Calor específico: Es la una relación física que se define como la cantidad de calor que hay que suministrar a la unidad de masa de una sustancia o sistema termodinámico para elevar su temperatura en una unidad. En general, el valor del calor específico depende del valor de la temperatura inicial
- Calorimetría: es una técnica destinada a fabricar aparatos y procedimientos que permitieran medir la cantidad de calor desprendida o absorbida en una reacción mecánica, eléctrica, química o de otra índole. Se basa en la primera ley de la termodinámica.
- Capacidad calorífica: es cantidad de energía calorífica transferida a un cuerpo para generar un cambio de temperatura en una unidad.
- Cocina solar tipo caja: es un artefacto que permite cocinar alimentos usando la radiación incidente del Sol como fuente de energía. Dispone de una acumulador tipo caja y un reflector plano. En el acumulador se tiene una placa negra que se calienta y la radiación infrarroja es atrapada por efecto invernadero producido por la cubierta de vidrio del acumulador.
- Clima: es la integración de los factores meteorológicos y climáticos que concurren para dar a una región su carácter y su individualidad (Linés, 2010, p.2)

- Factores climáticos. Son elementos del clima, como las temperaturas, radiación, humedad, etc. (Zareaian y Aziz, 2013, p.197)
- Difusividad térmica (m²/s). Es la magnitud que cuantifica la velocidad a la que se distribuye el calor en un material y no sólo depende de la conductividad sino de la velocidad a la que la energía puede ser almacenada. El significado físico de la difusividad está asociado a la velocidad de propagación del calor y, por tanto, con el tiempo que el material tarda en alcanzar el equilibrio térmico (ACTIMAT, 2009; mencionado por Mosquera, 2013, p.48).
- Diferencias finitas. El método consiste en una aproximación de las derivadas parciales por expresiones algebraicas con los valores de la variable dependiente en un número finito de puntos seleccionados en el dominio. Como resultado de la aproximación, la ecuación diferencial parcial que describe el problema es remplazada por un número finito de ecuaciones algebraicas, en términos de los valores de la variable dependiente en los puntos seleccionados. Los valores de los puntos seleccionados se convierten en las incógnitas. La solución del sistema de ecuaciones algebraico permite obtener la solución aproximada en cada punto seleccionado de la malla.
- Eficiencia térmica: Es la medida del rendimiento de una máquina térmica, se define como la relación entre el trabajo neto o útil obtenido y el calor suministrado al sistema o fluido de trabajo.
- Efusividad térmica (J/(m².K.s^{1/2}) Mide la capacidad del material para intercambiar calor con el entorno cuando no estamos en condiciones estacionarias (ACTIMAT, 2009; citado por Mosquera, 2013, p.48)
- Energía Interna: Simbolizada por la letra U, su concepto es muy abstracto, sin embargo, puede tomarse como reflejo de la energía a escala macroscópica; Más concretamente, es la

suma de la energía cinética interna, es decir de las sumas de las energías cinéticas de las moléculas que lo forman respecto al centro de masas del sistema, la energía potencial interna, que es la energía potencial asociada a las interacciones entre estas moléculas.

- Entalpia: Simbolizada con la letra H mayúscula, cuya variación expresa una medida de la cantidad de energía absorbida o cedida por un sistema termodinámico, es decir, la cantidad de energía que un sistema intercambia con su entorno.
- Estado: Condiciones a las que se encuentra un sistema objeto de estudio.
- Fase: Porción de materia homogénea.
- Fusión: Proceso mediante el cual un material por adición de energía calórica pasa de la fase sólida a la fase líquida.
- Intensidad de radiación solar: Es la intensidad de energía incidente sobre una superficie plana normal. La intensidad de la luz del Sol que llega a la superficie terrestre se denomina Irradiancia.
- Parafina: Compuesto orgánico, derivado del petróleo, alifático, perteneciente a los alcanos, de cadena carbonada superior a 17 átomos, con punto de fusión bajo y punto de ebullición alto. Formulados generalmente así, C_nH_{2n+2}.
- Primer factor de mérito F1: en una cocina solar establece la relación entre la eficiencia óptica de la cocina y las pérdidas de calor al exterior desde la placa (Esteves y Román, 2003).
- Propiedades termodinámicas: Características que definen el estado termodinámico del sistema objeto de estudio.
- Radiación solar es la radiación electromagnética procedente del Sol caracterizado por su espectro solar.
- Secador solar: es un dispositivo que utiliza la energía solar para secar determinados productos. Consta fundamentalmente de un colector solar y una cámara de secado. En el colector el aire se calienta y pasa a la cámara de secado donde el aire caliente quita la humedad del producto.
- Segundo factor de mérito F2: en una cocina solar relaciona la eficiencia de la transferencia de calor hacia el recipiente de cocción (Esteves y Román, 2003).
- Solidificación: Proceso mediante el cual un material disocia energía calórica para alcanzar la fase sólida.
- Subenfriamiento: proceso en el que se enfría un líquido por debajo de su punto de congelación sin que se haga sólido, la masa fundida debe cristalizar en su punto de congelación termodinámico (Cancillo, 2012).
- Termodinámica: Área de la física encargada de estudiar todo lo concerniente a la energía, relaciones y consecuentes transformaciones" (Ochoa, 2016, p.38).

III. Método

3.1 Tipo de investigación

Investigación explicativa, según el estado del conocimiento y alcance de resultados. Investigación aplicada, de acuerdo las posibilidades de aplicación de los resultados. Investigación experimental, de acuerdo a la manipulación de variables.

3.2 Población y muestra

Se considera los materiales sólidos y líquidos disponibles en la ciudad de Ayacucho, materiales que abunden, sean de bajo costo y tengan características térmicas que permitan ser considerados como un material de cambio de fase de calor sensible; para luego de ser elegidos como material base del acumulador térmico solar para la temperatura de operación requerida en secadores y cocinas solares de uso familiar. El trabajo se orienta hacia aplicaciones de escala familiar, para uso de cocción de alimentos o secado de productos excedentes, plantas aromáticas, frutas, etc.

Los datos para la evaluación térmica de sistemas solares, se obtuvieron durante los días apropiados que cumplan los requisitos de evaluación de acuerdo al protocolo del RICSA-CYTED (Esteves y Román, 2003).

3.3 Operacionalización de variables

Tabla 16

VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	UNIDADES
Acumulador	Dispositivo que	Se selecciona el	Material de	- Calor específico	- Cal/g°C
solar térmico	almacena	material local	cambio de fase	- Calor latente	- Cal/g
pasivo de	energía térmica	apropiado como			- °C

Operacionalización de las variables de investigación

mediana	en el proceso de	material de		- Temperatura de	
temperatura	calentamiento y	cambio de fase,		fusión	- Wm/ºC
con	cambio de	se dimensiona		- Conductividad	
materiales	estado sólido a	las		térmica	
de cambio de	líquido de un	características	Intercambiador	- Tamaño del	- cm
fase y/o calor	material PCM	del	de calor	acumulador	
sensible.	(Parafina), en el	intercambiador		- Tamaño de	- cm
	orden de	que encapsulan		Aletas internas y	
	temperatura de	o acumulan el		externas	
	10 a 90° C,	material de	Energía	- Cantidad de	- g
	intercambiando	cambio de fase.	acumulada	material de	
	energía térmica	Mediante un		cambio de fase	
	por contacto con	software se			
	el fluido	simula su			
	caloportador	capacidad de			
	(aire)	transferencia de			
	(Rodríguez,	energía térmica.			
	2015).				
Sistemas	Sistemas que	Se incorporan	Cocina solar	- Temperatura de	- °C
solares	utilizan la	las unidades del		estancamiento en	
térmicos	energía del Sol	acumulador en		la cámara de	
familiares	para producir	la placa		cocción en la	
	energía térmica	colectora del		cocina solar	- %
	que puede	colector solar de		- Factores de	
	aprovecharse	los sistemas		mérito	
	para la cocción	solares térmicos	Secador solar	- Tiempo de secado	- Min
	de alimentos o	familiares		cuando cesa la	
	para secar			intervención solar	
	productos a			- Eficiencia Térmica	- %
	escala familiar.			del Colector Solar	

Variable interviniente: Condiciones climáticas de Ayacucho

Indicadores: Latitud, Altitud y Nubosidad

3.4 Instrumentos

Mediante la observación experimental se registra la toma de datos experimentales en situaciones controladas, haciendo uso de equipos de alta confiabilidad.

Instrumentos de recolección de datos:

3.4.1 KD2 Pro: Analizador de propiedades térmicas

Mide la Conductividad Térmica, Resistividad Térmica, Calor Específico y Difusividad

Térmica. Cumple las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334-08.

Sensores:

SH-1: 3mm Dual SENSOR (conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico)

- para sólidos porosos

TR-1: 100mm Single SENSOR (conductividad térmica y resistividad térmica) - para suelos, hormigones, lechadas, roca y materiales de construcción

KS-1: 60mm Single Sensor (Conductividad Térmica y Resistividad Térmica) - para líquidos y nanofluidos

Figura 24

Analizador de propiedades térmicas KD2 Pro



3.4.2 EBI 40 TC-01. EBRO ELECTRONIC. Registrador de datos de temperatura de 12 canales para termocuplas tipo K.

Registrador de temperatura multicanal 12 canales de temperatura, ajuste de cuota de medición, lectura de valores actuales en pantalla TFT, puerto USB para conexión a PC registrador de datos para 20 000 valores por canal (Figura 25)

Especificaciones técnicas

Número de canales	12 (EBI 40 TC-2)		
Memoria	20 000 valores de medición por cana		
Rango de medición	-200 +1200 °C		
Precisión	± 0,5 °C (a 25 °C sin sensor)		
Resolución	0,1 °C		
Sensores	termoelemento tipo K		

Figura 25

Registrador de datos de temperatura de 12 canales EBI 40 EBRO.



3.4.3 Radiómetro UNI con interfase y memoria.

Mide la intensidad global de la radiación solar, a través de su célula fotovoltaica calibrada,

es mide, tanto la radiación directa como la radiación difusa de la atmósfera (Figura 26).

Cuenta con una unidad de memoria y display para la lectura directa de datos.

Precisión ± 1 W/m².

Figura 26

Radiómetro UNI y unidad de memoria.



3.5 Procedimientos

El acumulador solar térmico se basa en el concepto de un sistema pasivo donde el intercambio de calor será mediante flujo natural (no forzado), de mediana temperatura (15-90 °C) utilizando materiales de cambio de fase y/o de calor sensible que se encuentren en Ayacucho. El sistema puede adaptase al funcionamiento de sistemas solares de aplicación familiar y que optimice su proceso.

El diseño del acumulador solar térmico se basó en tres etapas:

a. Estudio de antecedentes, experiencias referenciales y la selección de materiales locales de cambio de fase y/o de calor sensible en base a la caracterización de sus propiedades.

- b. Etapa de diseño y simulación, que implica encontrar la geometría que permita reducir la complejidad, selección de materiales de cambio de fase y/o calor sensible y la simulación en torno al Software Comsol Multiphysics para caracterizar el comportamiento térmico del prototipo planteado y definir el diseño final.
- c. Evaluación térmica de los prototipos incorporados y funcionando en una cocina y secador solar en base a los protocolos de evaluación (RICSA CYTED: Esteves y Román, 2003).

3.5.1 Caracterización térmica de los materiales locales de cambio de fase y/o de calor sensible

3.5.1.1 Mediante el uso del KD2 Pro. Para seleccionar el material local como material de cambio de fase y/o de calor sensible, se mide sus propiedades térmicas utilizando el analizador de propiedades térmicas KD2 Pro, de acuerdo al procedimiento descrito en Standard Test Method for Determination of Thermal Conductivity of Soil and Soft Rock by Thermal Need-le Probe Procedure de la ASTM (American Society for Testing and Materials).

El KD2 Pro se basa en el Método de la aguja térmica (TNP: Thermal Needle Probe), es un método en régimen dinámico (no estacionario) que consiste en calentar eléctricamente una aguja metálica (que proporciona calor constante) durante un cierto periodo de tiempo e ir midiendo la variación de temperaturas. Se genera una pequeña perturbación térmica en la muestra analizada, midiéndose la perturbación de la temperatura a lo largo del tiempo en la muestra debido a la excitación térmica externa (Decagon-Devices-Inc., 2016).

Procedimiento de las medidas con KD2 Pro: (Decagon-Devices-Inc., 2016).

a. Utilizando un taladro se realiza un agujero de las dimensiones de la sonda o aguja. Las agujas se introducen en la muestra completamente, es recomendable impregnarla con grasa térmica.

- b. Requerimientos de la muestra: La muestra debe ser de tamaño medio suficiente para recubrir la sonda (o sondas). Las piezas pueden ser prismáticas con un mínimo de 5-6 cm de lado y unos 150-200 mm de longitud, o cilíndricas de 5-6 cm de diámetro y 200 mm de longitud.
- c. Tiempo: Una vez introducida la aguja se escoge el tiempo de medida. El tiempo por medida debe ser de 1 a 10 minutos. Los valores obtenidos en los segundos iniciales del calentamientoenfriamiento se descarten a la hora de obtener la conductividad térmica.
- d. Rangos: 0,02-4,0 W/m⋅K, para temperaturas entre -50 y +150 °C (el sensor), con una incertidumbre de ±10%.
- e. Fuentes de incertidumbre de la medida y análisis del error
- f. Hay factores que pueden hacer variar los resultados independientemente de la precisión o errores de los dispositivos:

Propios del material

- Heterogeneidad del material, discontinuidades y defectos.
- Porosidad. El error que propicia se debe al contacto entre la aguja y el material.
- Tamaño de la probeta: A mayor tamaño de la muestra, mayor fiabilidad

Propios del procedimiento

- Equilibrio de la temperatura: Los dispositivos electrónicos utilizados son muy sensibles a la variación de la temperatura porque el calentamiento que se produce debe ser muy bajo.
- Taladro apropiado: En consonancia con la necesidad de un contacto íntimo entre sondaprobeta.
- Retardo entre medidas. Es aconsejable hacer varias medidas en un mismo punto para verificar la correcta medición. El calentamiento de la aguja modifica la conductividad

térmica y se debe volver a equilibrar la muestra para que no se aumente progresivamente la temperatura y la conductividad térmica.

Propios del aparato

- Errores matemáticos por aproximación.
- El error de la estimación manual se elimina con el software del dispositivo. El KD2 Pro calcula 30 datos de temperatura en la fase de calentamiento y otros 30 en la fase de enfriamiento, de ellos considera que son válidos los 20 últimos y resuelve el cálculo con un software que utiliza un modelo de mínimos cuadrados no lineales para aproximar la recta.
- "err value".

Una vez finalizada la medición de conductividad térmica el display del aparato muestra el llamado "err value" que representa el error de los cuadrados de la dispersión de la medida, es decir, da una idea de la dispersión de los datos reales de temperatura respecto del modelo teórico que maneja. Por tanto, el propio aparato determina la precisión de la medida en este sentido.

En caso de una adecuación perfecta de los datos de T (respecto de t en escala logarítmica) a una recta el "err value" sería 0,0000. El fabricante da como resultados aceptables los que estén por debajo de 0,0100 (excepto para aislamientos térmicos). Es decir que el rango de $\pm 10\%$ de incertidumbre que indica el catálogo se consigue siempre que este error esté por debajo de 0,01 (Decagon-Devices-Inc., 2016).

- g. Medida de la conductividad térmica con el método de la aguja térmica:
- Se prepara muestras de parafina de forma cilíndrica de 10cm de altura y 6cm de diámetro, en tanto que se selecciona aleatoriamente muestras de piedra volcánica de la localidad.

- Se introduce la aguja de la sonda respectiva en la cara superior de cada muestra impregnándola con grasa térmica sobre todo en el material poroso, repitiendo hasta siete veces en condiciones ambientales del lugar (Decagon-Devices-Inc., 2016).

3.5.1.2 Método de calorimetría para medir el calor específico de las muestras de parafina y piedra volcánica. En un calorímetro se coloca la muestra y cierta cantidad de agua a diferentes temperaturas, el interior del calorímetro es un recinto adiabático donde se producen intercambios térmicos hasta alcanzar el equilibrio térmico. En el equilibrio, por conservación de la energía la suma de las cantidades de calor intercambiadas es cero.

3.5.2 Diseño y simulación mediante el COMSOL Multiphysics

COMSOL Multiphysics es una herramienta informática de análisis y resolución por el método de elementos finitos para diversas aplicaciones físicas y de ingeniería, orientado al tratamiento de fenómenos multifísicos. El método de los elementos finitos permite obtener soluciones aproximadas de ecuaciones diferenciales parciales, así como de ecuaciones integrales, mediante técnicas numéricas estándar, como el método de Euler, o de Runge-Kutta (Sánchez, 2016).

La simulación se desarrolló tomando en cuenta tres etapas (Quinga, 2018):

- a. Pre-procesamiento: Corresponde al modelado del sistema físico: se define la geometría del acumulador, los materiales de cambio de fase y/o calor sensible, se definen los parámetros, funciones y variables.
- b. Procesamiento: Es la solución, en la que se manipula las características del estudio eligiendo si es dependiente del tiempo, estacionario, en frecuencia, etc., en esta etapa se configura los solver, se parametriza determinadas dimensiones, etc.

c. Post-procesamiento: Corresponde a la obtención, la manipulación y la visualización de los resultados, en forma gráfica, tablas y otros elementos de representación

3.5.3 Evaluación térmica de los prototipos incorporados en una cocina y secador solar

Se fundamenta en el Protocolo de evaluación de colectores solares de la Red Iberoamericano de Cocción Solar de Alimentos (RICSA-CYTED), que establece parámetros que identifican la calidad del sistema de cocción solar tipo horno y que son relativamente independientes de las variabilidades climáticas y del alimento cocinado (Esteves y Román, 2003).

3.5.3.1 Primer factor de mérito F1 y segundo factor de mérito F2. Los ensayos permiten en evaluar comparativamente el comportamiento térmico de dos cocinas solares equivalentes, donde una incorpora el acumulador térmico y otro es libre; el procedimiento seguido es (Esteves y Román, 2003):

- Medición de la superficie proyectada sobre el plano horizontal: Este ensayo se comienza al mediodía solar (12 h Solar) del día anterior a realizar los ensayos.
- Medición de la temperatura máxima sin carga y obtención de F1. Comienza a las 10 h. Se debe registrar la temperatura de placa y la temperatura del aire.
- c. Calentamiento de agua: Se determina el tiempo requerido para alcanzar los 80 °C, la potencia y el segundo factor de mérito F2. La medida empieza a las 10 horas y se carga en la olla la cantidad de agua requerida (7 kg/m² de superficie proyectada horizontal corregida).
- d. Se coloca la olla en la cocina y se orienta la misma hacia el sol, colocando el reflector en la posición óptima para el día solar, es decir, en la posición que tenía en el momento de medir la superficie proyectada horizontal (el día anterior).

- e. Cuando la temperatura baja, de la temperatura de ebullición menos 3° C, se tapa el horno y se mantiene los registros para determinar el tiempo que mantiene la temperatura del agua por encima de los 80° C.
- f. Para la determinación del Segundo Factor de Mérito F2, se toma en cuenta el tiempo requerido para alcanzar los 80°C en el agua, desde la temperatura de 40°C.
- g. La obtención de los datos se realizó sin reorientación de la cocina (orientada en la posición del medio día solar).

3.5.3.2 Potencia de Cocción Efectiva. Se determina el cambio de la temperatura del agua, con la cual se calcula la energía absorbida por el agua. Luego se obtiene la potencia de calentamiento para cada intervalo de cinco minutos.

Dicha potencia se estandariza de acuerdo al protocolo RICSA para una radiación de 700 W/m².

Las gráficas de la Potencia estandarizada respecto a la diferencia de temperatura del agua con la temperatura de medio ambiente, es por la razón de que la pérdida de calor de la cocina aumenta con la diferencia de temperatura entre el interior de la cocina solar y el medio ambiente. En la evaluación de los parámetros térmicos de la cocina influye importantemente la velocidad del viento.

3.6 Análisis de datos

Para el análisis de datos se ha tomado en cuenta tres etapas:

 a. Mediante la caracterización térmica de materiales de cambio de fase y/o calor sensible, se determina el material base del acumulador solar térmico, definiendo la temperatura de funcionamiento en torno al requerimiento de cocinas y secadores solares.

- b. Mediante la simulación del comportamiento térmico del acumulador, utilizando el software Comsol Multyphisic se define la estructura geométrica: espesor del módulo y dimensiones de la aleta que optimice la acumulación y transferencia de calor. Comsol Multyphisic presenta sus resultados en torno gráficos del perfil de la temperatura en base a paletas de colores, muestra la evolución de la temperatura en el acumulador ante el cambio de un parámetro determinado; el software permite parametrizar el modelo desarrollado del cual se puede determinar la evolución temporal y espacial de la temperatura en el acumulador térmico. Dichos resultados permiten optimizar la geometría apropiada del módulo.
- c. La evaluación térmica de las cocinas solares y secadores solares se realizan en base a dos factores de mérito y curvas de potencia determinadas en condiciones estándares según los protocolos de colectores solares. Los resultados podrán indicar el grado de influencia del acumulador sobre el funcionamiento de las cocinas y el secador solar.

Para contratar el análisis de datos se ha planteado la hipótesis nula y alternativa:

Para la cocina solar

Hipótesis nula H_0 : La temperatura de estancamiento en la cámara de cocción de la cocina solar con acumulador PCM, con influencia de la radiación solar, es igual a μ_0 .

Hipótesis alternativa H₁: La temperatura de estancamiento en la cámara de cocción de la coccina solar con acumulador PCM, con influencia de la radiación solar, es mayor que μ_0

Para el secador solar

Hipótesis nula H₀: En el secador solar que incorpora el acumulador PCM, el tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar, es igual a μ_0 .

Hipótesis alternativa H₁: En el secador solar que incorpora el acumulador PCM, el tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar, es mayor a μ_0 .

Dado que el tamaño de muestra es pequeño (< 30) se utilizará la distribución t Student.

Prueba de hipótesis para la media poblacional

- i. Hipótesis nula H_o : $\mu=\mu_o$
 - Hipótesis alternativa H_1 : $\mu > \mu_0$

Con grados de libertad n-1

ii. Nivel de significancia α =5%

iii.
$$t = \frac{\bar{x}^{\mu_o}}{s/\sqrt{n}}$$
(12)

Dónde:

 \bar{x} :media muestral

- μ: media poblacional
- n: tamaño de la muestra
- s: desviación estándar
- iv. Se obtiene t_{crítico} en base a l nivel de significancia elegido (valor de la tabla con n-1 grados de libertad)
- v. Se obtiene tobtenido a partir de los datos de la muestra
- vi. Si: $t_{obtenido} > t_{crítico}$ se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna.

IV. Resultados

4.1 Condiciones climáticas de la ciudad de Ayacucho

Los datos que se presentan han sido obtenidos de los estudios realizados por Paolo Ambrosetti (1979) que se basa en la estación meteorológica de la Universidad Nacional San Cristóbal de Huamanga (Estación UNSCH).

4.1.1 Temperatura

La Figura 27, muestra la evolución anual de la temperatura en Ayacucho. Las temperaturas máximas se dan en los meses de abril-mayo y noviembre, las mínimas, corresponden a los meses junio, julio y agosto. Las mayores temperaturas medias corresponden a los meses entre noviembre y mayo (verano) y las mínimas medias entre junio y agosto (invierno).

Figura 27



Evolución de las temperaturas máximas, mínimas y media en Ayacucho

Nota. Elaborado con los datos de la Estación UNSCH

La Figura 28 muestra las isotermas de la temperatura durante las 24 horas a lo largo de un año en Ayacucho. De donde las temperaturas más bajas corresponden al intervalo de 4 a 7 horas

en los meses de junio y agosto; las más altas temperaturas se dan entre 11 y 15 horas,

correspondientes a todos los meses del año.

Figura 28

Isoterma de temperaturas para la ciudad de Ayacucho.



Nota. Elaborado con datos de la Estación UNSCH

4.1.2 Radiación Solar

La Figura 29 nos muestra la variación promedio anual de la radiación global (directa y difusa) en la ciudad de Ayacucho, sobre una superficie horizontal. Siendo la radiación promedio global anual de sobre una superficie horizontal de 6,4 KWh/m².

La Figura 30 muestra el movimiento del sol en la ciudad de Ayacucho para los diferentes meses del año, así como las horas de puesta y ocaso del sol.

Figura 29



Radiación global mensual en Ayacucho

Figura 30

Movimiento aparente del sol para la ciudad de Ayacucho.



4.1.3 Velocidad de viento

La posición geográfica de la ciudad de Ayacucho, que corresponde a una cuenca, genera vientos que buena parte del día tiene dirección N, NE y E. Las noches, después de las 24 h, son muy calmas. Entre las 12 y 20 h se presentan mayores variaciones de la velocidad del viento (ver Figura 31).

Figura 31



Velocidad de viento por horas en Ayacucho

4.1.4 Humedad Relativa

La humedad relativa en Ayacucho tiene un valor medio anual de 56%. La humedad relativa anual muestra grandes variaciones, la humedad relativa máxima es 97% en enero y febrero (época de lluvias) mientras que la humedad mínima es 22% en el mes de agosto (Figura 32).

Figura 32





La potencialidad de la energía solar en Ayacucho es óptima parar aplicaciones solares, dado que se dispone una energía global media de radiación de 6,4 kWh/m² con un porcentaje de 67% de horas de sol al año.

4.2 Propiedades térmicas de los materiales locales de cambio de fase y calor sensible

En la región de Ayacucho, fundamentalmente en las zonas rurales, se utilizan los recursos naturales locales como la tierra (adobe), cal, arcilla, madera, ichu (Stipa ichu) etc., en la construcción de viviendas, tapiales, techos, puertas, así como para conservar alimentos y semillas, donde se aprovechan, entre otros aspectos, sus propiedades como aislantes térmicos y/o higrométricos.

Los materiales utilizados como aislantes térmicos, tienen características fisicoquímicas que varían según la zona geográfica, por otro lado, los fabricantes de materiales aislantes térmicos convencionales reportan propiedades térmicas basados en datos generales, obtenidos en condiciones estándares (Chávez, 2009); siendo necesario caracterizar las propiedades térmicas de los materiales utilizados en condiciones climáticas regionales. A su vez, tomando en cuenta el enfoque de sostenibilidad y eficiencia energética, para las diversas aplicaciones térmicas, es necesario caracterizar las propiedades de los aislantes térmicos no sólo considerando los parámetros térmicos y geométricos sino también el impacto que produce en la reducción de CO₂ y en general sus propiedades ecológicas (Zach et al., 2012). En este sentido, se viene incrementando la demanda de materiales ecológicos en las diversas aplicaciones de la tecnología solar, lo que orienta a la búsqueda de materiales aislantes a partir de recursos renovables.

De acuerdo al INEI (2017) el tipo de material preponderante en las viviendas de la región de Ayacucho es el adobe en un 48% en la zona urbano, mientras que en la zona rural se utiliza el adobe y el tapial en un 87%. El adobe tiene un amplio uso por su bajo costo, su fácil acceso y por sus propiedades térmicas que lo caracterizan como un material aislante ecológico dado su baja conductividad térmica y por ser degradable. En Ayacucho, en el aspecto energético, se ha desarrollado diversas aplicaciones solares como las termas, cocinas y secadores en donde se requiere materiales aislantes térmicos y cuyo uso está sujeto a la oferta temporal energética solar.

La Tabla 17 muestra la conductividad térmica de algunos materiales utilizados en la región de Ayacucho, estos valores corresponden a diferentes trabajos de investigación de otras regiones. De la Tabla 17, se puede distinguir que los valores obtenidos de la conductividad térmica o capacidad calorífica son variables, lo que indica que cada material caracterizado está relacionado en cierta medida a sus condiciones locales y/o técnicas de medición. Considerando la baja conductividad térmica y su dificultad para adaptar como acumuladores de calor sensible en sistemas solares, no se han considerado como un elemento para ser incorporado en el presente trabajo.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad	Capacidad calorífica
		térmica (W/mºC)	específica (k J/kg K)
Adobe	1200^{1}	$0,024^1 0,176^2$	
Concreto armado	2400^{1}	1,63 ¹ 2,5 ³	1 ³
Ladrillo macizo hecho a	1400^{1}	$0,60^{1}$	
máquina	1800^{1}	$0,79^1 0,73^3$	0.92^{3}
Yeso	1000 ³	$0,178^4 \ 0,149^2 \ 0,4^3$	1 ³
Madera	450^{3}	$0,274^2 0,12^3$	$2,27^2$ $1,6^3$
Piedra	2800-1500 ³	3,5-0,85 ³	$1,24^2 1^3$

Conductividad térmica de materiales de construcción.

Nota. (1) Adaptado de la Norma Chilena Nch.853, Of. 93 citado en Díaz (2013), (2) Holguino et al, (2018); (3) Lizana et al, (2017); (4) Lira et al (2008) Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones.

4.2.1 Parafina

En Ayacucho, la cerería es una de las actividades tradicionales para la elaboración de velas, adornos religiosos, etc. De manera que es un producto accesible en nuestra zona. Las características térmicas de la parafina toman valores diversos dependiendo de su peso molecular. Sin embargo, nos es prioritario caracterizar dichas propiedades térmicas para las condiciones ambientales locales donde la presión atmosférica es 54,1 mmHg (71.3kPa). Ochoa (2016) presenta los resultados experimentales de la medida del calor específico y calor latente de fusión en relación a la presión Tabla 18. La parafina comercial tiene un peso molecular intermedio, que oscila en el rango de 350-420 (dependiendo del grado técnico de las ceras), su fórmula molecular: C_nH_{2n+2} , donde n es igual a 35 carbonos (Pentaricontano).

Propiedad		Estado	Estado	Unidad
		Líquido	sólido	
Conductividad térmica		0,25	0,25	W/mK
Calor específico	74,64 kPa (18°C)	1,57	2,74	kJ/kg°C
	96,63 kPa (28°C)	1,79	3,10	kJ/kg°C
Calor latente de fusión	74,64 kPa	4	58,4	kJ/kg
	96,63 kPa	3	1,55	kJ/kg
Temperatura de fusión			60	°C

Caracterización de la parafina comercial generalizada de peso molecular intermedio.

Nota. Parafina de peso molecular intermedio: CnH2n+2, donde n es igual a 35 carbonos. Adaptado de Caracterización de la parafina comercial, 2016, Ochoa, Evaluación de parafina comercial como material de cambio de fase para almacenamiento de energía, Tesis.

La cera de parafina de Pertamina (Compañía Estatal de Minería de Petróleo y Gas Natural de Indonesia) estudiado por Syukri Himran et al (2015) presenta la propiedad termofísica mostradas en la Tabla 19. La composición de la cera: N-alcano: 72%; Iso y cicloalcano: 28%; número de carbono promedio: 27,5, peso molecular: 387

Tabla 19

Propiedad	Valor	Unidad
Temperatura de transición, T _{tr}	40,71	°C
Calor latente de transición, Ltr	30,08	kJ/kg
Temperatura de fusión, T _m	55	°C
Calor latente de fusión, L	123,3	kJ/kg
Densidad: sólida, ps	934,5	kg/m ³

Propiedades termo físicas de la parafina.

Densidad: líquido, p _l	775	kg/m ³
Expansión térmica, β	0,778x10 ⁻³	°C-1
Calor específico: sólido, c _{ps}	2784	J/kg°C
Calor específico: líquido, c _{pl}	2080	J/kg°C
Conductividad térmica, ks	0,1364	W / mºC
Viscosidad cinemática, v	5,234x10 ⁻⁶	m^2/s
Viscosidad dinámica, µ	$4,84 \times 10^{-3}$	Pa.s

Nota. Adaptado de Propiedades termofísicas de la parafina, 2015, Himran et al., An Analysis on Thermal Energy Storage in Paraffin-Wax Using Tube Array on a Shell and Tube Heat Exchanger. International Scholarly and Scientific Research & Innovation 9(10) 1822-1829.

Tabla 20

Propiedades termo físicas de la parafina RT60

Propiedad	valor	Unidad
Rango de temperatura para cambio de fase	53-61	°C
Calor latente	123,506	kJ / kg
Conductividad térmica	0,2	W / mK
Densidad, sólido	880	kg / m^3
Densidad, líquido	770	kg / m^3
Calor específico sólido	2660	J / kgK
Calor específico líquido	2340	J / kgK
Viscosidad dinámica	3,705 x 10 ⁻⁵	kg / ms

Nota. Adaptado de propiedades termofísicas de la parafina RT60, 2014, Campos et al., Design of a finned plate latent heat thermal energy storage system for domestic applications. Energy Procedia 48. 300 – 308.

La parafina RT60 de Rubitherm GmbH (Empresa alemana Rubitherm Technologies GmbH) fue utilizada como PCM en el diseño de un sistema de almacenamiento de energía térmica por calor de placas con aletas para aplicaciones domésticas (Campos et al., 2014). Las propiedades termo físicas la parafina RT60 se muestra en la Tabla 20.

4.2.1.1 Propiedades térmicas de la parafina comercial de Ayacucho. La parafina comercial de Ayacucho tiene una densidad en estado sólido de 877 kg m⁻³ y en estado líquido768 kg m⁻³ medido a 70° C (Tabla 21):

Tabla 21

Densidad de la parafina comercial.

	Fase sólida	Fase líquida
		(70°C)
m (g)	220,92	220,92
$V(cm^3)$	251,82	287,80
ρ (g/cm ³)	0,877	0,768

4.2.1.1.1 *Medida de la conductividad térmica de la parafina sólida y líquida.* De acuerdo a las referencias bibliográficas, la parafina es utilizada en diversas aplicaciones como material de cambio de fase en el rango de temperaturas de 50° C a 60° C, lo que concuerda con la temperatura de uso en aplicaciones solares de media temperatura.

Por lo que fue necesario caracterizar las propiedades térmicas de la parafina para las condiciones locales, propiedades como la conductividad térmica, el calor específico volumétrico y difusividad térmica utilizando el medidor KD2 Pro. Por otro lado, también se realizó la curva de calentamiento de la cera para determinar su temperatura de fusión.

La medida de la conductividad térmica de la parafina comercial se realizó con el medidor de propiedades térmicas KD2 Pro, sensor KS1; para lo cual se preparó muestras de parafina cilíndrica de 10 cm de altura y 6 cm de diámetro. Se utilizaron intervalos de medición de 10 minutos, para lograr que la temperatura de la muestra regrese a equilibrio y evitar errores en las mediciones, los resultados se muestran en la Tabla 22.

Figura 33

Muestra de parafina y medidor de la conductividad térmica con KD 2 Pro.



Tabla 22

Medida de la conductividad térmica de la parafina sólida. Sensor KS1.

k	ρ	Т	Err
(W/mK)	(°Ccm/W)	(°C)	
0,208	481,2	21,41	0,0035
0,208	481,6	21,67	0,0035
0,208	480,6	21,76	0,0035
0,208	480,7	21,89	0,0032
0,208	481,6	21,33	0,0034
0,208	480,9	21,99	0,0035
0,208	481,3	22,00	0,0036
0,208	481,129	21,72	0,0035

Considerando el porcentaje de error en la medida de la conductividad térmica con el sensor KS1 es de: ±0,01 W/(mK) para medidas de 0,02 a 0,2 W/(mK) (Decagon Devices, 2016), la conductividad térmica de la muestra de parafina comercial sólida es de:

$$k = 0,208 \pm 0,01 \frac{W}{mK}$$

Para medir la conductividad térmica de la parafina líquida se calienta la muestra hasta una temperatura mayor a 67° C, que supera la temperatura de fusión de la parafina y donde toda la muestra se encuentre en estado líquido. La medida de la conductividad térmica se realiza con la sonda KS1 del medidor KD2 Pro. Los resultados se muestran en la Figura 33 y la Tabla 23.

Tabla 23

Medida de la conductividad térmica de la parafina sólida. Sensor KS1.

k	ρ	Т	Err
(W/mK)	(°Ccm/W)	(°C)	
0,185	539,9	72,94	0,0165
0,185	542,0	69,59	0,0124
0,187	534.4	66,56	0,0172
0,181	551,3	63,83	0,0083
0,192	522,1	61,30	0,0190
0,182	550,7	59,21	0,0058
0,187	560,0	77,15	0,0113
0,186	542,9	67,23	0,0129

La conductividad térmica de la muestra de parafina comercial líquida a 67,23 °C es de

$$k = 0,186 \pm 0,01 \, \frac{W}{mK}$$

D (mm ² /s)	C (MJ/m ³ K)	T (°C)	Err
0,157	1,852	25,74	0,0012
0,159	1,823	25,05	0,0013
0,162	1,783	24,06	0,0012
0,164	1,748	23,28	0,0012
0,159	1,717	24,15	0,0013
0,164	1,738	23,21	0,0012
0,165	1,723	22,71	0.0012
0,167	1,704	22,17	0,0011
0,162	1,761	23,80	0.0012

Medida del calor específico volumétrico (C) y difusividad (D) de la parafina sólida. Sensor SH1.

El porcentaje de error en la medida del calor específico volumétrico y difusividad de la parafina con el sensor SH1 es del 10% (Decagon Devices, 2016).

La difusividad térmica, que determina la rapidez de reacción del material a cambios de temperatura, de la parafina comercial sólida resulta (Tabla 24):

$$D = 0,162 \pm 0.016 \frac{mm^2}{s}$$

Y el calor específico volumétrico:

$$C = 1,761 \pm 0,176 \frac{MJ}{m^{3}K}$$

Para determinar la temperatura de fusión de la parafina comercial, se ha realizado la curva de calentamiento de una muestra de 11,18 g colocada en una probeta y sometida a calentamiento lento en el interior de un vaso de precipitado con agua (ver Figura 34). La variación de la temperatura en la muestra de parafina se ilustra en la Figura 35, del cual se establece que la temperatura de fusión de la parafina comercial resulta estar en el orden de 53°C.

Figura 34

Medida del calentamiento de una muestra de parafina en una probeta.



Figura 35

Curva de calentamiento de la muestra de parafina de 11,18 g, para determinar su temperatura de fusión. (20/03/19).



La Figura 36 muestra la variación que la temperatura de la parafina en el interior de un módulo de acumulación térmico con aletas internas, durante el proceso de calentamiento y enfriamiento del módulo. La Figura 36 muestra las etapas de cambio de fase de la fusión y solidificación de la parafina comercial, durante las cuales la temperatura es constante lo que se visualiza en la fracción horizontal de la curva. Se encuentra que la temperatura de fusión igualmente se encuentra en 53° C y la temperatura de solidificación ligeramente superior en el orden de 56° C.

Figura 36

Curva de calentamiento y enfriamiento de la parafina en el interior de un módulo de acumulación térmica con aletas internas.



4.2.1.1.2 *Medida del calor específico de la parafina sólida y Líquida*. Para determinar el calor específico de las muestras de parafina, se utiliza el método de la calorimetría. En un colorímetro se mezcla agua fría con la parafina caliente, hallándose la temperatura de equilibrio. Previamente se determina la capacidad calorífica del calorímetro.

es:

T 1	T 2	Teq	m 1	m 2	Cagua	mC	C parafina
(°C)	(°C)	(° C)	(g)	(g)	(kJ/kg°C)	calorímetro	(Kj/kgºC)
agua	parafina		agua	parafina		(J/ºC)	
22.60	48,80	25,30	240	60,2	4,186	249,32	2,393
22,50	51,00	25,80	240	60,2	4,186	249,32	2,728
22,80	51,50	26,10	240	60,2	4,186	249,32	2,706
22,65	54,50	26,25	240	60,2	4,186	249,32	2,654
22,40	43,98	24,90	240	60,2	4,186	249,32	2,729
22,80	53,88	26,20	240	60,2	4,186	249,32	2,559

Valores para determinar el calor específico de parafina sólida.

De la Tabla 25, el calor específico medio de la muestra de parafina comercial de Ayacucho

$$C = 2,628 \pm 0,054 \, KJ/kg^{\circ}C$$

Calentando la parafina hasta 53 a 56 °C, se mezcló con agua fría para obtener su calor latente de fusión medio, cuyo valor resultó:

$$L_f = 132,4 \pm 1,5 \ KJ/kg$$

Para el caso del calor específico de la parafina líquida calentado hasta 79° C se obtuvo el valor medio:

$$C = 2,379 \pm 0,081 \, KJ/kg^{\circ}C$$

La Tabla 26 muestra en resumen las propiedades termo físicas de la parafina comercial en Ayacucho.

Propiedad	valor	Unidad
Rango de temperatura para cambio de fase	53-56	°C
Calor latente	132,5	kJ / kg
Conductividad térmica (sólido)	0,208	W / mK
Conductividad térmica (líquido)	0,186	W / mK
Densidad, sólido	877	kg / m^3
Densidad, líquido	768	kg / m^3
Calor específico sólido	2628	J / kgK
Calor específico líquido	2379	J / kgK

Propiedades termo físicas de la parafina comercial de Ayacucho.

4.2.2 Piedra Volcánica Roja (Piedra Pómez)

La piedra volcánica roja se encuentra en la cantera del cerro de Acuchimay, ubicado en el distrito de Carmen Alto de la provincia de Huamanga, se encuentra a manera de costras desparramados y acumulados cerca de la probable chimenea volcánica en el cerro Acuchimay. Litológicamente son de composición andesítica, color oscuro, textura afanítica, pero algo poroso por las pequeñas vacuolas dejadas por el escape de gases durante su enfriamiento. Los bloques y fragmentos tienen una coloración rojiza (Ventura, 2015) sus propiedades se muestran en la Tabla 27 y Figura 37.

Las andesitas son rocas bastante porosas, con coeficientes de saturación en agua pequeños, ya que estos poros suelen mostrarse incomunicados (Machuca, 2015), esta estructura porosa influye en su propiedad térmica.

Descripción Macroscópica Roca Volcánico (Ventura, 2015).

Muestra	Cantera Acuchimay	
Nombre de la roca	Basalto Poroso	
Clase según su origen	Roca volcánica	
Color	Rojizo	
Minerales visibles/ componentes	Olivino, minerales ferrornagnesianos	
	Óxidos ele fierro	
Tamaño ele grano	0,02 mm	
Textura	Afanitico	
Grado de cohesión	Alto	
Grado de dureza	Duro	

Figura 37

Muestra extraída de la cantera Acuchimay (Ayacucho)



El análisis de la roca volcánica traquita, andesita (Machuca, 2015) se muestra en la Tabla

Propiedad	Valor
Densidad, en Kg/m ³	2000-2700
Conductividad térmica, en W/m K	1,1
Calor especifico, en kJ/kg K	1
Factor de resistencia a la difusión del vapor de agua,	15
adimensional	

Propiedades térmicas de la roca volcánica andesita (Machuca, 2015)

Las propiedades de la roca volcánica de Acuchimay medidas en el presente trabajo se muestran en la Tabla 29.

Tabla 29

Propiedades térmicas de la roca volcánica de Acuchimay (KD 2 Pro SH1).

4.3 Diseño del prototipo de un acumulador solar térmico pasivo de mediana temperatura

con PCM parafina.

La concepción del diseño de los prototipos de acumulador térmico solar, toma en cuenta lo planteado por Campos et al. (2014):

- El requerimiento energético es de mediana temperatura para aplicaciones solares de uso familiar de menor escala, de manera que para la cocción de alimentos en las cocinas solares

que requiere temperatura del orden de 90° C a 93° C (temperatura de ebullición del agua en Ayacucho) y para el secado de productos que requiere, para un buen secado, aire a una temperatura óptima de 40° C a 70°C (UNESCO, 2005), en secadores solares se alcanzado valores de temperatura del aire en la entrada de la cámara de secado a partir de 30° C (GRAMMER, 2018).

La geometría que se ha determinado es de carácter modular, es decir se diseña módulos o unidades básicas del acumulador que optimice el proceso de acumulación e intercambio de calor. Estas unidades pueden generar arreglos que se adapten a la aplicación térmica solar que se requiera. De manera que se diseñó la configuración compacta de placa plana. (a) con sólo aletas internas (b) con aletas internas y externas Adicionalmente, considerando el menor costo del módulo básico se diseña un módulo cilíndrico de aluminio reciclado de latas de bebidas comerciales.

El diseño de los prototipos, en cuanto a su funcionamiento térmico, se basa en el principio de funcionamiento de intercambiadores de calor de placa plana compactos (Campos et al., 2014), que se considera la tecnología de intercambiador de calor más efectiva, que para las aplicaciones solares térmicas como el secador y la cocina solar se utiliza al aire como fluido intercambiador de calor.

La geometría modular determinada, ha permitido diseñar módulos o unidades básicas de acumulador que sean fáciles de construir y de menor costo posible; que de acuerdo a la demanda energética pueden establecerse arreglos que se adapten y faciliten su integración al espacio disponible de acuerdo a la aplicación térmica solar. Estas unidades modulares permiten el encapsulamiento del material de cambio de fase, dado que el método de encapsulamiento proporciona ventajas, como:

Mayor área de transferencia de calor, dado que presenta una alta relación superficie / volumen, que permite obtener mayor almacenamiento y liberación de calor. Controla las variaciones de volumen del PCM en la transición de fase: Genera mayor estabilidad cíclica y térmica. Reduce o elimina el subenfriamiento y la segregación de fases del PCM (Milián, 2018, p.12)

La selección de la parafina comercial local como material PCM en el acumulador térmico, genera desventaja en relación a su baja conductividad térmica, de manera que la técnica del encapsulamiento del PCM va a permitir mejorar la transmisión térmica en el medio de almacenamiento (Oliver, 2009), aumentando la conductividad térmica global con lo que aumenta la tasa de carga / descarga del PCM (Milián, 2018).

4.3.1 Simulación del comportamiento térmico con COMSOL MULTIPHYSICS.

Para optimizar las dimensiones de los módulos prototipos determinados, utilizamos el software Comsol Multiphysics 5.3 mediante el cual se realiza la simulación del comportamiento térmico de los módulos en relación a parámetros geométricos.

La unidad básica del acumulador e intercambiador de calor, es una placa compacta de cobre con aletas internas y con o sin aletas externas, en el que está macroencapsulado el PCM de parafina local, generando un intercambiado de calor PCM-aire.

4.3.1.1 Creación del modelo y selección de la dimensión. Se apertura el software, seleccionando el tipo de modelo. Para la aplicación se elige el "Model Wizard" o "Asistente de modelo", a través del cual se va determinando la configuración de la dimensión espacial.

La selección de la dimensión espacial corresponde a la componente del modelo: 3D, que va permitir un simulación del comportamiento térmico del acumulador en tres dimensiones; el cual se presenta se presenta en la Figura 38.

Figura 38

Selección del asistente de modelo y dimensión espacial 3D.



4.3.1.2 Selección de la física y el tipo de estudio. Se selecciona la interfaz de "Transferencia de calor en sólidos" en los que se emplea los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación; ver Figura 39.

Figura 39

Selección de la física y tipo de estudio del modelo.

Archivo 🔻 Home Definiciones Geometría Materiales Física Ma	lla Archivo V Home Definiciones Geometría Materiales Física Malla
Seleccionar física Buscar • • •	Seleccionar estudios
Interfaces físicas añadidas:	
C Dimensión de espacio	- Fisica
? Ayuda 🗙 Cancelar 🗹 Hecho	🔁 Ayuda 🚫 Cancelar 🗹 Hecho
El tipo de estudio seleccionado es el estacionario, y cuando fue necesario se seleccionó el temporal.

4.3.1.3 Definición de parámetros y variables. Definimos cada uno de los parámetros y variables que se van a utilizar para controlar el modelo. Se especifican las variables que se determinan en función de los valores de los parámetros.

4.3.1.4 Selección de la geometría. Para determinar la geometría más apropiada tomamos de referencia los aportes desarrollados por Campos et. al. (2014) que menciona de todas las posibles combinaciones entre formas y técnicas de sistemas de almacenamiento térmico en general, la configuración compacta de placa plana con aletas presenta mejores ventajas:

En la tecnología de intercambiadores de calor resulta ser la más efectiva.

- Presenta alta modularidad, lo que nos permite encapsular el material de cambio de fase en módulos para ser utilizados acoplándose en la cantidad de unidades que se requieran.
- Su construcción es más sencilla por la presencia de superficies rectas y su forma rectangular permite integrarse o acoplarse con mayor facilidad al espacio disponible por ejemplo en el interior de las cocinas y/o secadores solares.

Figura 40

Prototipo modular de acumulador térmico con PCM con aletas internas.



Prototipo modular de acumulador térmico con PCM, con aletas internas y aletas externas por ambos lados de la superficie.



Para el desarrollo de la simulación se concibe unidades modulares (módulo o unidad PCM) de geometría rectangular en las que está encapsulada la parafina como material PCM. La dimensión del largo y ancho del módulo se considera fijo en cuanto a su largo (20 cm) y ancho (30 cm) quedando por determinar las dimensiones del espesor del módulo y el ancho de las aletas internas y externas, Figura 40 y 41. También se diseña módulos cilíndricos, para implementarlos con materiales reciclados que aparecen en la Figura 42.

Figura 42

Prototipo modular de acumulador térmico con PCM con materiales reciclados de aluminio de forma cilíndrica (Modelo alternativo).



4.3.1.5 Selección de materiales. Se usa el banco de datos del software para elegir los parámetros térmicos necesario de los materiales considerados, cobre para la estructura del módulo y aire circundante; los valores de la parafina se tomó de Campos et al (2014) de las Tabla 30-31 con los que concuerdan los valores térmico obtenidos experimentalmente de la parafina comercial local. Estos valores fueron manualmente introducimos en la interfaz de propiedades físicas.

Tabla 30

Propiedades térmicas de la parafina utilizada en el módulo de PCM.

Propiedad	Nombre	valor	Unidad
Rango de temperatura para cambio de fase	Т	53-61	°C
Calor latente	L_{f}	123,506	kJ / kg
Conductividad térmica	k	0,2	W / mK
Densidad, sólido	Rho	880	kg / m^3
Densidad, líquido	Rho	770	kg / m^3
Calor específico sólido	C_p	2660	J / kgK
Calor específico líquido	C_p	2340	J / kgK
Viscosidad dinámica	μ	3,705 x 10 ⁻⁵	kg / ms

Nota. Adaptado de Propiedades térmicas de la parafina, 2014, Campos et al.

Tabla 31

Propiedades térmicas del cobre (COMSOL)

Cobre	Nombre	Valor	Unidades
Conductividad	k	401	$W/(m \cdot K)$
Densidad	Rho	8,933	kg/m ³
Calor específico	C _p	385	J/(kg·K)
Emisividad de superficie	3	0,97	

4.3.1.6 Definición método físico. La concepción del prototipo se basa en acumular la energía térmica en el material de cambio de fase encapsulado en una estructura paralelepípedo de cobre y que dicha energía pueda ser utilizada de acuerdo a la aplicación solar requerida, que para el caso nuestro, puede ser en un secador o cocina solar.

Se simula la capacidad de transferencia de calor a través de la estructura del sistema del acumulador al aire circundante, para lo cual se selecciona la interfaz de "Transferencia de calor en sólidos" en los que se emplea los mecanismos de transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

Las simulaciones realizadas permiten determinar la estructura geométrica apropiada, en la que caracteriza el espesor del módulo, el tamaño de las aletas internas y externas para optimizar la transferencia de calor del material de cambio de fase al exterior.

En la simulación se muestra el nivel de influencia de los parámetros geométricos del módulo en la rapidez de transferencia de calor, para mejorar la carga y descarga de la energía acumulada en la unidad modular, se determina:

- La influencia del espesor del material de cambio de fase, que es equivalente al espesor del módulo; en base a ello se define el espesor apropiado de la estructura del módulo.
- La influencia de la longitud de las aletas internas al interior del módulo.
- La influencia de la longitud de las aletas externas al módulo.

La ecuación de la temperatura definida en dominios sólidos corresponde a la forma diferencial de la ley de Fourier que puede contener contribuciones adicionales, tales como las fuentes de calor.

En esta etapa definimos las condiciones del sólido, valores iniciales, aislamiento térmico y flujo de calor, lo se muestran en la Figura 43.

Selección de los dominios de sólidos, flujo de calor y cambio de fase.



4.3.1.7 Físicas y ecuaciones base de la interfaz de modelado. El COMSOL dispone interfaces físicas básicas para diversas áreas, en este caso se selecciona la transferencia de calor. Para las soluciones matemáticas se incluye un conjunto de interfaces para principios físicos fundamentales con la que se crea una simulación mediante ecuaciones diferenciales parciales (PDE). Las ecuaciones para el modelado se basan en las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento, energía y transferencia de calor. Las ecuaciones determinadas, se presentan usando operadores vectoriales y son las siguientes:

Para la transferencia de calor en todos los dominios:

$$\rho C_p \boldsymbol{u}.\,\nabla T + \nabla.\,\boldsymbol{q} = 0 \tag{13}$$

$$\boldsymbol{q} = -\mathbf{k}\nabla \mathbf{T} \tag{14}$$

Dónde:

ρ: densidad

k: conductividad térmica

C_p: calor específico

T: temperatura

Para la conducción de calor en el dominio del sólido, que corresponde a la estructura metálica del cobre y la parafina sólida

$$\rho C_{p} \mathbf{u}. \nabla T + \nabla. \mathbf{q} = \mathbf{Q} + \mathbf{Q}_{ted}$$
(15)
$$\mathbf{q} = -\mathbf{k} \nabla T$$

Q: calor

Se establece flujo de calor por convección en las superficies de la estructura

$$-\mathbf{n}.\,\mathbf{q}=\mathbf{q}_0\tag{16}$$

$$q_0 = h(T_{ext} - T) \tag{17}$$

h: coeficiente de convección

Text: temperatura exterior

Se considera la radiación difusa de las superficies exteriores del módulo:

$$-n.q = \varepsilon(G - e_b(T))$$
(18)

$$(1 - \varepsilon)G = J - \varepsilon e_b(T)$$
⁽¹⁹⁾

$$G = G_m(J) + G_{amb} + G_{ext}$$
(20)

$$G_{amb} = F_{amb} e_b(T_{amb}) \tag{21}$$

$$G_{ext} = G_{extDir} + G_{extDiff}$$
(22)

$$e_b(T) = n^2 \sigma T^4 \tag{23}$$

 σ : Constante de Stefan-Boltzmann

ε: emisividad del cuerpo

a: coeficiente de absorción

Famb: Factor de forma

- G: radiación incidente
- J: Radiación emergente

e_b: radiación propia

Se considera el cambio de fase de la parafina, a una temperatura menor a la temperatura de fusión la parafina está en estado sólido

$$\rho C_{\rho} \boldsymbol{u}. \nabla T + \nabla. \boldsymbol{q} = \boldsymbol{Q} + \boldsymbol{Q}_{p} + \boldsymbol{Q}_{vd}$$
⁽²⁴⁾

$$q = -k\nabla T$$

$$\rho = \theta \rho_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2} \tag{25}$$

$$C_{\rho} = \frac{1}{\rho} (\theta \rho_{phase1} C_{phase1} + (1 - \theta) \rho_{phase2} C_{phase2}) + L \frac{\partial \alpha_m}{\partial T}$$
(26)

$$k = \theta k_{phase1} + (1 - \theta) k_{phase2}$$
⁽²⁷⁾

$$\alpha_m = \frac{\frac{1}{2} \frac{(1-\theta)\rho_{phase2} - \theta\rho_{phase1}}{2 \theta\rho_{phase1} + (1-\theta)\rho_{phase2}}$$
(28)

θ : factor

L: calor latente de fusión

Los valores iniciales establecidos son:

- Temperatura inicial de la placa base del módulo PCM 100° C
- Coeficiente de convección sobre las superficies del módulo 5.7 W/°C que corresponde cuando el aire está quieto.
- Temperatura ambiente 20° C

4.3.1.8 Despliegue de estudio. Se parametriza la variación de:

- El espesor del módulo

- La longitud de las aletas internas y externas
- La variación temporal de la temperatura

4.3.1.9 Selección de mallado. Se selecciona el mallado normal que por defecto establece

COMSOL, como muestra la Figura 44.

Figura 44

Mallado normal del módulo PCM.



4.3.1.10 Despliegue de resultados. Los resultados de la simulación se muestran gráficamente, estos resultados corresponden a la:

- Determinación del espesor del módulo
- Determinación de la longitud de la aleta interna del módulo
- Determinación de la longitud de aletas externas del módulo PCM
- Módulo de PCM con dos aletas externas

4.3.2 Espesor del módulo

Se considera inicialmente como espesor del módulo 10 mm y la longitud de la aleta interna 5 mm, gradualmente se va cambiando el espesor del módulo en valores de 20 mm, 30 mm hasta 60 mm y correspondientemente cambia la longitud de la aleta, de manera que en todo este proceso se mantiene constante la separación entre la aleta y la base en 5 mm. Para una temperatura de 100° C (373° K) de la placa base, se simula la variación de la temperatura en la cara superior en relación al espesor del módulo.

La Figura 45 y 46 muestran la variación de temperatura en el interior y en la superficie exterior del módulo, de acuerdo a la figura 45, la temperatura de la superficie a medida que va aumentando el espesor del módulo tiende a diferenciarse de la placa caliente de la base. Por ejemplo, para 10 mm la temperatura de la superficie es más homogénea lo que implica hay mayor conductividad térmica de la placa caliente al exterior. Con el aumento del espesor del material de cambio de fase, hay una mayor diferencia de la temperatura entre la superficie exterior con la base del módulo, lo que indica que la velocidad de transmisión de calor a través del material de cambio de fase en lenta.

La Figura 46 muestra la variación de la temperatura en corte vertical en la parte central del módulo, se encuentra que la temperatura está más estratificada a medida que aumenta el espesor del módulo, con el que también aumenta el espesor de la parafina; dicha estratificación es debido a la baja conductividad térmica del material de cambio de fase (parafina), observándose una mayor diferencia de temperatura entre la parte superior e inferior del módulo, nuevamente relacionándose con la baja rapidez de conducción del calor.

Variación de la temperatura en el módulo PCM con aletas internas en relación al espesor del



módulo de 10 mm a 60 mm.

Distribución de temperatura en un corte vertical para diferentes espesores del Módulo PCM de

10 mm a 60 mm.



La Figura 47 muestra la variación de la temperatura en la superficie exterior central del módulo con PCM, se observa que la temperatura de la superficie está en el orden de 90 °C y 95 °C, con una diferencia de temperatura entre el centro y los extremos de 5 °C para un espesor de 30 mm. En tanto para el espesor de 60 mm la temperatura de la superficie varía entre 87,5 °C y 91,0 °C, con una diferencia de 3,5 °C.

Distribución de temperatura en la línea de corte central sobre la superficie superior del Módulo PCM, en relación al espesor del módulo de 10 mm a 60 mm.



La Figura 48 corresponde a la variación de la temperatura a lo largo de la aleta interna central en corte vertical, muestra que la temperatura en la parte inferior disminuye lentamente hacia el extremo superior de la aleta interna, debido a que siendo de un material de cobre su conductividad térmica es mayor. Si el espesor del módulo corresponde a 30 mm, la temperatura de la aleta central interna cambia de 90,5 °C a 89,7 °C aproximadamente, y para 60 mm varía entre 87,5 °C y 90,5 °C.

Distribución de temperatura en la línea de corte central sobre la aleta interna del Módulo PCM en relación al espesor del módulo de 0 mm a 60 mm.



De acuerdo a los resultados anteriores, se ha determinado como espesor óptimo del módulo PCM de parafina 30 mm, dado que, en la condición estacionaria, se encuentra una baja estratificación de la temperatura en la parafina encapsulada en el módulo y a su vez, se encuentra una mayor temperatura en la superficie exterior y aletas, lo que indica una mayor rapidez de transferencia de calor. Se ha considerado, además, que, si bien espesores menores a 30 mm mejoran la conductividad, sin embargo, presenta mayor dificultad de construirla, con la consecuente disminución de la masa de parafina y con ella, la capacidad de almacenamiento térmico.

La Figura 49 muestra la radiosidad de la superficie superior del módulo, la energía por unidad de tiempo que está siendo irradiada de las superficies del módulo. A medida que aumenta el espesor del módulo va disminuyendo su radiosidad, lo que también establece la baja transferencia térmica del interior al exterior.

Figura 49

Variación de la Radiosidad de la superficie con el espesor del módulo de 10 mm a 60 mm.



4.3.3 Determinación de la longitud de la aleta interna del módulo

Tomando el resultado anterior, que nos permitió asumir como espesor del módulo PCM 30 mm, se ha simulado la variación de la temperatura en relación a la longitud de las aletas internas adosadas a la cara superior del módulo, aletas que han ido variando de 5 mm a 25 mm con una razón de 5 mm.

La Figura 50, 51 y 52 muestran la variación de la temperatura en la superficie del módulo en razón a la variación de la longitud de la aleta interna; se establece que a medida que aumenta el tamaño de la aleta, la temperatura de la superficie es mayor, evidentemente porque facilita la conducción térmica a través de la aleta de cobre hacia el exterior. Ello también permite la menor estratificación de la temperatura del material de cambio de fase, consecuentemente, habría una menor estratificación de estados de agregación sólido líquido del material de cambio de fase y que permanezca por mayor tiempo en estado líquido dificultando el proceso de trasferencia de calor hacia la cara superior.

Figura 50

Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta interna del Módulo PCM de 5 mm a 25 mm.



Distribución de temperatura en un corte vertical para diferentes longitudes de la aleta interna de

Figura 52

Variación de la temperatura sobre la superficie horizontal del módulo PCM en relación a la longitud de la aleta interna de 5 mm a 25 mm.



5 mm a 25 mm.

La radiosidad de la superficie exterior es mayor cuando el módulo dispone de aletas internas de mayor longitud, como 25 mm (Figura 53).

Figura 53

Radiosidad para diferentes longitudes de la aleta de 5, 10, 15, 20 y 25mm.



La Figura 54, muestra la variación de la temperatura a lo largo de la longitud de la aleta interna central adosada a la cara superior del módulo tomada para la simulación. Por ejemplo, para la aleta interna de 25 mm de longitud la temperatura está en el orden de 90 °C, para una longitud de la aleta de 10mm la temperatura corresponde 87 °C y una longitud de 5mm está en el orden de 86 °C.

Variación de la temperatura en la aleta interna central para diferentes longitudes de la aleta.



La Figura 55, establece claramente que la temperatura de la superficie es mayor cuanto mayor sea la longitud de la aleta interna, para 25 mm la temperatura en la superficie varía entre 363 K y 368 K (90 °C y 92 °C), para 15 mm la temperatura en la superficie varía entre 361 K y 368 K (88 °C y 92 °C), para 5 mm la temperatura en la superficie varía entre 359 K y 368 K (86 °C y 92 °C), valores simulados en condiciones estacionarias. Estos resultados permiten determinar como la longitud adecuada de la aleta interna 25 mm., dado que presenta una mejor diferencia de temperatura, lo que muestra mejor transferencia de calor.

La Figura 56 muestra la variación en el tiempo de la temperatura sobre la superficie superior del módulo, puede considerarse que a partir de 500 s a 600 s se estabiliza la transferencia de calor.

Variación estacionaria de la temperatura sobre la superficie superior del Módulo PCM para diferentes longitudes de la aleta interna.



Figura 56

Variación temporal de la temperatura sobre la superficie superior del Módulo PCM para 25 mm

de altura de la aleta interna.



4.3.4 Determinación de la longitud de aletas externas del módulo PCM.

Considerando como acumulador de cambio de fase, el módulo de estructura de cobre de 20 cm x30 cmx3 cm y aletas internas de 25 mm lleno de parafina, se ha simulado la variación de temperatura cuando el módulo incorpora aletas externas que varían de 10 mm a 35 mm a razón de 5 mm (Figura 57).

Figura 57

Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.



Las aletas externas permiten aumentar la rapidez de transferencia de calor entre el módulo PCM y el aire circundante, lo que se muestra en la Figura 57, a medida que aumenta la longitud de la aleta disminuye la temperatura de la superficie superior dado que va aumentando el área efectiva de convección. El área de la superficie superior del módulo es 600 cm², para la aleta de 1 cm de longitud se aporta un área adicional de 280 cm² en todas las aletas (7 aletas espaciadas simétricamente), para 1,5 cm 420 cm², así para 2,5 cm el área efectiva de convección es de 700 cm² con la que incrementa el área de transferencia en 1,2 veces más, para 3 cm incrementa en 1,4 y con 3,5 cm, 1,8 veces más.

Figura 58

Distribución de la radiosidad en relación a la variación de a longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.



Figura 59

Planos isométricos del Módulo PCM con 25 mm de aleta externa.



La Figura 58 muestra la distribución de la radiosidad de la superficie exterior del módulo en relación a la variación de a longitud de la aleta externa de 10 mm a 35 mm. La radiosidad disminuye cuando va incrementándose la longitud de las aletas, dado que aumenta el área de radiación y se enfría más rápidamente. La Figura 59 muestra planos isométricos del Módulo.

En la Figura 60, se observa la distribución de temperatura en un corte transversal vertical del módulo, cuando se va incrementando la longitud de la aleta externa de 10 mm a 35 mm a razón de 5 mm; mostrándose el nivel de estratificación de la temperatura en el material de cambio de fase, de manera que cuando aumenta la longitud de la aleta externa, disminuye la temperatura en la aleta. Por ejemplo, para 25 mm, de 87, 5 °C a 86 °C; para 35 mm de 86 °C a 84 °C (Figura 61). Hecho que determina que la temperatura en la superficie superior del módulo sea menor con el aumento de la longitud de la aleta externa, por ejemplo, para 25 mm 85 °C (Figura 61).

Figura 60

Distribución de temperatura en relación a la variación de a longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.



Distribución de temperatura en la aleta en relación a la variación de la longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.



Como consecuencia, dado que hay una diferencia de sólo 1, 5 °C en la temperatura del centro del módulo para una longitud de la aleta externa de 25 mm y para 35 mm (Figura 62) y tomando en cuenta además la cantidad del material de cobre que tendría que utilizarse con el consiguiente aumento de la masa del módulo, se considera como espesor de las aletas externas la longitud de 25 mm.

Distribución de temperatura en la superficie del módulo en relación a la variación de la longitud de la aleta externa del Módulo PCM de 10 mm a 35 mm.



4.3.5 Módulo de PCM con dos aletas externas

Sobre la base de los resultados y decisiones tomadas anteriormente, correspondiente a espesor del módulo y el tamaño de las aletas internas adosadas a la pared superior del módulo, se ha diseñado finalmente un módulo con material de cambio de fase de parafina de placas compactas rectangulares de dimensiones 30 cmx20 cmx3 cm, con aletas internas y aletas externas en los extremos del módulo, de longitud 25 mm, y espaciadas simétricamente sobre las bases a 3,7 cm uno de otro.



Distribución de temperatura en módulo PCM de dos aletas exteriores.

El módulo con aletas externas en la base superior e inferior, se simula su comportamiento térmico mediante Comsol Multyphisics, para condiciones estacionarias de flujo y considerando la base inferior del módulo a una temperatura de 100 °C.

La Figura 64 muestra la distribución de temperatura en corte horizontal de superficies paralelas a la base del módulo, sobre las que se toma una línea de corte paralela al ancho del módulo de 30 cm y ubicada en la parte central de la superficie; por ejemplo, se muestra que a 10 mm de la base la línea corta a las aletas internas y es en la aleta que la temperatura disminuye en 7 °C respecto a la temperatura del material PCM. Para 30 cm de la base, la temperatura mínima es de 359 K en el centro del módulo y una temperatura máxima de 366 K a los extremos donde se encuentra las aletas externas de los extremos.

Distribución de temperatura en líneas de corte horizontales paralelas al ancho del módulo con dos aletas exteriores.



La Figura 65 muestra la variación de la temperatura en cortes verticales desde un extremo del módulo. El primer corte corresponde a la variación de la temperatura en una aleta desde el parte baja de la aleta externa inferior (0 mm) hasta extremo superior de la aleta externa superior (80 mm). Para el caso del segundo corte a 30 mm del extremo, no hay una aleta, de manera que la variación de la temperatura corresponde al espesor de la parafina de 30 mm; por lo que la temperatura de 373 K corresponde a la posición de 25 mm y la temperatura de 361 K a la posición de 55 mm que corresponde a la base superior del módulo. El corte a 150 mm del extremo, se interseca con una aleta de manera que la temperatura en ella varía de 373 K a 359 K. La Figura 66 muestra la distribución de temperaturas sobre la superficie del módulo, los isosuperficies térmicos.

Distribución de temperatura en líneas de corte verticales de 0 mm a 270 mm del extremo de una aleta del módulo PCM con dos aletas exteriores.



Figura 66

Isosuperficies térmicos en el módulo PCM de dos aletas exteriores.



4.4 Construcción del módulo PCM (parafina)

Se construye dos tipos de módulos sobre la base de estructura de cobre y lleno de parafina comercial de Ayacucho. El primer tipo de módulo sólo dispone de aletas internas y está orientado su uso para cocinas solares ubicada en la cámara de cocción cerrada. El segundo tipo además de aletas internas, dispone de aletas externas en los extremos del módulo orientado para su uso en secadores solares expuesto a un flujo de aire en el colector del secador. La tabla 32 muestra las dimensiones finales del módulo.

Tabla 32

Dimensiones del módulo PCM con aletas externas.

Largo	1	0,20	m
Espesor	e	0,03	m
Ancho	a	0,30	m
Masa de la estructura	m	2,10	kg
Volumen externo	Vexterno	0,0018	m ³
Volumen interno	Vinterno	0,0015	m ³
Volumen de cera	Vcera (20% Vinterno)	0,0012	m ³
Masa de cera	m _{cera}	1,0	kg
Aleta	Área	0,005	m ²

El primer tipo de módulo que sólo tiene aletas internas, tiene una masa de la estructura de 1,7 kg y una masa total con parafina de 2,7 kg. Las 9 aletas incrementan el área de transferencia por convección y radiación en un 60%.

La Figura 67, 68 y 69 muestran los módulos construidos y pintados de negro mate. El material base de los módulos es cobre.

Figura 67

Módulo con PCM con sólo aletas internas de 30 cmx20 cmx3 cm de estructura de cobre y luego pintado con negro mate.



Figura 68

Módulo con PCM de 30 cmx20 cmx3 cm con aletas externas en los extremos del módulo con estructura de cobre y luego pintado en negro mate.





Unidades de los módulos PCM sin y con aletas externas pintadas en negro mate.

Para determinar el potencial de acumulación térmica del módulo desarrollado, se toma en cuenta: primero, la variación de temperatura desde la temperatura ambiente hasta la fusión completa de la parafina y en segundo lugar cuando la temperatura varía de la temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición del agua en Ayacucho. En ambos casos se compara y determina la masa y volumen de agua equivalente que acumule la misma cantidad de energía que el módulo. En este análisis, que se muestra en la Tabla 33, se determina la mayor influencia de calor latente de la parafina en la acumulación de energía térmica del módulo. De manera que para 1 kg de parafina la energía térmica acumulada corresponde a 222,35 kJ cuando se calienta de 22 °C a 60 °C con la fusión completa de la parafina.

La Tabla 34 muestra que se requiere 1,4 kg de masa de agua equivalente que acumule por calor sensible la energía de 222,35 kJ, en el mismo rango de temperatura de la cera, lo que corresponde a una masa 40% más de la masa de la parafina, siendo esta una ventaja de la parafina respecto a la acumulación térmica en agua. En lo referente al volumen, el agua ocupa 1400 cm³ y la parafina líquida 1299 cm³.

Tabla 33

Energía acumulada en cada unidad PCM.

Temperatura inicial	T_i	22	°C
Temperatura de fusión de la cera	$T_{fu} \\$	53	°C
Temperatura final	T_{f}	60	°C
masa de cera	m	1	kg
Calor latente de fusión de la cera	$L_{\rm f}$	123,506	kJ/kg
Calor específico cera sólido	C _{ps}	2,66	kJ/kgºC
Calor específico cera líquida	C_{pl}	2,34	kJ/kgºC
Energía acumulada	Q	222,346	kJ

Tabla 34

Energía acumulada en masa de agua.

Energía acumulada	Q	222,346	kJ
Calor específico agua liquida	C_{pa}	4,186	kJ/kg°C
Masa de agua	m	1,40	kg
Diferencia respecto a la parafina	Δm	0,40	kg

Sin embargo, si se realiza el mismo procedimiento de cálculo de la energía térmica almacenada en la parafina comercial para una temperatura ambiente hasta la temperatura de ebullición del agua en Ayacucho 91 °C, encontramos (Tabla 35-36) que no hay ventaja en la acumulación térmica en la parafina que, en el agua, la masa equivalente para 1 kg de parafina resulta ser 1,02 kg de agua.

Tabla 35

Energía acumulada en cada unidad de PCM (91° C).

	-		
Temperatura inicial	T_i	22	°C
Temperatura de fusión de la cera	T_{fu}	53	°C
Temperatura final	T_{f}	91	°C
Masa de cera	m	1	kg
Calor latente de fusión de la cera	L_{f}	123,506	kJ/kg
Calor específico cera sólido	C _{ps}	2,66	kJ/kg °C
Calor específico cera líquida	C_{pl}	2,34	kJ/kg °C
Energía acumulada	Q	294,886	kJ

Tabla 36

Energía acumulada en masa de agua.

Energía acumulada	Q	294,886	kJ
Calor específico agua liquida	C _{pa}	4,186	kJ/kg °C
Masa de agua	m	1,02	kg
Diferencia	Δm	0,02	kg

4.5 Evaluación térmica de los módulos de PCM

4.5.1 Ubicación geográfica los ensayos

La cuidad de Ayacucho, Provincia de Huamanga, Departamento de Ayacucho, se encuentra

a 2 746 m.s.n.m., latitud 13° 09'26" sur y longitud 74° 13'22" oeste (INEI, 2017).

Las características principales del clima de Ayacucho son:

- La radiación solar es intensa durante todo el año, a causa de la altura, tiene poco contenido de vapor de agua.
- El número de horas sol es relativamente elevado 66%.
- Existe una probabilidad de tener una secuencia de algunos días desfavorables apreciablemente,
 dichos días no son tan pobres en radiación.
- Generalmente la velocidad del viento no alcanza valores elevados.

El promedio de las temperaturas máximas diarias no varía mucho a lo largo del año, pero el promedio de las mínimas varía en forma más apreciable, debido a que en el invierno las heladas pueden ser muy fuertes.

4.5.2 Comportamiento térmico del módulo PCM en la cocina solar tipo caja

Se utilizan dos cocinas solares tipo caja aislada con fibra de vidrio, las cocinas o también llamados hornos solares tipo Nadwani que se presentan en la Figura 70, disponen además de placas reflectoras planas y doble cubierta de vidrio. Las dimensiones, la estructura geométrica y el comportamiento térmico de las cocinas son equivalentes.

Figura 70

Cocinas solares tipo caja equivalentes (tipo 1 y 2), con reflector plano.



La Figura 71 muestra el comportamiento térmico de calentamiento y enfriamiento equivalente de las cocinas 1 y 2 cuando no utilizan el módulo con PCM, la temperatura de estancamiento en la placa colectora de la cocina tipo 1 es de 129° C y en la cocina tipo 2 de 126° C, para una intensidad de radiación solar promedio sobre la superficie horizontal de 551 W/m², altura solar alrededor del medio día de 58°. En base al protocolo de evaluación de la Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos (RICSA-CYTED) se obtuvo el primer factor de mérito de las cocinas que caracterizan la relación entre la eficiencia óptica de la cocina y las pérdidas de calor al exterior desde la placa (Esteves y Román, 2003) obteniéndose los factores de mérito F1 de 0,125 \pm 0,001 m² °CW⁻¹ en la cocina tipo 1 y de 0,121 \pm 0,001 m² °CW⁻¹ en la cocina tipo 2 a temperatura ambiente de 23° C, lo que indica que las cocinas son térmicamente equivalentes.

Figura 71

Calentamiento de las cocinas solares 1 y 2 sin PCM, temperatura de estancamiento y enfriamiento.



Previamente se evalúa la temperatura que alcanza la parafina al interior del módulo PCM. La Figura 72 nos indica el orden de temperatura que puede alcanzar el material de cambio de fase (parafina) ubicada dentro del colector de la cocina solar para una intensidad de radiación solar media de 12 h a 14 h de 652 W/m². Se puede observar que para temperaturas próximas a 60 °C se da el proceso de cambio de estado de la parafina, para luego incrementar la temperatura en estado líquido hasta 120 °C, cuando cesa el suministro de energía solar decae hasta alcanzar la temperatura de 50 °C luego de 5 horas de enfriamiento.

Figura 72

Temperatura de calentamiento del material de cambio de fase (parafina) al interior de módulo colocada sobre la placa colectora de la cocina solar (22/02/19).



Para caracterizar el comportamiento térmico del módulo con PCM en el interior de la cocina solar tipo caja, se instalan dos módulos sobre la placa colectora de la cocina tipo 1, en tanto que la cocina tipo 2 se encuentra libre (Figura 73). En dichas condiciones se somete a la intensidad

de radiación solar tomando en cuenta el PROTOCOLO DE EVALUACION DE COCINAS SOLARES (Red Iberoamericana de Cocción Solar de Alimentos Programa CYTED: RICSA-CYTED), para determinar los factores de mérito F₁ y F₂.

Figura 73

Instalación de los módulos con PCM en el interior de la cocina solar tipo 1



4.5.2.1 Medición de la temperatura máxima sin carga y obtención de primer factor de mérito. El primer factor de mérito establece la relación entre la eficiencia óptica de la cocina y las pérdidas de calor al exterior desde la placa. El día anterior se determina la posición óptima del reflector para las 12 horas solar, para lo cual se mide el Área de la superficie proyectada sobre el plano horizontal (A_{ph}).

Cuando se establece el equilibrio térmico, el calor útil es cero (Esteves y Román, 2003).

$$\eta_o A_{ph} I_h = A_p U_L (T_p - T_a) \tag{29}$$

$$F = \frac{\gamma_o}{U_L} = \frac{A_p(T_p - T_a)}{A_{ph}I_h}$$
(30)
Dónde:

 η_o : eficiencia óptica

U_L: coeficiente de pérdidas (W/m²°C)

A_p: Área de la placa absorbente

A_{ph}: Área de la superficie proyectada sobre el plano horizontal

Ih: Radiación solar global sobre la superficie horizontal (W/m²)

T_p: Temperatura de placa

T_a: Temperatura ambiente

Figura 74

Comparación de la temperatura en la cocina solar con (cocina 1) y sin el módulo de PCM (cocina 2). 04/04/19.



Temperatura del aire en el interior de la cocina solar con (cocina 1) y sin módulo PCM (Cocina



2). 04/04/19.

Con los datos de la Figura 74 se determina el primer factor de mérito de las cocinas sin reorientación al sol.

La Tabla 37 muestra que el primer factor de mérito de la cocina que utiliza el módulo PCM resulta $0,110 \pm 0,001 \ m^2 C/W$ que es menor que de la cocina sin módulo PCM $0,116 \pm 0,001 \ m^2 C/W$, para una intensidad de radiación solar media de 548 W/m² Este resultado es debe a que la cocina con módulo PCM utiliza la energía no sólo para calentar la placa sino también para acumular en la parafina.

Tabla 37

Primer Factor de mérito (04/04/19).

Cocina	РСМ	Libre
$A_{ph}(m^2)$	0,542	0,542
$A_p(m^2)$	0,352	0,352
T _p (° C)	118	123,0
$T_a (^{o}C)$	25,0	25,0
$I_h \left(W/m^2 \right)$	548	548
$F1 (m^2 {}^{o}CW^{-1})$	0,110	0,116
Error	0,001	0,001

Por otro lado, cuando se cierra las cocinas, la Figura 75 muestra que la temperatura del aire al interior de la cocina con módulo PCM es mayor respecto al que no utiliza el módulo; también se encuentra que la rapidez de disminución de la temperatura de aire interna de la cocina con módulo PCM es menor que la cocina libre, manteniendo la cámara de cocción más caliente con una temperatura mayor en el orden de 15 °C, durante unas tres horas más que la cocina que no usa el módulo.

4.5.2.2 Segundo factor de mérito F2. Tiene en cuenta la eficiencia de la transferencia de calor hacia el recipiente (Esteves y Román, 2003).

Tomado en cuenta el balance de calor sobre el sistema indica que:

El calor útil en el colector (Qu) = Calor absorbido por el colector (Qc) – Pérdidas desde el colector (Qp).

$$Q_u = Q_c - Q_p \tag{31}$$

Dónde:

$$Q_u = (Mc)'_w \frac{dTw}{dc}$$
(32)

$$(Mc)'_{w}\frac{dTw}{dc} = \eta_{o}A_{ph}I_{h} - A_{p}U_{L}(T_{w} - T_{a})$$
(33)

F2 se puede calcular midiendo el tiempo en alcanzar un intervalo de temperatura, en este caso de 40° C a 80° C.

Por tanto:

$$dr = (Mc)'_{w} dT_{w} / F'A_{ph} [\eta_{oh} - \frac{A_{p}}{A_{ph}} U_{L} (T_{w} - T_{a})]$$
(34)

pero $F1 = \eta_0/U_L$

luego, integrando entre T_{w1} y T_{w2}

$$r = \left[-F_1(Mc)'_w/F'A_{ph\ o}\right] \ln \left[-\frac{(A_p)}{A_{ph\ F_1}} - \frac{T_1}{a} \right] / \left[-\frac{(A_p)}{A_{ph\ F_1}} - \frac{T_1}{a} \right] \right]$$
(35)

se define Cr = (Mc)w/(Mc)'w

de modo que

$$F_{2} = E \eta_{o} Cr = \frac{F_{1}(Mc)'_{w}}{cA_{ph}} \ln \frac{I_{h} - (\frac{A_{p}}{A_{ph}F_{1}})(T_{w2} - T_{a})}{I_{h} - (\frac{A_{p}}{A_{ph}F_{1}})(T_{w1} - T_{a})}$$
(36)

Dónde:

 η_0 : eficiencia óptica

U_L: coeficiente de pérdidas (W/m²°C)

A_p: Área de la placa absorbente

A_{ph}: Área de la superficie proyectada sobre el plano horizontal

- Ih: Radiación solar global sobre la superficie horizontal (W/m²)
- T_{w1}: Temperatura del agua (~40° C)
- T_{w2}: Temperatura del agua (~80° C)

T_a: Temperatura ambiente

(Mc)_w: Capacidad calorífica del agua y olla

 τ : Tiempo que alcanza la temperatura de 40 a 80° C.

En cada cocina se colocó 3 litros de agua en ollas de aluminio de 0,5 kg de masa cada uno, se colocaron los sensores de temperatura (termocuplas tipo K) a 3 cm de la superficie libre del agua.

La Figura 76 muestra la variación de temperatura del agua en las cocinas, con las se calcula el F2 que aparece en la Tabla 38. El uso del módulo con PCM en la cocina solar disminuye su factor de mérito F2, lo que significa que disminuye la eficiencia de transferencia de calor al recipiente de cocción, dado que la energía térmica está siendo utilizada en el calentamiento de la parafina.

Figura 76

Calentamiento y enfriamiento de 3 litros de agua en las cocinas solares de tipo 1 (con módulo PCM) y 2 (sin módulo PCM). 09/04/19.



De la Figura 76, se observa también, que el tiempo que el agua incrementa su temperatura de 40 a 80 °C es 158 minutos para la cocina con módulo PCM y 129 minutos para la cocina libre. **Tabla 38**

Segundo factor de mérito de las cocinas solares con y sin módulo PCM (09/04/19).

	РСМ	Libre
F1	0,110	0,116
(MC)w (J/°C)	13012	13012
t(s)	9480	7740
T_{w1} (°C)	40,2	40,1
T_{w2} (°C)	80,1	80,2
T_a (°C)	25,6	24,6
$A_{p}\left(m^{2} ight)$	0,352	0,352
$A_{ph}\left(m^{2} ight)$	0,542	0,542
$I_h (W/m^2)$	617,3	638,3
F2	0,251	0,290

De la Figura 77 se encuentra que la rapidez de enfriamiento del agua en la cocina con PCM es más lento que cuando no se usa PCM.

Se ha experimentado, el intercambio térmico entre la cocina calentado hasta su punto de estancamiento y 2,5 L de agua a temperatura ambiente. La temperatura de estancamiento fue de 110° C en la cocina con módulo PCM y 105 °C para la cocina libre para una radiación media de 592 W/m², en esas condiciones se cierra la cocina y se coloca en cada una de las cocinas una olla semejante conteniendo 2,5 L de agua. La Figura 78 muestra que el agua en la cocina con PCM logra calentarse hasta 50 °C y se mantiene hasta 40 °C por tiempo de 3 h (desde las 14:24 h hasta 19: 12h), en tanto que en la cocina sin PCM el agua se calienta hasta 37 °C y en 3 h decae hasta 30 °C.



Rapidez de enfriamiento de 3 litros de agua en las cocinas solares de tipo 1 y 2. 09/04/19.

Figura 78

Intercambio térmico entre la cocina caliente y agua a temperatura ambiente. 21/05/19.



4.5.3 Comportamiento térmico del módulo PCM en un secador solar tipo cabina

El secador solar utilizado es de tipo cabina, pasivo e indirecto, que aparece en la Figura 79, pasivo porque realiza el proceso de secado debido al flujo de aire por efecto de la gradiente de temperatura, indirecto por que los productos a secar no están expuestos a la radiación directa.

Está compuesto de:

- Un colector solar plano que incorpora una placa metálica negra. Tiene la cubierta de vidrio.
- Una cabina para secado indirecto de productos como plantas aromáticas, papa, etc. a escala familiar. En ella se disponen las bandejas en niveles para optimizar el secado con el flujo de aire que ingresa por la base de la cabina.
- Tiro. Para la salida del aire húmedo, por gradiente de temperatura y el efecto Venturi.
 Para un mejor secado se debe tomar en cuenta que el aire caliente esté a una temperatura
 de 40 a 70 °C, el aire debe tener bajo contenido de humedad y debe estar en constante movimiento

(UNESCO, 2005).

Figura 79

Secador solar pasivo e indirecto para uso a escala familiar.



Se instalan dos módulos PCM con aletas externas sobre la placa colectora del secador próximo a la entrada de la cámara de secado, luego se expone a la radiación solar que calienta las placas. Se debe tomar en cuenta que el propósito del presente trabajo es extender el periodo de secado cuando se interrumpe la incidencia de la radiación solar.

Se colocan los sensores uno a la entrada del colector, sobre las placas y otro a la entrada de la cámara de secado. La Figura 80 y 81 muestra que la temperatura que ingresa a la cámara de secado alcanza valores hasta 60 °C por un intervalo de tiempo de 1,5 h. La temperatura del aire a la entrada de la cámara de secado mantiene una temperatura mayor de 40° C desde la 10,24 a.m. a 4,45 p.m., durante el intervalo de 6,5 h y para una intensidad de radiación media de 745 W/m². La temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se muestra estable, no obstante que varía la radiación solar, la temperatura de la placa y la temperatura del aire que ingresa al colector, lo que permitirá optimizar el proceso de secado. Cuando cesa la incidencia de la radiación solar, que se logra cubriendo el colector con una superficie opaca a partir de las 3.30 pm, se encuentra que la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se mantuvo entre 40 °C a 30 °C durante 2,5 h adicionales, y hasta 25 °C durante 1 h más y se mantiene con una temperatura superior en 5 °C a la temperatura ambiente por más 1,5 h adicional.

La Figura 82 muestra el comportamiento térmico del secador solar cuando no tiene instalado el módulo PCM. La Figura 83 muestra que la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se mantiene superior a los 40 °C por un periodo de más 5 h. Cuando se interrumpe la incidencia de los rayos solares a partir de la 4.00 pm, cubriendo la superficie del colector con un material opaco, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado decae rápidamente.

Temperatura del secador solar que utiliza dos módulos PCM. Radiación solar media 745 W/m².



(26/05/19).

Figura 81

Temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado en el secador solar que utiliza como

acumulador térmico dos módulos PCM. (26/05/19).



Temperatura del secador solar que no utiliza el módulo PCM. Para una radiación media en las horas de calentamiento de 757 W/m². (25/05/19).



Figura 83

Temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado en el secador solar que no utiliza el



módulo PCM. (25/05/19).

La Tabla 39 muestra la comparación de la temperatura del aire en la cámara de secado en el secador solar, cuando se usa las dos unidades del módulo PCM y cuando no se utiliza el módulo, se destaca que el efecto del módulo con material de cambio de fase de parafina es favorable para el secado, dado que la temperatura media es de 54,46 °C mayor en el orden de 9,38 °C, por un espacio mayor de tiempo.

Tabla 39

Datos de la temperatura en el secador cuando permanece la temperatura del aire de la cámara de secado mayor a 40 °C.

	Temperatura me	dia	Tiempo (>40°C)	Total, de horas	Radiación (W/m ²)
Secador	Aire entrada al colector del secador (°C)	Ambiente (°C)	(hr)	de sol	
Con módulo PCM	54,46	27,6	6,5	6,0	745
Sin módulo	45,08	26,2	5,5	6,0	757

De la Figura 84 se observa que cuando cesa la radiación solar sobre el secador que utiliza el módulo PCM, la temperatura que ingresa a la cámara de secado mantiene un valor de temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado de 47 °C a 30 °C por un periodo aproximado de 2 h; además se encuentra que la temperatura del aire que ingresa a la cámara se mantiene superior entre 40 °C a 25 °C por un intervalo de 3 h, logrando una diferencia de 8 °C superior a la temperatura ambiente. En el caso que el secador funciona sin el módulo PCM, la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado se mantiene entre 42 °C a 30 °C por un intervalo de 1 h, viendo que decae más rápidamente.

Comparación de la temperatura que ingresa a la cámara de secado en el secador solar cuando



cesa la radiación solar.

4.5.3.1 Eficiencia Térmica del Colector Solar con y sin módulo PCM. Para determinar la curva de eficiencia de los colectores solares de aire del secador solar pasivo tipo cabina, se siguió el procedimiento normado propuesto por la ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers) que hace referencia Olivares y Torres (2010), la eficiencia del colector solar se define según la ecuación:

$$\eta = \frac{Qu}{IA} \tag{37}$$

 η : Eficiencia del colector

Qu: Cantidad de energía transferida al fluido (aire)

- I: Intensidad de radiación solar (W/m²)
- A: área solar (m²)

La cantidad de energía que es transferido al aire será:

$$Q_u = m C_a (T_{as} - T_{ae}) \tag{38}$$

Dónde:

m: Flujo másico de aire que circula por el colector

C_a: Calor específico del aire

T_{as}: Temperatura de salida del aire del colector

T_{ae} : Temperatura de entrada del aire al colector

La curva de la eficiencia instantánea del colector, caracteriza el comportamiento de la eficiencia del colector con respecto a los valores de la radiación solar y las temperaturas de ingreso del aire al colector y la temperatura ambiente, de manera que se generara el siguiente término para cada momento de medición:

$$\frac{T_{ae} - T_{amb}}{IA} \tag{39}$$

Término utilizado para poder generar la gráfica

Dónde:

T_{ae}= Temperatura de entrada del aire al colector (°C)

 T_{amb} = Temperatura ambiente (°C)

I: Intensidad de radiación solar (W/m²)

De acuerdo a la Figura 81 y 83, se determina el calor útil instantánea que almacena el aire a partir de las 10.00 am a 03.00 pm, en intervalos de 15 minutos. El flujo másico de aire se ha medido considerado el caso estacionario, cuyo valor está en el orden de 0,0010 kg/s. El calor específico del aire se considera constante e igual a 1009 J/ kg^oC, el área del colector solar es de 0,66 m².



Eficiencia instantánea de colector solar con módulo PCM (dos unidades) (26/05/19).

Figura 86

Eficiencia instantánea de colector solar sin módulo PCM (25/05/19).



La curva de eficiencia del colector solar cuando funciona con el módulo PCM y cuando no se utilizan (Figura 86 y 88), son respectivamente

 $\eta = -703.8 \ (Tae-Tamb) + 57.2$ para una radiación media de 745 W/m²

 $\eta = -1608.4 \frac{(Tae-Tamb)}{l} + 39.4$ para una radiación media de 757 W/m²

Se puede observar que la eficiencia máxima del colector cuando utiliza el módulo PCM es de 57,2% mayor que cuando no se usa el módulo cuyo valor es de 39,4%.

Se han realizado pruebas adicionales como el que se muestra en la Figura 87, que muestra la ventaja del uso de los módulos PCM, manteniendo la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado de 40 °C a 30 °C por un intervalo de más de 2 h después de haber interrumpido la influencia de la radiación solar. La eficiencia máxima del colector es de 52%.

Figura 87

Temperatura del secador solar que no utiliza el módulo PCM. Para una radiación media en las horas de calentamiento de 781 W/m². (14/06/19).



Eficiencia instantánea de colector solar con módulo PCM del secador solar, para una intensidad de radiación solar de 781 W/m². (14/06/19).



4.5.3.2 Secado de papa. Utilizando un secador solar de tipo cabina, en cuya placa colectora se instalan dos unidades del módulo PCM de parafina; se realiza el secado indirecto de un kg de papa cocida, que se parten en trozos delgados y se colocan sobre las parrillas de la cámara de secado, como se muestra en la Figura 89.

La Figura 90 muestra, que se logra una temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado resulta más de 35 °C por un intervalo de tiempo de 5 h. Luego de dos días de secado, la masa seca de la papa se redujo de 1 kg a 0,24 kg, generando una pérdida de masa de 76%, como consecuencia de la pérdida de agua del producto.

Secado de papa cocida en el secador solar con PCM.



Figura 90

Variación de temperatura en la cámara de secado durante el proceso de secado de 1 kg de papa cocida en el secador solar con PCM. (20/05/19).



4.6 Acumulador térmico con materiales reciclados y de bajo costo

La elaboración de módulo PCM sobre una estructura plana de cobre ha significado un costo de la parafina de S/.20,00 por Kg, material de cobre y soldadura por S/.600,00, por lo que buscó elaborar estructuras más simples utilizando materiales reciclados.

Se ha desarrollado unidades de acumulador térmica de aluminio reciclado de latas de bebidas comerciales, que constituyen cilindros de 5,4 cm de radio y 12 cm de altura, con un volumen de 274 cm³. Los cilindros se llenan de parafina como material de cambio de fase hasta un volumen de 220 cm³ en estado sólido, la Tabla 40 muestra las dimensiones de una unidad cilíndrica del módulo PCM.

Tabla 40

Altura	h	0,12	m
Radio	r	0,027	m
Volumen externo	Vexterno	0,00027	m ³
Volumen de cera	V _{cera} (20%)	0,00022	m ³
Masa de cera	m cera	0,20	kg
Aletas	Área	0,005	m^2

Dimensiones de una unidad cilíndrica del módulo PCM.

Se construyen tres modelos de unidades cilíndricas de PCM: el primero, se llena sólo con parafina; el segundo, para mejorar la baja conductividad térmica de la parafina (0,2 W/m °C), incorpora una malla metálica de aluminio, de manera que une el interior de la cera con la superficie del cilindro para mejorar el proceso de conducción térmica. El tercero, además de la malla se agrega trozos de piedra volcánica. Las latas se pintan de color negro mate para mejorar la captación

de la energía solar, las unidades contienen la misma cantidad de parafina (Tabla 41) y se muestran en la Figura 91 y 92.

Tabla 41

Energía Acumulada en cada unidad del módulo PCM.

Temperatura inicial	T	22	°C
Temperatura de fusión de la cera	T _{fu}	53	°C
Temperatura final	T _f	60	°C
masa de cera	m	0,2	kg
Calor latente de fusión de la cera	L	123,506	kJ/kg
Calor específico cera sólido	C	2,66	kJ/kg °C
Calor específico cera líquida	C _{pl}	2,34	kJ/kg °C
Energía acumulada	Q	45,24	kJ
Energía acumulada en el módulo	Q _T	533,63	kJ

Figura 91

-

Prototipo 1 (a) llenado sólo con parafina (b) Prototipo 2: llenado con parafina y malla metálica de la lata de aluminio.



(b)

Prototipo 3: llenado con parafina, malla metálica y piedra volcánica. La piedra volcánica absorbe parafina entre sus poros.



La gráfica de la Figura 93 muestra la variación de temperatura de la superficie exterior (cara lateral) de los tres prototipos desarrollados; se muestra que los prototipos 2 y 3 tienen un comportamiento equivalente lo que indica que las unidades de acumulación cilíndrica con parafina y aletas internas (prototipo 2) y la que utiliza piedra volcánica (prototipo 3) intercambia calor con mayor rapidez con el exterior que las unidades con sólo parafina; lo que también se evidencia en la mayor rapidez de enfriamiento de los mencionados prototipos. Al cabo de 6 h aproximadamente la diferencia de temperatura en el prototipo es mayor en 8 °C que en los otros dos prototipos cilíndricos.

Variación de la temperatura de enfriamiento en la superficie de las unidades PCM, se compara



el prototipo 1, 2 y 3.

En base a los resultados anteriores se elige a los prototipos 2 y 3 como unidades cilíndricas del módulo PCM, que integrará un sistema modular compuesta de 12 unidades cilíndricas. El sistema modular tiene una estructura de una base metálica de color negro mate y en los lados mayores dispone de material aislante de tecnofort y cubierta superior de vidrio, como muestra la Figura 95. La entrada de aire es por la parte inferior que corresponde a la base menor del paralelepípedo que conforma el sistema. Para su funcionamiento este sistema modular se coloca sobre la placa colectora del secador solar.

Prototipo de la unidad del acumulador pintado de negro mate.



Figura 95

Unidades cilíndricas del acumulador solar térmico



(a)

(b)

Nota: (a) Distribución de las unidades cilíndricas del acumulador solar térmico con PCM. (b) Acabado del módulo PCM.

Para determinar el espaciamiento adecuado entre los cilindros se ha realizado la simulación mediante el Comsol Multiphysics, de la variación de la temperatura del aire entre los cilindros en relación a la distancia que los separa variando desde 0,5 cm, 1,0 cm, 1,5 cm hasta 3,0 cm.

Simulación en Comsol Multiphysics de intercambio térmico de calor entre dos cilindros con el aire entre ellos.



Figura 97

Simulación de la variación de la temperatura del aire entre los cilindros en relación a la distancia entre ellos de 3,0 cm, 2,5 cm hasta 0,5 cm.



Los resultados de la Figura 98, muestra que el espaciamiento entre los cilindros en 0,5 cm es más óptimo para la mayor transferencia de calor al aire, sin embargo, el ser más delgado la separación dificulta en flujo de aire, por lo que se elige 1 cm como el espaciamiento entre las unidades cilíndricas.

Figura 98

Variación de la temperatura del aire entre los cilindros en relación a la distancia entre ellos de 0,5 cm, 1,0 cm a 3,0 cm.



Posteriormente, se construye el módulo de 12 unidades cilíndricas de acumulación (Figura 95) espaciadas simétricamente y separadas 1cm, dispuestas de 3 latas en cada fila y 4 latas en cada columna. El módulo se ubica sobre la placa metálica del colector del secador solar próximo a la cámara de secado.

Para determinar la influencia del acumulador solar térmico cilíndrico con material de cambio de fase (Parafina), en el secado del producto; se caracteriza la evolución temporal de la

temperatura del aire a la entrada a la cámara de secado cuando cesa la incidencia de la radiación solar sobre el colector.

Figura 99

Variación de la temperatura del secador con acumulador PCM, para una incidencia media de radiación solar desde las 10.00 am a 2.30 pm de 533 W/m². (21/03/19).



Las medias realizadas, corresponden al caso que el secador utiliza el acumulador solar térmico cilíndrico con PCM y cuando no utiliza el acumulador. En estos casos se permite la incidencia de la radiación por un periodo de 4,5 h, luego se cubre el colector del secador con un material opaco.

La Figura 99 y 100 corresponde a la variación de la temperatura en el secador solar cuando se incorpora el sistema de acumulación térmica con PCM, en tanto que la Figura 101, corresponde al secador sin PCM.



Variación de la temperatura del secador con acumulador PCM. (21/03/19).

Figura 101

Variación de la temperatura del secador sin acumulador PCM, para una incidencia media de radiación solar desde las 10.00 am a 2.30 pm de 500 W/m². (22/03/19).



La Figura 102 y 103 muestran más claramente la rapidez de variación de la temperatura del aire a la entrada a la cámara de secado en relación a la temperatura ambiente.

El aire que sale del colector es la que ingresa a la cámara de secado, de manera es el indicador del grado de eficiencia del proceso de secado. Para analizarla, se ha modelado dicha variación de manera lineal con un parámetro de correlación de 0,95 a 0,98.

Figura 102

Velocidad de enfriamiento del aire de salida del colector solar con acumulador de cambio de fase (PCM). (21/03/19).



El comportamiento térmico del sistema de acumulación solar térmico con PCM (parafina) mostrada en la Figura 100, establece que la temperatura del aire a la entrada a la cámara de secado se ha mantenido en el orden de los 30 °C, por un periodo adicional de 2 h sin la intervención de la radiación solar. En tanto que en el secador que no utiliza el acumulador de cambio de fase la temperatura decae más rápidamente (Figura 103). La Figura 102 y 103 caracterizan la rapidez de

variación de la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado, mostrando un decaimiento de 0,06°C/min para el que usa PCM y 0,08 °C/min.

Figura 103

Velocidad de enfriamiento del aire de salida del colector solar sin acumulador de cambio de fase



(PCM). (22/03/19).

4.7 Prueba de los resultados obtenidos.

Se ha realizado la prueba de las hipótesis planteadas mediante t Student y se realizó para el funcionamiento del acumulador en la cocina solar y para el secador solar.

4.7.1 Cocina solar

Se ha realizado varias medidas simultáneas de la temperatura de la cámara de cocción de la cocina con y sin uso del acumulador; también se obtiene el tiempo que la temperatura en la cámara de cocción se mantiene mayor a 50 °C, una vez que cesa la influencia de la radiación solar (Tabla 42).

Tabla 42

Temperatura de estancamiento de la placa de la cocina solar con y sin el módulo acumulador

Fecha	tiempo	Tambiente	Testancam	Testancamiento		tiene 50°C
	(h)	(°C)	(°C)	(°C)		
			Con PCM	Libre	Con PCM	Libre
05/03/2019	1,8	26	75,2	108,6	262	66
03/04/2019	2,5	24,4	106,6	132,9	178	82
04/04/2019	4	24,9	121,9	124,1	155	128
05/04/2019	2	24,3	106,3	133,8	143	110
27/05/2019	2,8	21,8	93,8	132,2	133	100
30/05/2019	4,2	22,9	110,9	130,5	212	79
Media	2,9	24,1	102,5	127,0	180,5	94,2

PCM.

Considerando las hipótesis nula y alterna

Para la temperatura de estancamiento en la cámara de cocción en la cocina solar

Hipótesis nula Ho: La temperatura de estancamiento en la cámara de cocción de la cocina solar

con acumulador PCM, con influencia de la radiación solar, es igual a μ_0 =127,0 °C.

Hipótesis alternativa H₁: La temperatura de estancamiento en la cámara de cocción de la cocina

solar con acumulador PCM, con influencia de la radiación solar, es mayor que μ_0 =127,0 °C

Tabla 43

Prueba de hipótesis mediante t Student para la temperatura en la cámara de cocción en la coccina solar con PCM.

μο	⁻ x	S	n	tobtenido	α	tcrítico
(°C)	(°C)					
127,0	102,5	16,12	6	-3,7	5%	2,015

Como: $t_{obtenido} < t_{crítico}$ (Tabla 43) se acepta la hipótesis nula, que indica que mientras hay incidencia de la radiación solar sobre las cocinas no se optimiza el proceso de cocción, yo que la influencia del módulo PCM es disminuir la temperatura del interior de la cámara de cocción dado que se comporta como una carga.

Para el tiempo que la cámara de cocción de la cocina solar mantiene una temperatura mayor a 50 °C sin la intervención de la radiación solar.

Hipótesis nula H_o: El tiempo que mantiene la temperatura mayor a 50 °C en la cámara de cocción de la cocina solar con acumulador PCM, sin la influencia de la radiación solar, es igual a μ_0 = 94,2 min

Hipótesis alternativa El tiempo que mantiene la temperatura mayor a 50 °C en la cámara de cocción de la cocina solar con acumulador PCM, sin la influencia de la radiación solar, es mayor a $\mu_0=94,2$ min.

Tabla 44

Prueba de hipótesis mediante t Student para el tiempo que se mantiene la temperatura en la cámara de cocción en la cocina solar con PCM mayor a 50 °C .

μο	⁻ x	S	n	tobtenido	α	tcritico
(min)	(min)					
94,2	180,5	48,89	6	4,3	5%	2,015

Como: $t_{obtenido} > t_{crítico}$ (Tabla 44) se rechaza la hipótesis nula, de manera que se acepta la hipótesis alterna, que indica que la influencia del módulo PCM es aumentar el tiempo por el cual la temperatura del interior de la cámara de cocción se mantiene mayor a 50 °C, sin la intervención del sol para un nivel de significancia del 5%.

4.7.2 Secador solar

Para determinar el grado de influencia del acumulador solar térmico con material de cambio de fase en el proceso de secado, se evalúa el tiempo en el cual la cámara de secado mantiene una temperatura mayor a 30 °C (Tablas 45-46).

Tabla 45

Tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar y la temperatura de la cámara se mantiene mayor a 30 °C, el secador usa el módulo PCM.

Fecha	Ι	Temperat	tura entrada	Т	tiempo	
	(W/m ²)		secado		ambiente	(min)
		T max	T min	Tmedia	(°C)	
		(°C)	(°C)	(°C)		
12/03/2019	710	51,4	31,2	43,4	23,4	99
12/04/2019	698	47,2	30,1	40,9	26,2	94
29/04/2019	721	43,4	30,3	34,9	24,0	108
30/04/2019	703	41,6	29,7	33,9	22,3	85
16/05/2019	798	48	30,3	39,8	26,9	121
17/05/2019	743	45,8	30,7	39,3	26,9	86
Media	729	46,2	30,4	38,7	25,0	98,8

Hipótesis nula H_o: En el secador solar que incorpora el acumulador PCM, el tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar, es igual a μ_0 =53,0 min.

Hipótesis alternativa H₁: En el secador solar que incorpora el acumulador PCM, el tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar, es mayor a μ_0 = 53,0 min.

Tabla 46

Tiempo de secado adicional, cuando cesa la influencia de la radiación solar y la temperatura

Fecha	Ι	Temperatura entrada cámara de			Temp	tiempo
	(W/m ²)	secado			ambiente	(min)
		Tmax	Tmin	Tmedia	(°C)	
		(°C)	(°C)	(°C)		
22/03/2019	698	37,2	30,6	34,0	24,6	61,0
13/04/2019	731	43,5	30,2	36,3	24,7	51,0
25/05/2019	712	40,8	30,0	36,5	26,2	47,0
Media	714	40,5	30,3	35,6	25,2	53,0

de la cámara se mantiene mayor a 30° C, el secador no usa el módulo PCM.

Tabla 47

Prueba de hipótesis mediante t Student para el tiempo que se mantiene la temperatura en la cámara del secador con PCM mayor a 30 °C.

μο	⁻ x	S	n	tobtenido	α	tcritico
(min)	(min)					
53	98,8	13,82	6	8,1	5%	2,015

Como: $t_{obtenido} > t_{crítico}$ (Tabla 47) se rechaza la hipótesis nula, de manera que se acepta la hipótesis alterna, que indica que la influencia del módulo PCM es aumentar el tiempo por el cual la temperatura del interior de la cámara de secado se mantiene mayor a 30 °C, sin la intervención del sol para un nivel de significancia incluso menor a 5%.

V. Discusión de resultados

En base a la referencia de Lizana et al (2017), donde se destaca las características térmicas más importantes de los materiales apropiados para ser considerados como materiales acumuladores de calor sensible, como son, su alta capacidad calorífica específica y densidad, buena conductividad térmica y bajo coste; se ha recopilado los materiales locales que concordante con la bibliografía y las medidas realizadas son usados y considerados materiales acumuladores térmicos de calor sensible, los que se muestra comparativamente en la Tabla 48.

Tabla 48

Comparación de la cantidad de masa y volumen requerida para generar una cantidad en calor sensible equivalente a 1 kg de agua y 1 kg de parafina en calor sensible y latente.

Material	Capacidad	Densidad	Conductividad	Masa (*)	Volumen	Masa	Volumen
	calorífica		térmica	(167,44kJ)	equivalente	(**)	equivalente
	específica				(1 L agua)	132,5	(1,14 L
	(J/kg°C)					kJ	parafina)
		(kg/m^3)	(W/m°C)	(kg)	(dm ³)	(kg)	(dm ³)
Ladrillo	750 ^(a)	1180	0,286	5,6	4,73	7,57	6,42
rojo							
Piedra	1334	1270	0,261	3,1	2,47	4,26	3,35
volcánica							
Yeso	1000 ^(b)	$1000^{(b)}$	0,4 ^(b)	4,2	4,19	5,68	5,68
Piedra	1000 ^(b)	2800 ^(b)	3,5 ^(b)	4,2	1,50	5,68	2,03
	1000 ^(b)	1500 ^(b)	0,85 ^(b)	4,2	2,79	5,68	3,79
Hormigón ⁾	1000 ^(b)	$2000^{(b)}$	1,35 ^(b)	4,2	2,09	5,68	2,84
Adobe	900 (a)	1750	0,18	4,7	2,66	6,31	3,60

Nota. * Masa del material requerida para acumular energía por calor sensible equivalente a 1kg de agua de 20 °C a 60 °C. ** Masa del material requerida para acumular energía por calor sensible

equivalente a 1kg de parafina por calor latente hasta 56 °C. (a) Adaptado de Holguino et al 2018. (b). Adaptado de Lizana et al 2017. El resto de los datos corresponde a medida propia.

El resultado de la Tabla 40, muestra que para aplicaciones térmicas solares familiares de mediana temperatura, como es el caso de las cocinas y secadores solares, la cantidad de masa necesaria está en el orden de cuatro veces la masa de agua y más de cinco veces la masa de parafina para un requerimiento energético equivalente, con el consiguiente incremento de volumen que no favorecería su aprovechamiento dado el limitado espacio para una aplicación térmica familiar. En razón a ello se ha descartado el uso de materiales por calor sensible para el acumulador solar térmico propuesto.

Sin embargo, se ha utilizado la piedra volcánica local para controlar el manejo de la parafina líquida en los módulos térmicos realizados en base a aluminio cilíndrico reciclado, la piedra volcánica absorbe la parafina líquida, debido a las porosidades que presenta y permite darle mayor estabilidad al control de la parafina sobre todo en el estado líquido.

En lo referente a materiales de cambio de fase, la parafina o cera es el material que más abunda en la localidad de Ayacucho por el uso artesanal en la elaboración de velas y adornos religiosos. Por otro lado, se descartó las sales hidratadas, que no obstante ser más baratas que la parafina, tienen la desventaja de su baja temperatura de fusión (18,5 - 32,4 °C) y por ser corrosivo en contacto con metales (Oliver, 2009).

Las características térmicas de la parafina, obtenidas mediante la experimentación utilizando el medidor de propiedades térmicas KD2 Pro y el método calorimétrico, muestra valores de calor latente de fusión 132,5 kJ/kg y conductividad térmica de 0,21 W/mK que se aproxima a las obtenidas por Campos et al (2014) de123,5 kJ/kg y conductividad térmica de 0,2 W/mK. Para

ser considerado como un material apropiado de un acumulador térmico de cambio de fase, entre otras de sus propiedades termofísicas, debe tener un calor latente de cambio de fase (fusión) elevado y alta conductividad térmica. En lo referente al calor latente de la parafina, esta corresponde al 37% del calor latente de fusión del agua (334 kJ/kg a 0 °C) y sólo un 5% del calor latente de vaporización del agua (2257 kJ/kg a 97 °C). La conductividad térmica de la parafina resulta muy baja, del orden 0,05 % del cobre (380W/m K), lo que disminuye la velocidad de la carga y descarga de la energía durante los ciclos de fusión y solidificación de la parafina.

La parafina comercial que se vende en Ayacucho, es un material que reúne las características térmicas básicas para ser considerado como material de cambio de fase, pero sus aplicaciones van a estar limitadas a la temperatura de fusión de la parafina entre 53 °C a 60 °C, que para nuestro caso corresponden a la temperatura de operación de aplicaciones solares de mediana temperatura (Grande, 2016). En el caso de aplicaciones en secadores solares concuerdan plenamente a la temperatura necesaria para optimizar el secado de productos cuya temperatura de la cámara de secado debe estar entre 40 °C y 70 °C (UNESCO, 2005). En el caso de cocinas solares la temperatura necesaria de cocción corresponde a la temperatura de ebullición del agua en Ayacucho de 91 °C, por lo que el uso de módulos PCM puede limitarse a requerimiento de mantener caliente o calentar el producto.

Por otro lado, la información toxicológica de la parafina del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo (2009) menciona que la parafina no es una sustancia tóxica, no obstante, no pueden ser ingeridas ni absorbidas, dado que puede contener pequeñas cantidades de impurezas potencialmente carcinógenas. Se recomienda como valor límite ambiental de exposición diaria a 2 mg/m³ de humo de cera de parafina para minimizar el riesgo potencial en la salud. En ese sentido se considera a la parafina con un bajo impacto ambiental, no contaminan el
agua y además son 100% reciclables. Se debe considerar que el punto de ignición de la parafina se encuentra por encima de los 250 °C (Vélez, 2018), valor que no se alcanza en las aplicaciones solares como la cocina y el secador.

No obstante, las desventajas señaladas sobre la baja conductividad térmica y el mediano calor latente de la parafina, se ha determinado como material de cambio de fase del acumulador térmico propuesto, por la abundancia del material en la zona, la temperatura de fusión concordante al requerimiento, y su ventaja térmica frente a materiales de calor sensible. De manera que, para optimizar la transferencia de calor a través de la parafina se ha diseñado la estructura geométrica apropiada que compense dicho déficit.

Diseño del módulo PCM.

Para determinar el diseño del acumulador solar térmico se elige como material de cambio de fase la parafina comercial con las características térmicas establecidas anteriormente. Tomando en cuenta, en primer lugar, la baja conductividad térmica de la parafina y en segundo lugar, la disponibilidad energética, limitada por su el calor latente y su temperatura de fusión; se ha caracterizado la geometría más apropiada que optimice la acumulación térmica y la consecuente transferencia de calor al medio objetivo (aire).

El diseño del acumulador térmico, parte de la concepción de establecer una estructura modular de placa rectangular compacta que encapsule la parafina; el carácter modular permitirá combinar la disposición de ellas según el requerimiento energético y se pueda adaptar al espacio disponible en los sistemas solares térmicos donde se utilicen. La unidad modular se construye con una estructura metálica (cobre) y para optimizar la acumulación y extracción de la energía térmica dispone de aletas internas y externas para aumentar la conductividad térmica efectiva del módulo.

Por otro lado, el uso de la parafina como material como material de cambio de fase, limita la acumulación de energía térmica de módulo en torno a la temperatura de fusión de la parafina de 53 °C a 60 °C, rango donde la inercia térmica del PCM permite mantener más estable la temperatura exterior. En razón a ello la aplicación del módulo está orientadas aplicaciones de mediana temperatura entre 15-90 °C (Grande, 2016) rango en la que se encuentran las aplicaciones solares.

El diseño que optimice las características geométricas del módulo de acumulación, se obtuvieron en base a la simulación del comportamiento térmico del módulo mediante el software COMSOL Multiphysics. Las herramientas de modelado del COMSOL permiten caracterizar los mecanismos de transferencia de calor en el módulo para condiciones estacionarias en sistemas de coordenadas 3D. El alto nivel de detalle proporcionado por las simulaciones en COMSOL, permite la optimización del diseño y condiciones operacionales de módulo.

Figura 104

Variación de la temperatura en puntos de la línea central de la base superior del módulo PCM obtenido mediante el COMSOL Multiphysics.



Para validar el modelo físico planteado en el diseño del software COMSOL Multiphysics 5.3, se ha caracterizado el perfil de temperatura en puntos correspondientes a la línea central de la base superior del módulo PCM sin aletas externas cuando la base inferior permanecía constante a 91 °C. Dicho resultado se compara con la medida experimental reproduciendo las condiciones establecidas en el modelo, por ejemplo la temperatura de la placa base del módulo se mantiene a 91 °C poniendo en contacto dicha base en agua hirviendo.

Los resultados de la Figura 104 y 105 muestran un comportamiento equivalente entre lo que predice el modelo físico del COMSOL y el resultado experimental, el grado de correspondencia se manifiesta en la tendencia de comportamiento de la variación de la temperatura a lo largo de la línea central del módulo PCM con aletas internas y sin aletas externas. Las diferencias que se muestran, se deben a que en el desarrollo experimental el espacio comprendido entre las placas del módulo no está completamente llenas de parafina, se deja un espacio de aire del 20% para ser ocupado al ser calentado por el aumento de volumen.

Figura 105

Variación de la temperatura en puntos de la línea central de la base superior del módulo PCM obtenido experimentalmente.



Para determinar el espesor del módulo PCM y el tamaño de las aletas internas y externas se simularon la capacidad de transferencia de calor desde la base caliente hacia el exterior por medio del COMSOL Multiphysics, que modela sistemas descritos por ecuaciones diferenciales parciales utilizando el método de solución por elementos finitos. Mediante las herramientas gráficas de COMSOL se desarrollaron los diseños geométricos de los módulos con aletas internas y/o aletas externas para evaluar la capacidad de transferencia de calor a través del PCM y hacia el exterior.

Los resultados que se muestran en la Figura 48 y 49, han permitido establecer las dimensiones finales del módulo PCM, considerando las que presentan mayor rapidez de transferencia de calor y asumiendo su mayor posibilidad y facilidad de construcción, dado que la soldadura en cobre, por ejemplo, presenta mayor dificultad realizarla en la localidad. El tamaño definido del módulo PCM es de 30 cm x 20 cm y espesor 3 cm, se observa para mayor espesor del módulo hay menor rapidez de transferencia de calor al exterior y mayor estratificación de la temperatura del material PCM, un menor espesor puede ser más efectivo, pero consideramos que habría mayor dificultad en su construcción y disminuiría la masa efectiva del PCM y la disponibilidad energética. En lo referente al tamaño de las aletas se asumieron 2,5 cm tanto para las aletas internas y externas; como muestran la Figura 75, 61, 62 y 63, se optimiza la transferencia de calor por conducción a través de las aletas internas desde el interior del PCM hacia el aire exterior. En tanto que, las aletas externas aumentan la relación área de convección en relación al volumen del módulo y representan un incremento de 25% del área total del módulo.

Se ha desarrollado dos tipos de módulos PCM, uno que dispone sólo de aletas internas y el otro con aletas externas a ambos lados de la base del módulo. Las dimensiones de los dos tipos de módulo PCM son equivalentes, permiten encapsular 1 kg de parafina con la que se acumula 0,06

kWh de energía térmica en calor sensible y latente, tiene una densidad de energía por unidad de volumen de 51,81 kWh/m³ para operar a temperatura de 53 °C a 60 °C. El módulo desarrollado la comparamos con modelos de otros autores para ver su efectividad, por ejemplo, el modelo de Campos (2014) se caracteriza por ser un acumulador también compacto de parafina RT60 desarrollado con aluminio y sólo con aletas internas de 2,5 cm de longitud, espaciados unos de otros con 4 cm; las dimensiones del módulo son de 60 cm x 20 cm x3 cm con volumen efectivo de 0,0036 m³ por unidad, que puede acumular 0,12 kWh de energía térmica con una densidad de 89,4 kWh/m³, esta unidades se constituyen en arreglos 12 placas, 6 en paralelo y 2 en serie para calentar 500 L de agua con un volumen total de 0,315 m³ y una capacidad máxima de almacenamiento de energía de 8,5 kWh. Otro modelo que se hace referencia en Moscoso (2016), son módulos de aluminio con aletas externas de la empresa Climator de dimensiones superiores al propuesto en el presente trabajo. Igualmente, Moscoso (2016) hace referencia a los paneles de la compañía alemana Rubitherm Technologies GmbH, de tipo de macro-encapsulación de PCM de 45 cm x 30 cm con 15 mm de espesor. Están compuestos por dos placas de aluminio, conectadas entre sí a través de un marco del mismo material, éstos se pueden adaptarse a diferentes aplicaciones, ya que se pueden llenarse con PCM orgánicos o con PCM inorgánicos, permitiendo operar en un rango de temperaturas entre 0 y 45 °C, dependiendo del uso y requisitos particulares.

Aplicación a cocinas y secadores solares

Dos unidades del módulo PCM que tiene sólo aletas internas fueron instalados sobre la placa metálica de la cámara de cocción de una cocina solar tipo caja. Se compara la temperatura de estancamiento de la placa en la cocina que incorpora el módulo PCM y otra cocina que no incorpora el módulo. En base a ello determinamos el primer factor de mérito que establece la relación entre la eficiencia óptica de la cocina y el coeficiente global de pérdidas de calor al exterior

desde la placa, se obtiene un valor de 0,110 \pm 0,001 $m^2 C/W$ para una temperatura de estancamiento de 118 °C en la cocina con módulo PCM y de 0,116 \pm 0,001 m^2C/W y 123 °C para la cocina que no incorpora el módulo PCM evaluados para una intensidad de radiación solar media de 548 W/m². Respecto al segundo factor de mérito, que caracteriza la eficiencia de transferencia térmica hacia el recipiente de cocción, la cocina que incorpora el módulo PCM tiene un menor segundo factor de mérito que la cocina sin el módulo PCM, los valores son 0,251 y 0,290 para una intensidad de radiación media de 617,3 W/m² y 638,3 W/m² respectivamente; un valor alto indica una mayor eficiencia para la cocción. Estos resultados muestran que hay un efecto del módulo sobre la baja temperatura de estancamiento y consecuentemente en los valores del primer y segundo factor de mérito, dado que el acumulador constituye una carga adicional, que acumula energía térmica durante el proceso de calentamiento de la placa o agua. La energía que se dispone en el acumulador permite disponer, en caso se interrumpe la radiación solar, para mantener la temperatura de la cámara de cocción en el orden de 30 °C por más de 3 a 4 h, con un intervalo de 15 °C superior a la temperatura ambiente, lo que determina otra posibilidad de uso de la energía acumulada para el calentamiento de agua o una porción de comida; por ejemplo, ha permitido calentar 2,5 L de agua a 20 °C hasta 40 °C en un tiempo de 2 h.

Los módulos PCM con aletas internas y externas (dos unidades: 2 kg de parafina) se instalaron sobre la placa metálica del colector solar del secador solar tipo cabina e indirecto. Durante el proceso de calentamiento los módulos alcanzaron la temperatura de 70 °C para una intensidad de radiación de 745 W/m², con lo que la parafina cambia de estado y manteniendo más estable la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado (Figura 81 y 83) dado que, cuando el secador es por convección natural es predominante la presencia de fluctuaciones de la velocidad del aire y temperatura (Montero, 2005). La temperatura de aire que ingresa a la cámara de secado

permanece por más 40 °C durante más de 6 h, generando un flujo másico de 0,01 kg/s de aire en las horas de mayor estabilidad de la temperatura con la que se caracterizó la curva de eficiencia del colector solar $\eta = -703,8$ $\frac{(Tae-Tamb)}{l} + 57,2$ para una intensidad de radiación solar media de 745 W/m², dando una eficiencia media de 51 %, en tanto que el secador no utiliza el módulo PCM la eficiencia media del colector es de 33 % para una intensidad de radiación solar media de 757 W/m². Los valores de flujo másico de un secador estudiado por Roche et al es de 0,36 kg/s para un área del colector de 3,72 m² alcanzando un porcentaje de eficiencia del 73 % con una radiación entre 600 a 1000 W/m², Montero (2005) establece eficiencias de 40-60 % en colectores solares en convección natural. Por otro lado, cuando cesa la influencia de la radiación solar se dispone de más de 2h la temperatura del aire que ingresa a la cámara de secado por encima de los 30 °C, que definitivamente optimiza el proceso de secado del producto removiendo el contenido de humedad por mayor tiempo y no se interrumpa el proceso de secado del producto.

La prueba de hipótesis demuestra que la influencia del acumulador solar térmico con PCM, es significativa, en aumentar el tiempo de disponibilidad de la energía solar para la función específica tanto en la cocina y secador solar, cuando cesa la intervención de la radiación solar. Sin embargo, en el caso de la presencia de la radiación solar la influencia del acumulador solar es negativa dado que se convierte en carga térmica mientras va acumulando la energía.

VI. Conclusiones

- El material de cambio de fase local (parafina comercial) influye significativamente en el funcionamiento de sistemas solares térmicos familiares en Ayacucho estabilizando la temperatura de la cámara de cocción o de secado alrededor de la temperatura de fusión (53 °C), debido a que presenta un calor específico en fase sólida 2100 J/kg K, calor específico en fase líquida 2113 J/kg K y su calor latente de fusión de 132 kJ/kg que lo configuran como un material apropiado de cambio de fase, siendo además una sustancia no corrosiva, biodegradable y que soporta varios ciclos de carga y descarga.
- El intercambiador de calor del acumulador solar térmico es modular de estructura compacta rectangular de cobre de 30 cmx20 cmx3 cm, influye significativamente en el funcionamiento de los sistemas solares térmicos en Ayacucho, dado que a través de las aletas internas y/o externas de 2,5 cm de altura aceleran el proceso de carga y descarga de la energía térmica acumulada, incrementando la relación de área y volumen para facilitar el proceso de transferencia de calor al aire como fluido de intercambio térmico.
- La energía almacenada en el acumulador influye significativamente en los sistemas solares térmicos familiares, debido a que cada módulo del acumulador que encapsula un kilogramo de parafina, acumula una energía hasta el punto de fusión de 0,06kWh con una densidad de energía por volumen de 51,81 kWh/m³, que para el caso de los secadores es una energía adicional para acelerar el proceso de secado sin la intervención de la energía solar directa y en las cocinas solares esta energía permite mantener la temperatura de la cámara de cocción.

En general, el acoplamiento de dos unidades del acumulador solar térmico con parafina • como material de cambio de fase en los sistemas solares térmicos ha mostrado una influencia significativa en el funcionamiento de dichos sistemas familiares en Ayacucho. Para el caso de las cocinas solares, ha disminuido su capacitad de cocción del sistema por constituir una carga adicional lo que se evidencia en la comparación de los factores de mérito F1 y F2 obtenidos, que son respectivamente de $0,110\pm0,001 \text{ m}^2\text{C/W}$ y 0,251 para la cocina con módulo PCM y de 0,116±0,001 m² C/W y 0,29 para la cocina que no incorpora el módulo PCM evaluados para una intensidad de radiación solar media del orden de 600 W/m²; sin embargo permite disponer energía almacenada que puede ser utiliza para mantener o calentar un producto determinado, se ha logrado calentar 2,5 kg de agua de 20 °C a 50 °C manteniendo su temperatura en 40 °C por un periodo de 3 h. En el secador solar, ha permitido controlar la temperatura de la cámara de secado, logrando además disponer hasta 2 h la temperatura del aire en la entrada de la cámara por encima de los 30 °C con lo que se acelera el proceso de secado sin intervención de la intensidad de radiación solar. La potencia media del colector del secador solar está en el orden del 50%.

VII. Recomendaciones

- El estudio realizado, es un aporte más al esfuerzo de muchos otros investigadores por conocer y aprovechar la acumulación solar térmica mediante calor latente. Aun existiendo diversos estudios sobre materiales de cambio de fase y diseños de acumuladores, es necesario continuar con nuevas propuestas para poder optimizar este tipo de tecnologías con sentido ecológico y que sean económicamente viables para cada realidad del lugar donde se aplica. En nuestro caso está orientado a aplicaciones solares a escala familiar, con la finalidad de garantizar mayor eficiencia y confianza en las tecnologías solares como las cocinas o secadores que se caracterizan por ser muy intermitentes en respuesta a la aleatoriedad de la energía solar disponible.
- Como consecuencia se recomienda continuar la línea de estudio planteada, caracterizando nuevos materiales de cambio de fase que haya en la localidad, realizar ensayos sobre materiales compuestos que optimice su capacidad de almacenamiento térmico con propiedades determinadas y proponer diferentes diseños del acumulador según el requerimiento que se necesite.
- Queda pendiente, además, monitorear por mayor tiempo el comportamiento térmico de los módulos propuestos para mayores ciclos de carga y descarga.
- Tomando en cuenta las ventajas ambientales y técnicas de los acumuladores solares de cambio de fase en la acumulación de la energía, se debe orientar su difusión y uso a las demandas energéticas de escala familiar en secadores solares, invernaderos e incluso en sistemas de calefacción de viviendas de zonas alto anadinas. Por lo que se recomienda, a las autoridades de la región generar las políticas sociales y económicas, que permitan difundir e incorporar estas tecnologías alternativas que se basan en fuentes de energías renovables consideradas como energías limpias y amigables con el ambiente; para incentivar el uso eficiente de la energía, para diversificar las fuentes de energía y

fundamentalmente para generar conciencia y responsabilidad ambiental. Es esta parte que las entidades educativas deben orientar la educación ambiental energética no sólo a través de la educación formal en las Instituciones Educativas sino también a través de la educación no formal a nivel de las familias. Almagro Cabrera, D. (2012) Almacenamiento Térmico en Aplicaciones Solares de Concentración de Alta Temperatura [Tesis de Pregrado, Escuela técnica superior de ingenieros. Universidad de Sevilla, España].

http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/5328/fichero/Proyecto+fin+de+carrera.pdf

- AMBIENTA. Banco Mundial. (2014). Agricultura familiar y huertos urbanos. https://www.bancomundial.org/es/news/press-release/2018/09/19/decline-of-globalextreme-poverty-continues-but-has-slowed-world-bank
- Ambrosetti, P. (1978). *Radiación Solar en Ayacucho*. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga UNSCH
- Arce Ji, L. F.; Bravo F, D. R.; Medina G, F.S. y Tipiani M, V. C. (2017). *Planeamiento Estratégico de la Industria Peruana de Energías Renovables* [Tesis de Maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/9039
- Artigas, M. (2003). *Filosofía de la Naturaleza*. Ediciones Universidad de Navarra, S.A. (EUNSA). España.
- Bistoni, S.; Iriarte, A. y Saravia, L (29-30 de agosto de 2002). Sistemas de Acumulación del Calor Excedente de un Invernadero. Congreso Regional de Ciencia y Tecnología. Universidad Nacional de Catamarca. Argentina.
- Bissio, R. (2017). Poco progreso en el plano nacional. *Spotlight Enfoques sobre Desarrollo Sostenible*, 35-38. http://www.world-

psi.org/sites/default/files/documents/research/spotlight_report_2017_esp.pdf

Bunge, M. (2001). La ciencia, su método y filosofía. Editorial Sudamericana. 4ta edición. Buenos Aires. Argentina. Campos A., Diarceb G., Terés J., Bandosc T., García A., Lópezd L. y Salac J. (2014).*Design of a finned plate latent heat thermal energy storage system for domestic applications*. Energy Procedia 48. 300 – 308.

https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610214002975

- Cancillo Martínez, P. J. (2012). *Transferencia de calor avanzada mediante materiales de cambio de fase*. Universidad Pontificia Comillas. Madrid, España. https://www.iit.comillas.edu/pfc/resumenes/4fc75a907829c.pdf
- Cerezuela P. A. (2012). Desarrollo de modelo simplificado y validación de las fachadas ventiladas con aletas de material de cambio de fase [Tesis de Maestría, Grupo de termotecnia. Universidad de Sevilla, Sevilla, España].
 http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70386/fichero/Desarrollo+modelo+simplificado+fa chada+ventilada+aletas+PCM.pdf
- Centro de Conservación de Energía y del Ambiente (CENERGIA). (2010). *Diagnóstico de la situación actual del uso de la energía solar y eólica en el Perú*.
- CEPAL- ONU. (2016). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe. http://www.sela.org/media/2262361/agenda-2030-y-losobjetivos-de-desarrollo-sostenible.pdf
- CEPAL- ONU. (2018). Agenda 2030 y los Objetivos de Desarrollo Sostenible. Una oportunidad para América Latina y el Caribe.

https://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/40155/24/ S1801141_es.pdf

Chávez, G.J. (2009). Evaluación experimental de propiedades Térmicas de materiales de construcción Nacionales y desarrollo de ventanas ahorradoras de energía [Tesis de Doctoral, Universidad Nacional Autónoma de México, México].
http://132.248.9.195/ptd2009/noviembre/0651662/0651662_A1.pdf

- Conte G, M y D'Elia, V. (2017). Desarrollo sostenible y conceptos "verdes". *Revista Problemas del Desarrollo*, 192 (49), http://probdes.iiec.unam.mx.
- COES. (2017). Informe de la Operación Anual del SEIN-2016. https://1library.co/document/y91pe6jq-informe-de-la-operaci%C3%B3n-anual-delsein.html
- Cora Placco, L. S. (2006). Acumulación solar térmica de energía. INENCO, UNSA –CONICET. Salta. Argentina. https://www.mendoza-conicet.gob.ar/lahv/soft/opte/ htdocs/modules/descargas/ archivos/ACUMULACION%20TERMICA.pdf
- Decagon Devices, Inc.(2016). KD2 Pro Thermal Properties Analyzer. Operator's Manual. www.decagon.com
- Díaz Dominguez, R. y Callehuanca Vergara, R.C. (2013). Construcción del casco estructural de viviendas con aislamiento térmico en una obra de vivienda masiva en Apurímac [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/4951
- Díaz R, G. E., Condorí, M. A, Altobelli, F. N. y Durán G. J. (1-5 de noviembre de 2010). Estudio de un sistema de acumulación de calor con cambio de fase para secado solar. IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVII- SPES- Cusco).
- Diéguez Lucena. A. (2013). La filosofía de la técnica de Ortega como guía para la acción Una comparación con Heidegger. *Revista Internacional de tecnología, conocimiento y sociedad*. 2 (1).

http://webpersonal.uma.es/~DIEGUEZ/hipervpdf/Dieguez_Filosofia_Ortega_como_guia %20_accion.pdf

- Duffie J. y Beckman W. (2013). Solar Engineering of Thermal Processes. New Jersey. USA: Editorial John Wiley & Sons.
- Escobar Ochoa, M., Cuervo Andrade, S. y Rincon Prat, S. (2017). Metodología para el diseño de un módulo de acumulación térmica usando materiales de cambio de fase (PCM) para un secador solar de túnel. *Revista UIS Ingenierías*. 17 (1) 9-20. https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistauisingenierias/article/view/7019
- Esteves, A y Román, R. (2003). *Las Cocinas Solares de Iberoamérica*. CYTED. Ed. INENCO, Salta, Argentina.
- Fauzer V.V., Smirnov A.V., Lytkina T.S., Fauzer G.N. (2018). Sustainable Development in Russia's Northern Regions: Labor Dimension. *Economic and Social Changes: Facts, Trends, Forecast*, 11(5), 120-136. http://vvfauzer.ru/pub/st/s_2018_5_en.pdf
- Fernández R, W. (2012). Análisis del comportamiento del perfil de temperatura de material de cambio de fase (PCM) en el almacenamiento de energía solar utilizando herramientas computacionales [Tesis de Pregrado, Universidad Autónoma del Caribe Barranquilla. Colombia]. http://repositorio.uac.edu.co/handle/1/784
- FAO Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2015). *El estado de la inseguridad alimentaria en el mundo*. Roma. http://www.fao.org/3/a-i4646s.pdf

Gamio Aita, P. (2010). Energía en el Perú: ¿Hacia dónde vamos? *Matriz Energética y Desarrollo Sostenible*. Fundación Friedrich Ebert Perú. http://propuestaciudadana.org.pe/sites/default/files/sala_lectura/archivos/Matriz_energetic a_Peru_III_Pedro_Gamio.pdf

- Gamio Aita, P. (2015). *Matriz Energética y Desarrollo Sostenible*. Fundación Friedrich Ebert Perú.
- García H. (2013). *Energía Solar Térmica y Fotovoltaica en el Perú*. Ministerio de Energía y Minas.

http://minagri.gob.pe/portal/download/pdf/especiales/bioenergia/Congreso_Peru/12_Garc ia_Henry.pdf

- García Valladares, O., Pilatowsky Figueroa, I., Cabanillas R., E., Ramos C, Ramírez J. R., Beltrán J., González A. E., Zamudio A., Castillo M., Menchaca C. A. y Recio R. B. (2017). *Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial, servicios e industrial.*Instituto de Energías Renovables, Universidad Nacional Autónoma de México UNAM.
 México. http://www.fordecyt.ier.unam.mx/pdf/pdfTermoSolar.pdf
- Gil A, M. M., Martorell I., L. A., Dolado P., Z. B. y Cabeza L., F. (2010). State of the art on high temperature thermal energy storage for power generation.Part 1- Concepts, materials and modellization. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (14), 31–55
- Glogower Abadi, A.I. (2015). Sistema de almacenamiento de energía térmica en el cambio de fase de materiales para un secador solar tipo Hohenheim [Tesis de Pregrado, Universidad de Los Andes. Colombia]. https://repositorio.uniandes.edu.co/handle/1992/17249
- González Mantecón, M A. (2013). *Instalación distric heating con energía solar y almacenamiento estacional de calor* [Tesis de Pregrado, Universidad Carlos III, Madrid, España]. https://earchivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/19282/TFG_Miguel_Gonzalez_Mantecon.pdf?sequen ce=1&isAllowed=y
- González García, M.I., López Cerezo, J.A. y Luján López, J.L. (2004). Las concepciones de la tecnología. *Ciencia, Tecnología y Sustentabilidad*. El Escorial, 1-16. http://istas.net/descargas/escorial04/material/dc06.pdf

- Gopi P., Balusamy T., Palanisamy S y Raj Shano P. (2017). Experimental Analysis of a natural convection mode solar dryer integrated with heat storage unit. *International Journal of Mechanical Engineering and Technology* (IJMET) 9(6) 792–799.
- GRAMMER Solar (2018). Sistemas solares de aire caliente para el secado de productos agrícolas
 en Chile. Cooperación alemana GIZ. https://www.grammer-solar.com/images/Chile/develoPPP_SecadoSolarChile2018_ohne-Anhang.pdf

Grande Ruiz, A. (2016). Estado del arte de sistemas de almacenamiento de energía térmica mediante cambio de fase, a media y alta temperatura [Tesis de Master, Universidad de Sevilla, España].

http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/70707/fichero/Proyecto+Fin+de+M%C3%A1ster-Alfonso+Grande+Ruiz.pdf

- Himran S., Taraka R. y Duma A. (2015). An Analysis on Thermal Energy Storage in Paraffin-Wax Using Tube Array on a Shell and Tube Heat Exchanger. *International Scholarly and Scientific Research & Innovation* 9(10) 1822-1829.
- Holguino H. A., Olivera M. L. y Escobar C., K.U. (2018). Thermal comfort in an adobe room with heat storage system in the Andes of Peru. *Journal of High Andean Researc*, 20(3): 289 – 300. http://dx.doi.org/10.18271/ria.2018.393
- Horn M y Espinoza R. (2-4 de octubre de 2017). El potencial de la energía solar en el Perú y el aporte de la UNI. Primer Congreso de Energías Renovables y Arquitectura Bioclimática I CABER 2017 "Reconstruyendo el Perú Sosteniblemente" PUCP, Lima Perú.
- González González, A. (2015). *Cuaderno de Trabajo de Tecnología Industrial I*. [Archivo PDF]. https://iesvillalbahervastecnologia.files. wordpress.com/2015/09/cuaderno-de-tecnologia-industrial-i-2015.pdf

INFOAGRO. (2015). Concepto de Desarrollo Sostenible. [Archivo PDF]. http://old.sernanp.gob.pe/sernanp/archivos/imagenes/vida/INFOAGRO%20DESARROL LO%20SOSTENIBLE.pdf

- Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI). (2017). *Datos de los Censos Nacionales* 2017 y el Perfil Sociodemográfico del Perú. http://censos2017.inei.gob.pe/redatam/
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo. (2009). *Cera de parafina, humos.* https://www.insst.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/TextosOnline/Valores_Limite /Doc_Toxicologica/Ficheros/DLEP09.pdf
- Juárez, D., Balart, R., Ferrándiz, S. y García, D. (2012). Estudio de Materiales con Cambio de Fase (PCM) y Análisis SEM de Micro (PCM). *3 Ciencias*. Universidad Politécnica de Valencia. España. https://www.3ciencias.com/wp-content/uploads/2012/11/cambio-de-fase.pdf.
- Karunesh Kant, A. Shukla, Atul Sharma, Anil Kumar y Anand Jainc. (2016). Thermal energy storage based solar drying systems: A review. *Non-Conventional Energy Laboratory, Rajiv Gandhi Institute of Petroleum Technology, ResearchGate* 86-99.
 https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-7d41942d-7c6f-3aa9-9ee2-48444f1bbc63
- Kociuba, D y Szafranek E. (2018). New tool for measuring sustainable development in functional urban areas. Sciendo *European spatial research and policy*. 25(2). https://www.researchgate.net/publication/329444199_New_Tool_for_Measuring_Sustain able_Development_in_Functional_Urban_Areas
- Koppmann, W. (2013). *Reflexiones sobre la naturaleza y la praxis en Marx*. Consejo Latinoamericano de Ciencias Sociales (CLACSO).Argentina. 4(27-38)

Lecuona N. A., Rodríguez A, P.A, Nogueira G., J.A. y Santos R., M. (2016). Horno solar que funciona en condiciones de baja radiación. Grupo de Investigación de Ingeniería Térmica, Energía y Atmósfera (ITEA) de la Universidad Carlos III de Madrid. http://portal.uc3m.es/portal/page/portal/investigacion/parque_cientifico/actualidad_agend a/noticia-horno-solar-enero-2013.

Ley 27345 de 2000. Ley de Promoción del Uso Eficiente de la Energía. 08 Septiembre de 2000.

Linés Escardó, A. (2010). Clima y cambio climático. *RAM (Revista del Aficionado a la Meteorología)* 3(26). https://www.divulgameteo.es/fotos/lecturas/Clima-CC-Lin%C3%A9s.pdf

- Lira C.L, González R, O. J., Méndez L, E. (22-24 de octubre de 2008). Medición de la Conductividad Térmica de Algunos Materiales Utilizados en Edificaciones. Centro Nacional de Metrología. Simposio de Metrología, Querétaro, México. https://www.cenam.mx/simposio2008/sm_2008/memorias/s4/sm2008-s4c2-1100.pdf
- Lizana J, Chacartegui R, Barrios P, A; Valverde J. M. (2017). Caracterización de materiales de almacenamiento de energía térmica para aplicaciones en edificación. 3er Congreso Internacional de Construcción Sostenible y Soluciones Eco-Eficientes, Sevilla, España. 621-637. https://idus.us.es/xmlui/bitstream/handle/11441/59094/Jesus%20lizana%20%28espa %29..pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Llano Alonso, F.H (2015). *El hombre y la técnica en Ortega y Gasset*. IUS ET SCIENTIA, 1(1), 1-24. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5308570
- Loayza Ochoa, F.R. (2012). *Control Electrónico de un Reflector Scheffler* [Tesis de Pregrado, Pontificia Universidad Católica del Perú, Perú]. https://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/20.500.12404/1267

Macía, A F, Parra J C, Chejne F. (2010). Análisis de un sistema de almacenamiento de energía térmica usando cloruro de magnesio hexahidratado. Grupo de Termodinámica Aplicada y Energías Alternativas (TAYEA), Facultad de Minas Universidad Nacional de Colombia-Sede Medellín, Colombia.

Machuca Riveros, J. P. (2015). Influencia térmica de la piedra volcánica como elemento constrictivo en las .viviendas de la comunidad campesina de Sacsamarca [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional del Centro del Perú, Huancayo, Perú].
https://repositorio.uncp.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12894/145/TARQ_12.pdf?sequen ce=1&isAllowed=y

- Magalhães do Nascimento E. M. (2017). La filosofía realista y naturalista de John Dewey: contribuciones para una epistemología en la actualidad. *Cuadernos de Filosofía Latinoamericana*. 38 (116), 139-165.
- Milián Rodríguez, Y. E. (2018). Encapsulamiento de materiales de Cambio de fase inorgánicos. Influencia en sus propiedades termofísicas [Tesis Doctoral, Universidad de Antofagasta. Chile]. https://docplayer.es/89124219-Encapsulamiento-de-materiales-de-cambio-defase-inorganicos-influencia-en-sus-propiedades-termofisicas.html
- Ministerio del Ambiente. (2016). Objetivos de Desarrollo Sostenible e Indicadores. *Ministerio del Ambiente, Dirección General de Investigación e Información Ambiental*. Lima, Perú.
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM) (2010), Decreto Supremo Nº 064-2010-EM, Política Energética Nacional Del Perú 2010-2040, Lima, Perú.
- Montero Puertas, I. (2005). *Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuos biomásicos* [Tesis Doctoral, Universidad de Extremadura, Badajoz, España]. https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=576

Monsalvo L.C y Zamora Z.O. (2009). Diseño de una cocina solar para actividades de camping o afines [Tesis de Pregrado, Universidad EAFIT. Medellín, Colombia].
https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/4485/DISE%D1O%20DE%20UN
A%20COCINA%20SOLAR%20PARA%20ACTIVIDADES%20DE%20CAMPING%20
0%20AFINES.pdf;jsessionid=7AF110DC8E94371B2FAA7B585B01AA95?sequence=1

Moscoso, M. (2016). Aplicación de los materiales de cambio de fase en el mobiliario interior como reguladores de temperatura [Tesis de Master, Escola Técnica Superior D'arquitectura de Barcelona. España].

https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/102881/TFM_MabelMOSCOSO.pdf

- Mosquera Arancibia, P. (2013). Medida de la Conductividad térmica con el método de la aguja térmica, basado en la fuente lineal de calor transitorio, para su aplicación en los cerramientos de adobes y bloques de tierra comprimida [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España]. https://oa.upm.es/21903/
- Nacif Hartley, J.A. (2011). Acumulación térmica para un sistema solar de calefacción activo [Tesis de Pregrado, Universidad de Chile, Santiago, Chile]. https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104274
- Ochoa Hurtado, A. (2016). Evaluación de parafina comercial como material de cambio de fase para almacenamiento de energía [Tesis de Master, Universidad Libre, Bogotá, Colombia]. https://repository.unilibre.edu.co/handle/10901/9812
- Olivares C, A. E y Torres F, G. A. (2010). *Caracterización de un sistema de calentamiento de aire por medio de energía solar con almacenamiento energético* [Tesis Doctoral, Universidad Centroamericana "José Simeón Cañas" Antiguo Cuscatlán, El Salvador].

- Oliver Ramírez, A. (2009). Integración de materiales de cambio de fase en placas de yeso reforzadas con fibras de polipropileno. Aplicación a sistemas de refrigeración y calefacción pasivos para almacenamiento de calor latente en edificios [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España]. https://oa.upm.es/2910/
- Ortiz Blanco, A.M. (2014). La relación hombre-naturaleza. Tendencias de su filosofar en Cuba. *Revista de Ciencias Sociales* (Cl), 32, 63-76. Universidad Arturo Prat. Tarapacá, Chile
- Oró E, Gil, Miró L, Peiró G, Álvarez S. y Cabeza L. F. (2012). Thermal energy storage implementation using phase change materials for solar cooling and refrigeration applications. *Energy Procedia* 30 (2012), 947 – 956.
- Pérez Rincón, M.A. (2012). Conceptualización sobre el Desarrollo Sostenible: operacionalización del concepto para Colombia. Universidad del Valle. Colombia 3(5), 139-158. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4776961
- PNUD Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo. Sistemas Solares Térmicos II Guía de diseño e instalación para grandes sistemas de agua caliente sanitaria. Vitacura, Chile: Maval. https://www.cdt.cl/?post_type=dlm_download&p=76537
- Quinga S, S. (2018). Simulación multifísica para un colector solar lineal y uso de nanofluidos. Universidad de las Fuerzas Armadas-ESPE.

https://www.researchgate.net/publication/327545887_SIMULACION_MULTIFISICA_P

ARA_UN_COLECTOR_SOLAR_LINEAL_Y_USO_DE_NANOFLUIDOS

Ramón A, J. (2018). Filosofía de la Naturaleza. Universidad de León. España.

REN21. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2015). *Reporte de la Situación Mundial de las Energías Renovables 20*15 (RENEWABLES 2015 GLOBAL STATUS REPORT). España. http://www.ren21.net/wp-content/uploads/2015/07/GSR2015_Key-Findings_SPANISH.pdf

- REN21. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century (2017). Puntos destacados del reporte de REN21 sobre la situación mundial de las energías renovables 2017 en perspectiva. https://www.ren21.net/wp-content/uploads/2019/05/GSR2017_Full-Report_English.pdf
- Riechmann J. (2011). La ecología de Marx (y Engels). La Oveja Roja, Madrid 2011 Capítulo 6 de El socialismo puede llegar sólo en bicicleta. http://tratarde.org/wpcontent/uploads/2015/11/Cap%C3%ADtulo-6-de-El-socialismo-puede-llegars%C3%B3lo-en-bicicleta-J.-Riechmann.pdf
- Ríos Villacorta, A. (2016). *Futuro de la Energía en Perú: Estrategias energéticas sostenibles*. International Rivers, Forum Solidaridad Perú. https://www.internationalrivers.org/wpcontent/uploads/sites/86/2020/06/estudio_-_futuro_de_la_energia_en_peru_-_alberto_rios._fsp_-_ir_0.pdf
- Roche D. L, Hernández T., J.P. y García R. A. *Diseño conceptual de secador solar a escala piloto para algas marinas*. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química y Farmacia, Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas. Cuba. lisetr@uclv.cu. http://scielo.sld.cu/pdf/rtq/v37n2/rtq03217.pdf.

Rodríguez Ubiñas, E. I. (2015). Almacenamiento de energía térmica por calor latente en los edificios: bases para la optimización de aplicaciones pasivas, opacas y traslúcidas [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, España].
https://dialnet.unirioja.es/servlet/tesis?codigo=116576

- Rodríguez V, C. Aprovechamiento energético máximo de los PCMs en módulos fotovoltaicos integrados en la edificación. Aplicación a 6 ciudades. [Archivo PDF]. http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4933/fichero/PFC%252F4.pdf
- Rosental M. y Iudin P. (1946). *Diccionario Filosófico Marxista*. Ediciones Pueblos Unidos, Montevideo. Uruguay.
- Sánchez H, A. (2016). Influencia del tipo y nivel de mallado sobre el valor y la ubicación de los puntos calientes de un devanado de un transformador de potencia. Universidad de Cantabria. España
- Santandreu N, M. (1992). El concepto de técnica en Ortega y Gasset. *Taula, Quaderns de pensament*. (17-18), 157-162. https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=125989
- Serrano B. P. (1985). *Función de las tecnologías apropiadas en el medio ambiente*. Centro de Estudios de Tecnologías Apropiadas para América Latina (CETAL).
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) (2013) y la Dirección General de Electrificación Rural (DGER-MEM). *Atlas de Energía Solar del Perú*. https://deltavolt.pe/atlas/atlassolar/radiacion-departamento
- Shabtay Y. L. y Black J., R.H. (2013). Compact hot water storage systems combining copper tube with high conductivity graphite and phase change materials. Energy Procedia 48:423–430.

https://www.researchgate.net/publication/261291579_Compact_Hot_Water_Storage_Sys tems_Combining_Copper_Tube_with_High_Conductivity_Graphite_and_Phase_Change _Materials

Schallenberg J., Piernavieja G., Hernández C., Unamunzaga P., García R., Díaz M., Cabrera D.,
Martel G., Pardilla J. y Subiela V. (2008). *Energías renovables y eficiencia energética*.
Edición Instituto Tecnológico de Canarias, S.A. España

- Siqueira da Silva, J.F. (2015). *Marx y la ontología del ser social*. I Congreso Latinoamericano de Teoría Social, Universidad de Buenos Aires, Argentina. [Archivo PDF]. https://cdsa.aacademica.org/000-079/9
- SPOTLIGHT *Enfoques sobre Desarrollo Sostenible* (2017). En defensa del interés público Privatización, partnerships, apropiación empresarial y su impacto sobre la sustentabilidad y la desigualdad: evaluaciones y alternativas. Informe del Grupo de Reflexión de la Sociedad Civil sobre la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible. [Archivo PDF]. https://www.2030spotlight.org/sites/default/files/download/Spotlight_Report_2017_esp.pdf
- Torres G., R, Miranda L., P.J. y Martínez P., K.A. (2017). Diseño y construcción de un sistema híbrido de calentamiento de aire por combustión de biomasa y radiación solar, utilizando PCM como fuente de almacenamiento térmico, para secado de yuca. *TecnoLógicas*. 20 (39).
- Transforming our World: the 2030 Agenda for Sustainable Development. Resolution adopted by the General Assembly September 25, 2015. Available at: http://unctad.org/meetings/en/SessionalDocuments/ares70d1_ru.pdf
- United Nations Millennium Declaration. . Resolution adopted by the General Assembly September 18, 2000. Available at: http://www.un.org/ru/documents/ods.asp?m=A/RES/55/2
- UNESCO. La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura.
 (2005). *Guías de Uso de Cocinas, Hornos y Secaderos Solares*. Asunción, Paraguay.
 [Archivo PDF]. https://energiasinfronteras.org/wp-content/uploads/2020/03/GuiaSecadoV3.pdf

- Vélez Agudelo, C. (2018). Conductividades térmicas de sistemas con cambio de fase: nano-fluidos y nano-compuestos [Tesis Doctoral, Universidad Complutense De Madrid, España]. https://eprints.ucm.es/id/eprint/47591/1/T39914.pdf
- Ventura Ayala, C.E. (2015). Propiedades Físicas y Mecánicas de la Roca Volcánica del Cerro Acuchimay para el Diseño de Concreto Liviano en la Ciudad de Ayacucho, Perú [Tesis de Pregrado, Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú]. http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/801
- Vidal J. B. (2007). Modelización del cambio de fase sólido líquido. Aplicación a sistemas de acumulación de energía térmica [Tesis Doctoral, Centre Tecnologic de Transferencia de Calor Departament de Maquines i Motors Termics Universitat Politecnica de Catalunya]. https://www.tdx.cat/handle/10803/6693#page=1
- Zach,J., Korjenic,A., Petránek,V., Hroudová, J. y Bedna R., T. (2012). Performance evaluation and research of alternative thermal insulations based on sheep wool. *Energy and Buildings*, (49) 246-253. https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778812000916
- Zareaian, S y Aziz, K. (2013). The Role of Climate Factors on Designing and Constructing Buildings (From Urbanization Architecture Approach). Bulletin of Environment, Pharmacology and Life Sciences Bull. Env. Pharmacol. Life Sci., 3 (1), 197-200.
- Zelota Vargas, V. A. (2013). Morteros acumuladores con parafina microencampsulados para el aprovechamiento de la energía solar en suelos radiantes [Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. España]. https://oa.upm.es/21573/

IX. Anexos

Anexo A. Ficha Técnica de los Instrumentos a Utilizar

Instrumentos para el Registro de Datos

Registrador de temperatura multicanal EBI 40

Registrador de temperatura multicanal 12 canales de temperatura / ajuste de cuota de medición / lectura de valores actuales en pantalla TFT / puerto USB para conexión a PC o lápiz de memoria / registrador de datos para 20 000 valores por canal

Especificaciones técnicas

Número de canales	12 (EBI 40 TC-2)
Memoria	20 000 valores de medición por canal
Rango de medición	-200 +1200 °C
Precisión	\pm 0,5 °C (a 25 °C sin sensor)
Resolución	0,1 °C
Sensores	termoelemento tipo K
Cuota de medición	ajuste de 0,1 s hasta 24 h
Modo de medición	medición continua inmediata hasta que la
	memoria se llena, medición inicio / fin
Pantalla	TFT 3,5 ", 324 x 240 píxeles, colores 262 k
Interfaz	USB
Teclas	4 teclas (ESC, OK, up, down)
Temperatura de almacenamiento	0 60 °C
Temperatura operativa	0 60 °C

KD2 Pro

Instrumento de medida de la Conductividad Térmica y Resistividad Térmica en sólidos porosos y líquidos. KD2 Pro mide la Conductividad Térmica, Resistividad Térmica, Calor Específico y Difusividad Térmica

KD2-Pro-conductividad-termica

El principio de medida se basa en el método de la fuente de calor transitoria "Transient Line Heat Source". KD2 Pro mide en intervalos de 1sg durante un ciclo de calentamiento y enfriamiento de 90 sg.

KD2 Pro cumple las especificaciones del standard IEEE 442-1981 y del ASTM D5334-08. El usuario puede ver los valores directamente en la pantalla del equipo y descargar los registros para su análisis. El medidor también puede funcionar en modo automático.

Sensores:

SH-1: 3mm Dual SENSOR (conductividad térmica, difusividad térmica y calor específico)para sólidos porosos

TR-1: 100mm Single SENSOR (conductividad térmica y resistividad térmica) - para suelos, hormigones, lechadas, roca y materiales de construcción

RK-1: 60mm longitud y 3,96 diámetro, ROCK SENSOR (Conductividad Térmica y Resistividad Térmica) - para probetas de hormigón, materiales duros y rocas

KS-1: 60mm Single Sensor (Conductividad Térmica y Resistividad Térmica) - para líquidos y nanofluidos

Intervalo de medida

Conductividad térmica: 0,02 a 2 W/m·°C

Resistividad térmcia: 0,5 a 50 m·C/W Calor específico: 0,5 a 4 MJ/m³·°C Difusividad térmica: 0,1 a 1,0 mm²/s **Precisión** 7% calor específico 5% conductividad térmica / Resistividad térmica

7% Difusividad térmica

Estación Meteorológica: Vantage Pro2 Sensor Suite

La Suite de Sensores Integrados incluye los sensores de lluvia, temperatura y humedad, anemómetro, UV y sensores de radiación solar.

Dirección del Viento: Mide la dirección del viento en los puntos o grados de la brújula.

Velocidad del viento: Los componentes resistentes resisten los vientos de huracán, pero son sensibles a la brisa más ligera. Registra velocidades del viento tan bajas como 1 mph (1 km / h) y es prueba de túnel de viento a 320 km / h (200 mph).

Recolector de lluvia: La cuchara de vaciado autovaciable mide la lluvia en incrementos de 0,01 pulgadas. La versión métrica mide en incrementos de 0,2 mm.

Temperatura / Humedad relativa: Proporciona una lectura de temperatura externa de -40°F a 150°F (-40°C a 65°C). También mide la humedad relativa del 1 al 100%.

Radiación solar y sensores UV: Agrega sensores opcionales para rastrear la radiación solar, la evapotranspiración y los índices UV. Las medidas de tiempo son programables para satisfacer tus necesidades específicas.











Anexo C. Temperatura en el secador solar utilizando el módulo con PCM y libre



















Anexo D. Ubicación de la Ciudad de Ayacucho