



Diseño y montaje de un pasteurizador solar y evaluación en el tratamiento de leche de cabra

Design and installation of a solar pasteurizer and evaluation in goat's milk treatment

Antonio Saldaña-Carranza^a; Diego Sánchez-Zamora^a; Víctor Vásquez-Villalobos^{b,*}; Leslie Lescano-Bocanegra^b; Guillermo Linares-Luján^b

a. Escuela de Ingeniería Agroindustrial. Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú

b. Instituto Regional de Investigación Agraria. Universidad Nacional de Trujillo. Av. Juan Pablo II s/n, Trujillo, Perú.

*Autor para correspondencia: vasquez@unitru.edu.pe (V. Vásquez-Villalobos)

Recibido 1 Septiembre 2015; Aceptado 3 Diciembre 2015

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo fue diseñar e instalar un pasteurizador solar en una zona rural de la provincia de Chao de la Región La Libertad-Perú, en el establo de la familia Vilcachahua (latitud 08°30'37'', longitud 78°39'04''), en el cual se procesó leche de cabra (LC) inmediatamente después de su ordeño. Se evaluó el efecto tiempo-temperatura en la pasteurización de leche y se realizó una comparación económica frente al uso alternativo de gas propano y energía eléctrica como fuente de calor. El pasteurizador contó con colector solar (CS) de 2 m² con inclinación N-S de 13,89°, un tanque acumulador-intercambiador de calor (TAIC) provisto de serpentín de acero inoxidable (SAI) de 9,71 m, por donde circularon 3 *batch* de 10 L de leche a 2,15 L/s. El control de temperatura se realizó con tres sensores LM35 acoplados a una tarjeta Arduino Uno y a un ordenador en la cual se instalaron *drivers* de la tarjeta, el *software* LaVIEW y una interfaz de LabVIEW para Arduino, en donde se realizó la programación gráfica. El pasteurizador solar funcionó 6 horas y debido a las condiciones climáticas (04.03.2015) se utilizó un sistema auxiliar de gas propano por 20 minutos, cumpliéndose el tratamiento térmico temperatura-tiempo de 73 °C por 15 segundos, lo que permitió alcanzar un valor F = 6,6, asegurando la destrucción térmica del microorganismo de referencia *Coxiella burnetti*. La inversión para el montaje del pasteurizador solar para un procesamiento de 30 L/d de leche fue de US\$ 555,56, el que a un precio de venta de 1,22 US\$/L de leche, se recuperaría en 60 días. El sistema de pasteurización solar permite una ganancia de 34,1%, ligeramente menor a un sistema de pasteurización eléctrico con el que se obtiene una ganancia de 35,6%, operando en similares condiciones.

Palabras clave: Pasteurización solar, leche de cabra, sensor LM35, control por computadora, Arduino-LabVIEW.

ABSTRACT

The objective of the present study was to design and install a solar pasteurizer in a rural area of the Chao province in the La Libertad Region - Peru, in the farm of the Vilcachahua family (latitude 08° 30'37'', 78° 39'04''), where goat's milk (GM) was processed immediately after milking. We assessed the time-temperature effect on the milk pasteurization and an economic comparison was carried out between the alternative use of gas propane and electric energy as heat source. The pasteurizer had a solar collector (SC) 2 m² with N-S of 13.89° inclination, an accumulator tank-heat exchanger (ATHE) equipped with a stainless steel coil (SSC) of 9.71 m, where 3 batches of 10 L of milk circulated at 2.15 L/s. Temperature control was carried out with three sensors attached to a LM35 Arduino Uno card and to a computer in which card drivers, LaVIEW software and interface LabVIEW for Arduino were installed, where the graphic programming was carried out. The solar pasteurizer ran for 6 hours and due to the weather conditions (04.03.2015) a propane auxiliary system was used for 20 minutes, which met the heat treatment temperature-time of 73 °C for 15 seconds, allowing us to reach a value F = 6.6 and ensuring the thermal destruction of the micro-organism of reference *Coxiella burnetti*. The investment for the installation of the solar pasteurizer to process 30 L/d of milk was US\$ 555.56, which at a selling price of 1.22 US\$/L of milk, would be recovered in 60 days. The solar pasteurization system generates a profit of 34.1%, slightly less than an electrical pasteurization system which results in a gain of 35.6%, operating in similar conditions.

Keywords: Solar pasteurization, goat milk, LM35 sensor, computer control, Arduino-LabVIEW.

1. Introducción

Resulta innegable el aporte de la leche de cabra (LC) al bienestar nutricional y económico de la humanidad, aunque las cabras han sido las especies domesticadas más ignoradas en muchas partes del mundo (Kaliankar *et al.*, 2016), en muchos países en desarrollo, especialmente en el Mediterráneo, Oriente Medio, Europa oriental y países de América del sur, la LC ha jugado un papel muy importante en la salud, bienestar y nutrición de los jóvenes y personas de avanzada edad. La LC también ha sido reconocida por sus efectos benéficos y terapéuticos en personas que padecen de alergia a la leche de vaca (LV). Estos efectos benéficos y potencialidades valoran a la LC y a sus productos (Ribeiro y Ribeiro, 2010). Según Kaliankar (2016) los glóbulos de grasa de LC se asemejan a los de LV en la composición lipídica y las propiedades de la membrana del glóbulo, pero la LC carece de “aglutinina” que ocasiona que los glóbulos de grasa de LV se agrupen cuando se enfrían. Otros carbohidratos diferentes a la lactosa encontrados en LC son oligosacáridos, glicopéptidos, glicol-proteínas y nucleótidos-azúcar en pequeñas cantidades. Oligosacáridos de la LC tienen considerables propiedades antigénicas y son valiosas para la promoción del crecimiento de la flora intestinal de los recién nacidos. La LC y sus productos especialmente procesados son muy útiles como alimentos funcionales. Por sus características químicas la LC puede utilizarse en la fabricación de una amplia variedad de productos, incluyendo productos fluidos para beber (baja en grasa, fortificados o saborizados) leche UHT (*Ultra High Temperature*), productos fermentados tales como el queso, suero o yogur; congelados como los helados o yogur helado, mantequilla, productos condensados/deshidratados, dulces y caramelos. Así como productos cosméticos para el cuidado del pelo que han concitado la atención (Ribeiro y Ribeiro, 2010). Según reporta la FAO (2001) debido al crecimiento poblacional, y por especial interés en los países desarrollados hacia los productos de la LC, especialmente por sus derivados como son el queso y el yogur, la demanda de LC se ha incrementado, debido

a que pueden ser consumidos por grupos de personas que presentan intolerancia a los lácteos de origen bovino (FAO, 2001). Sin embargo, productos de alta calidad solamente pueden obtenerse de LC de buena calidad. La calidad de la leche debe tener el potencial para tolerar el tratamiento tecnológico y ser transformados en productos que satisfagan las expectativas de los consumidores, en términos de atributos nutricionales, higiénicos y sensoriales (Ribeiro y Ribeiro, 2010). No pueden existir productos especializados de leche de alta calidad, si de partida no existen cabras saludables para los procedimientos higiénicos de ordeño y buenas prácticas de fabricación. La salud del rebaño debe ser de vital importancia para cualquier productor, especialmente donde la leche cruda se utiliza para hacer quesos frescos tipo *chevre* (Ribeiro, 2008). Buenas prácticas de ordeño son extremadamente importantes en la sanidad de la ubre y la producción eficiente para evitar las pérdidas de leche y dinero debido a que las cabras desarrollan mastitis (Ribeiro, 1997). La limpieza de las ubres antes de ordeñar es obligatoria, con especial atención al final de las tetillas, utilizando soluciones para pezones, seguidas de su secado con toallas de papel, evitando residuos en leche. La persona encargada de ordeño debe ser sana, no fumador, debe lavarse las manos cuidadosamente y vestir ropa limpia. Es importante en el ordeño que el primer chorro de leche a ser recolectado, se realice en un recipiente de fondo negro con el objeto de observar las anomalías en la leche y descartar leche con alto contenido bacteriano. Ribeiro (1997) recomienda realizar test CMT's (*California Mastitis Test*) mediante el cual el ordeño debe ser rápido y tranquilo, con el fin de extraer toda la leche. Después del ordeño es importante realizar un procedimiento de inmersión de los pezones en una solución de glicerinato de yodo, asegurándose que las cabras no se acuesten durante 30-60 min. Un buen enfoque es alimentar con dieta de regreso al establo después del ordeño. El almacenamiento de la leche es importante ya que en el ordeño la leche mantiene la temperatura corporal y para mantener la calidad y sabor es necesario refrigerar a 4°C tan pronto como sea posible, a fin de

controlar la actividad de la lipasa y cambios microbiológicos en el tanque de leche. Igualmente, antes de consumirse la leche, debe ser pasteurizada para evitar las enfermedades zoonóticas que se propaga a los seres humanos. Pasteurización es un tratamiento térmico suave aplicado para garantizar la seguridad microbiana y proporcionar a la leche una vida útil más larga. En este proceso, la leche es calentada a 72 °C por 15 segundos o 63 °C por 30 minutos (Wayua *et al.*, 2012) y a través de este tratamiento, la leche, desde un punto de vista de salud pública, es segura para el consumo. Franco *et al.* (2008) sostienen que la pasteurización de la LC requiere una temperatura de 63 °C durante 30 minutos en un proceso suave “al baño María”, un proceso lento en el que temperatura debe ser controlada para evitar cambios sustanciales en las propiedades de la leche, especialmente su color y sabor. Sostienen que las temperaturas deben superar los 62 °C para inactivar los microorganismos que son perjudiciales para la salud humana; sin embargo, no debe exceder 65 °C durante más de 5 minutos si las propiedades de la leche han de preservarse. Se recomienda ciertas normas para llevar a cabo la pasteurización. Destruir el *Mycobacterium tuberculosis* y conservar las propiedades físicas de la leche. Siendo posibles tres tipos de pasteurización: (a) pasteurización de baja temperatura, que se realiza a 63 °C durante 30 minutos, (b) pasteurización a alta temperatura 72 °C durante 15 segundos (c) pasteurización de *flash*, en la que una capa muy fina de leche se pone a 75 °C por un tiempo breve.

Por otro lado, el riesgo de la zoonosis ha aumentado debido a la globalización y al movimiento geográfico de los seres humanos, animales y mercancías. Enfermedades que antes eran confinadas a áreas geográficas específicas, ahora son capaces de distribuirse rápidamente por modernos sistemas de transporte (Acha y Szyfres, 2003). Productos de LC se consumen en muchas sociedades alrededor del mundo como bebidas de leche, productos lácteos fermentados y quesos. Por lo tanto, la leche de cabra podría servir como un vehículo potencial para la transferencia de zoonosis, especialmente debido a que las cabras

constituyen una actividad importante en países donde la medicina veterinaria no es óptima. La barrera tecnológica clave para reducir el riesgo de propagación de zoonosis a los consumidores, es el tratamiento térmico ampliamente adoptado, hervir la leche o realizar la práctica más sofisticada de la pasteurización. Las zoonosis más comunes conocidas con leche de cabra son Brucelosis, fiebre Q y toxoplasmosis (Acha y Szyfres, 2003). La fiebre Q es causada por la bacteria *Coxiella burnetii*, el cual es un pequeño bacilo Gram-negativo, con dos fases de crecimiento, así como una forma de esporas inactivas en el suelo. Puede sobrevivir a los desinfectantes corrientes y es resistente a muchos cambios en el ambiente (Ryan y Ray, 2004; Sankaran, 2000). Según Thompson y Thompson (1990) la base de una pasteurización efectiva es la cantidad de calor necesaria para inactivar *Coxiella burnetii*.

Tortora *et al.* (2007) señalan que la temperatura de pasteurización de la leche que en un principio estaba destinado a eliminar el bacilo de la tuberculosis, se elevó levemente en 1956 para asegurar la destrucción de la *Coxiella burnetii*. Así, en el transcurso de los años, poco a poco se ha ido incrementando el interés por desarrollar nuevas tecnologías que benefician el proceso de pasteurización en la leche, entre estos procesos se ha venido estudiando los procesos de altas presiones hidrostáticas, campos eléctricos pulsados, esterilizador óhmico, pasteurizador eléctrico de placas, pasteurización por luz pulsada y pasteurización solar (Zabala, 2005). También hay que tener presente que ocasionalmente la ubre de los animales lactantes se puede infectar con *Streptococcus hemolíticos* de origen humano, que puede provocar epidemias transmitidas de fiebre escarlata o faringitis séptica (Leedom, 2006). El problema más frecuente de contaminación bacteriana transmitida por la LC es toxicosis alimenticia y la causa más frecuente es la presencia de *Staphylococcus aureus* y su enterotoxina en leche y productos lácteos (Cremonesi *et al.*, 2007). Sin embargo, hay reportes ocasionales o incluso brotes de toxicosis alimenticia con otros patógenos, como *Escherichia Coli*

(Espie *et al.*, 2006), coliformes (Cortés *et al.*, 2005; Muehlherr *et al.*, 2003; Picozzi *et al.*, 2005), *Salmonella enterica* serotipo paratipo B (Desenclos *et al.*, 1996) y *Streptococcus equi* subespecie *zooepidemicus* (Francis *et al.*, 1993; Kuusi *et al.*, 2006). Además, existen varios informes sobre la presencia de *Listeria monocytogenes* en leche cruda (Leedom, 2006; Foschino *et al.*, 2002; Soncini y Valnegri, 2005). Esta bacteria gram-positiva puede infectar a los recién nacidos por vía vaginal, causando meningitis; en este sentido se recomienda que las madres embarazadas no consuman quesos blandos como Brie, Camembert, feta y “queso blanco fresco”, que pueden estar contaminados y permiten el crecimiento de *L. monocytogenes* (Genigeorgis *et al.*, 1991). Leedom (2006) menciona que, como regla general, las infecciones con patógenos de la leche y productos lácteos normalmente sólo suceden en casos donde las víctimas beben leche no pasteurizada o comen queso fresco elaborado con leche sin pasteurizar. La aplicación de tratamientos de alta temperatura como el UHT, implican un costo muy elevado, lo que impide de forma directa la construcción de diversas plantas en diversos lugares. La centralización del proceso de tratamiento de la leche requiere una serie de condiciones de transporte (refrigeración fundamentalmente), que llevan asociado un costo extra al tratamiento centralizado UHT (Vicario, 2013). Wayua *et al.* (2011) mencionan que proveedores de leche en las tierras áridas y semi-áridas de Kenia (este del África), generalmente hierven la leche en puntos de recogida usando leña, que exacerba la degradación ambiental en el entorno ya frágil. Por lo tanto, tecnologías alternativas de energía barata y renovable como la energía solar, pueden ser utilizadas por los pequeños agricultores y comerciantes que participan en su comercialización. La energía solar térmica de baja temperatura consiste en la transformación de la radiación solar en energía térmica empleando como fluido caloportador, en la mayoría de los casos, agua. Con las siguientes ventajas: sostenibilidad en el tiempo ya que la fuente de energía es el Sol y por tanto inagotable; disponibilidad

espacial elevada de la fuente de energía, en localizaciones remotas; prácticamente con nulo impacto ambiental; no contribuye al efecto invernadero, aunque habitualmente es necesario utilizar una bomba impulsada eléctricamente y/o el aporte de una fuente auxiliar, y dependiendo del tipo, en proporciones pequeñas como una resistencia eléctrica o una caldera diésel, el único impacto ambiental puede ser el visual; permite ahorro de combustible, lo cual supone un ahorro económico y ecológico, pues se evitan las emisiones de dióxido de carbono derivados de la combustión de combustibles fósiles; también ahorro en divisas, pues no precisa de importaciones de combustibles fósiles; disminución de la dependencia energética del país con el exterior; generación de empleo tanto en la construcción del sistema, como en la instalación y el mantenimiento. Entre los inconvenientes se tiene: elevado costo de inversión inicial; dificultad de almacenamiento; necesidad de una gran área de superficie para la instalación; disponibilidad temporal de la fuente de energía variable, depende de las variaciones naturales como son día-noche, nublado-soleado, invierno-verano (Vicario, 2013). En el marco de esta concepción Franco *et al.* (2008) han reportado pasteurización de LC utilizando un concentrador solar de bajo costo. El que funcionó con un concentrador de rayos parabólico de espejos, dirigidos a un vaporizador tubular que posibilitó la formación de vapor, para el calentamiento de la leche a 63 °C por 30 minutos, asegurando una pasteurización exitosa. La energía solar es el recurso energético con mayor disponibilidad en casi todo el territorio peruano (Loayza, 2012) y en la gran mayoría de localidades del Perú, la disponibilidad de la energía solar es bastante grande y uniforme durante todo el año, comparado con otros países, lo que hace atractivo su uso. En términos generales, se dispone, en promedio anual, de 160 a 210 W/m² en la costa y selva, y de 210 a 250 W/m² de Norte a Sur. Esto implica que la energía solar incidente en pocos metros cuadrados es, en principio, suficiente para satisfacer las necesidades energéticas de una familia (Mendia, 2006; Loayza, 2012).

El objetivo del presente trabajo fue diseñar e instalar un pasteurizador solar en una zona rural, evaluar el efecto tiempo-temperatura en la pasteurización de leche de cabra (LC) y realizar una comparación económica frente al uso alternativo de gas propano y energía eléctrica como fuente de calor.

2. Materiales y métodos

La investigación se realizó en una zona rural de la provincia de Chao de la Región La Libertad-Perú, en el establo de la familia Vilcachahua (latitud 08°30'37'', longitud 78°39'04''), utilizando leche fresca de cabra inmediatamente después de su ordeño.

2.1. Materiales

Colector solar (CS) de 1x2 m montado de acuerdo al diagrama de la Figura 1. Construido con tubería de cobre y accesorios "T" de 3/8'', impregnados con pintura mate anticorrosiva de color negro y cubierto con lámina de vidrio semidoble, para lograr un efecto invernadero y aumentar la eficiencia de captación de energía. Tanque acumulador-intercambiador de calor (TAIC) cerrado, de material plástico con capacidad de 60 L.

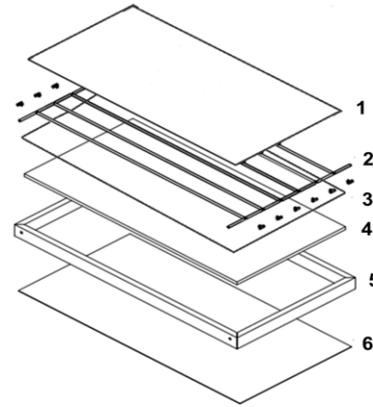


Figura 1. Estructura del colector solar (CS): 1) lámina de vidrio, 2) parrilla de cobre, 3) lámina de aluminio, 4) fibra de vidrio, 5) marco de soporte estructural, 6) lámina galvanizada de zinc.

Soporte del TAIC acoplado a una hornilla de gas propano. Serpentín de acero inoxidable (SAI) de 1/2'', con dos secciones de 5,93 m unida mediante una T a la siguiente sección de 3,78 m (Figura 2). En la T se conectó un sensor de temperatura. Tanque alimentador de leche sin pasteurizar (TALSP) de polipropileno, de 10 L de capacidad. Tanque receptor de leche pasteurizada (TRLP) de acero inoxidable, de 10 L de capacidad. Válvulas de compuerta (V_1) y de globo (V_2 y V_3) de 1/2''. Sensores LM35.

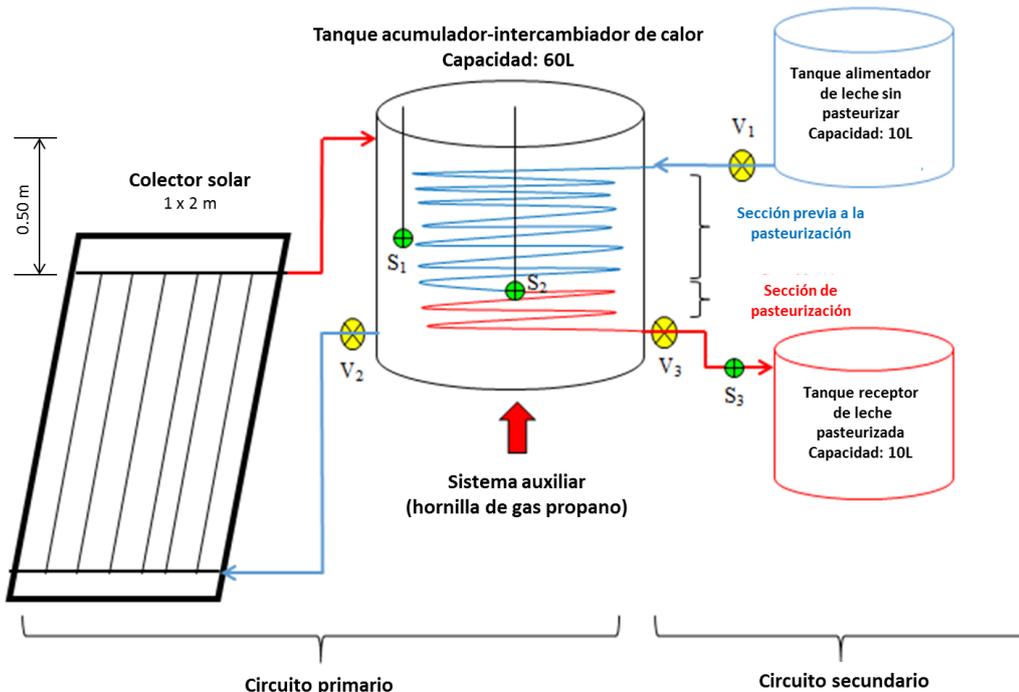


Figura 2. Diagrama del pasteurizador de leche de cabra (LC) con los equipamientos de los circuitos primario y secundario.

2.2. Equipos

Pasteurizador de LC, montado de acuerdo al diagrama de la Figura 2. Con dos circuitos: primario en donde se capta la radiación solar que se convierte en energía térmica y; secundario donde se efectúa la pasteurización de la leche por transferencia de calor. El circuito primario equipado de un CS, TAIC y sistema auxiliar. El sistema secundario equipado con TALSP, SAI y TRLP. Los circuitos estuvieron conectados a una válvula compuerta V_1 y dos válvulas de globo V_2 y V_3 ; tres sensores de temperatura LM35: S_1 , S_2 y S_3 ; que reportaron los valores del agua en el TAIC, así como de la leche cuando alcanzó la temperatura de pasteurización y a la salida del SAI.

2.3. Metodología

2.3.1. Diseño del colector solar (CS)

Considerando una irradiación solar promedio de 200 W/m^2 en el distrito de Chao (Loayza, 2012), se estimó un CS receptor de energía de 2 m^2 , que posea la capacidad de elevar la temperatura del agua circulante en el TAIC con un volumen de 60 L hasta $78 \text{ }^\circ\text{C}$. Para la determinación de la inclinación adecuada del CS, se calculó la declinación, ángulo hora solar y ángulo cenit. Posteriormente se calculó el ángulo de acimut del sol, con la finalidad obtener la posición correcta para una mejor incidencia de los rayos solares con el CS. La inclinación se realizó con el promedio de días del mes de marzo del 2015, tomando como día ordinal el número 63 (4 de marzo), a la hora inicial de las 10 a.m. Se aplicó este procedimiento de acuerdo a las recomendaciones de Duffie y Beckman (1991) quienes recomiendan que los cálculos de energía solar deben ser tomados a las 10 a.m., debido a que a esa hora se inicia la irradiación. Asimismo, que el sistema debe estar inclinado con vista de Norte-Sur, para que la potencia de irradiación al panel de captación de energía (CS) tenga la mayor eficiencia.

2.3.1.1. Cálculo de ángulo de declinación solar (δ)

La declinación solar es el ángulo que forma el rayo solar con el plano del ecuador en cada época del año (Reyes, 2002), determinando las estaciones climáticas. El ángulo de declinación solar de acuerdo a la ecuación de Cooper (Esteban *et al.*, 2008) es:

$$\delta = 23.45 \text{sen}[360((284+n)/365)] \quad (1)$$

Donde “n” es la fecha ordinal del año. Debido a la inclinación propia de la tierra ($23^\circ 27'$), este ángulo (δ) tiene un valor igual a $-23^\circ 27'$ en el Solsticio de invierno y $23^\circ 27'$ en el Solsticio de verano (Solsticios referidos al hemisferio sur). El cálculo de la declinación solar para el día 4 de marzo del 2015 fue:

$$4 \text{ marzo} \approx n = 63$$

2.3.1.2. Cálculo del ángulo hora solar (ω)

El ángulo hora solar (ω) indica el desplazamiento angular del sol sobre el plano de la trayectoria solar (Rufes, 2010). El desplazamiento angular del sol en el plano del Ecuador celeste es de 180° desde que aparece hasta que se oculta. Se calcula para las 9:00 a.m. debido al inicio del crecimiento exponencial de la potencia de radiación solar, que significa que han transcurrido 9 horas; siendo el ángulo hora solar para las mañanas negativas y las tardes positivas; y a cada hora le corresponde 15° (Fernández, 2006). Las horas transcurridas significan el producto del valor del ángulo generado por cada hora. Se tomó como horas de mayor intensidad de radiación solar el intervalo de 10:00 a.m. a 5:00 p.m.

$$\alpha (-) \implies -n * 15^\circ = -105^\circ$$

n = Número de horas pasadas de 10:00 a.m. a 5:00 p.m. = 7 horas

$$\alpha (+) \implies 180^\circ \text{ (Desplazamiento angular del sol en el plano del ecuador celeste).}$$

Según Fernández (2006), el cálculo de ángulo hora solar está dado por:

$$\omega = 180^\circ + (-n * 15) \quad (2)$$

2.3.1.3. Cálculo del ángulo cenit (θ_z)

El ángulo cenital solar θ_z es el que forma la radiación directa del sol y la vertical del equipo, en el punto más elevado del CS en la cubierta de vidrio (Fernández, 2006). El ángulo cenital depende también de la latitud, de la declinación y del ángulo hora solar del establo Vilcachahua en el distrito de Chao. Se calculó empleando la expresión (Vorontsov, 1979):

$$\cos\theta_z = \cos\Phi * \cos\delta * \cos\omega + \sin\Phi * \sin\delta \quad (3)$$

Φ : Latitud del establo Vilcachahua en distrito de Chao ($08^{\circ}30'37$)

2.3.1.4. Cálculo del ángulo acimut del sol (Ψ_s)

Este ángulo se utiliza en la determinación de la posición del CS con respecto al ángulo cenit, el cual depende de la latitud, la declinación y del ángulo hora solar del establo de Vilcachahua en el distrito de Chao (Figura 3), permite obtener la mejor incidencia de radiación en el CS; la cual está en relación directa con el rendimiento. Se calcula con la siguiente relación (Fernández, 2006):

$$\sin(\Psi_s) = (\cos\delta * \sin\omega) / (\sin\theta_z) \quad (4)$$

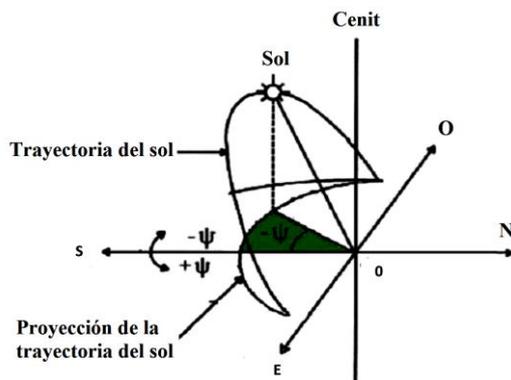


Figura 3. Determinación del ángulo acimut del sol para la posición del colector solar (CS) (Fernández, 2006).

A la salida del sol el ángulo acimutal (color verde) es menor que 90 grados. En el caso de la Figura 3 corresponde a una hora determinada de la tarde debido a que en su recorrido sobrepasó el mediodía. En el

origen de coordenadas (situación del observador), el ángulo acimutal (Ψ) mide el desplazamiento del Sol respecto al Sur. Al mediodía, este ángulo es cero (el sol está en el Sur). El ángulo acimutal para la hora de salida del sol varía cada día del año.

2.3.1.5. Cálculo del ángulo de inclinación del colector solar (Π)

El ángulo de inclinación del CS es el ángulo formado entre la superficie del suelo (donde reposa el colector) y el colector. Para lo cual se consideran los parámetros mencionados, procurando que la incidencia solar sea mayor para obtener la máxima eficiencia del colector. Para la inclinación del CS (ángulo de interés), se calculó, teniendo en consideración la incidencia del cenit en la parte más elevada del colector. El ángulo Π es el producto de la diferencia de las sumas internas de un triángulo de 180° menos el doble del ángulo cenital (Figura 4).

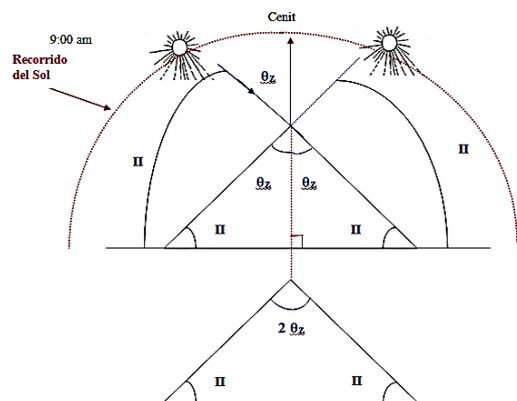


Figura 4. Visualización del ángulo de inclinación del colector solar (CS) a partir de la relación de ángulos internos de un triángulo (Fernández, 2006).

De la Figura 4 se puede deducir por relación de la suma de ángulos internos del triángulo, la determinación del ángulo de inclinación del CS (considerando que el ángulo cenit θ_z y el ángulo de inclinación CS son complementarios) de acuerdo a:

$$2\Pi + 2\theta_z = 180^{\circ}$$

$$2(\Pi + \theta_z) = 180^{\circ}$$

$$\Pi + \theta_z = 90^{\circ}$$

2.3.2. Diseño del serpentín de acero inoxidable (SAI)

Se calculó la longitud del SAI, aplicando los principios de transferencia de calor convectiva-conductiva y el tiempo de retención (mantenimiento de temperatura) en la tubería durante la pasteurización, fijando el tiempo-temperatura de destrucción térmica de la *Coxiella burnetti*.

2.3.2.1. Longitud del SAI previa a la pasteurización

Para determinar la longitud del serpentín se utilizó:

$$A = Q/(U \cdot T_m) \quad (5) \quad \text{y} \quad L' = A/(\pi \times D) \quad (6)$$

Dónde:

A : Área interna del serpentín (m²)

L': Longitud del serpentín para llegar a la temperatura de pasteurización (m)

D: Diámetro del serpentín (m)

Q: Calor necesario para pasteurizar (J/s)

U: Coeficiente Global de Transmisión de Calor (W/K.m²)

T_m: Temperatura Media Logarítmica (K)

2.3.2.2. Tiempo de muerte térmica (F_T)

Es el tiempo necesario para reducir la población microbiana hasta un valor pre establecido. Se tomó como referencia los parámetros de termodestrucción de la bacteria *Coxiella burnetti*, usada en el control de la leche de cabra (Tortora *et al.*, 2007) aplicándose:

$$F_T = n \times D_T \quad (7)$$

Dónde:

D_T: tiempo de reducción decimal a la temperatura del tanque intercambiador de calor (minutos).

n: grados de reducción logarítmica (6 - 8 log)

$$D_T = D_{T^*} \times 10^{\frac{T-T^*}{Z}} \quad (8)$$

Dónde:

D_{T*}: Tiempo de reducción decimal de referencia (4,14 min).

T*: Temperatura de referencia del medio (62,8 °C).

T: Temperatura óptima del TAIC (73 °C).

Z: Número de grados para recorrer 1 ciclo logarítmico (4,34 °C).

Nota: valores estándar, tomados de los trabajos experimentales de Enright *et al.* (1957), para medir la resistencia al calor de *C. burnetti*.

2.3.2.3. Longitud del SAI para la pasteurización

La longitud se determinó utilizando (Ibarz, 2005):

$$L = (Q \times F_T) / A \quad (9)$$

Dónde:

L: Longitud del serpentín (m)

Q: Caudal másico de entrada de leche de cabra (m³).

A: Área transversal del serpentín (m²).

F_T: Tiempo de residencia de leche de cabra en serpentín (s)

2.3.3. Diseño del sistema de control de temperaturas

Para la medición de temperatura dentro del TAIC se instalaron 3 sensores de temperatura LM35 (S₁, S₂ y S₃) (Figura 5) con una precisión de calibración de 1 °C, rango de medición de -55 °C a 150 °C, con salida lineal y equivalencia de 10 mV/°C. Los que fueron conectados mediante 3 cables vulcanizados de 2 metros de longitud a una tarjeta Arduino Uno, la cual dispone de pines de entrada analógica (A0, A1, A2, A3, A4, A5), pines de entrada de potencia de voltaje y tierra (3.3V, 5V, GND, GND, Vin). La tarjeta Arduino fue conectada al ordenador en la cual se instalaron los *drivers* de la tarjeta Arduino, el *software* LaVIEW y la interfaz de LabVIEW para Arduino (Figura 5).

Para la conexión, instalación e implementación del sistema de control se siguieron los siguientes pasos:

- Se soldaron los 3 cables vulcanizados, en uno de los extremos con los pines de polarización de los sensores LM35. En el otro extremo a la tarjeta Arduino Uno. Se conectaron los cables de los pines de la izquierda en la posición 5V (pines positivos: cables de color rojo). Los cables de los pines de la derecha se conectaron en la posición GND (*GROUND*) que significa tierra (cable negro). Los cables de los pines centrales de cada sensor son los encargados de transmitir los datos y se conectaron en las posiciones A₀, A₁ y A₂ (Figura 5).

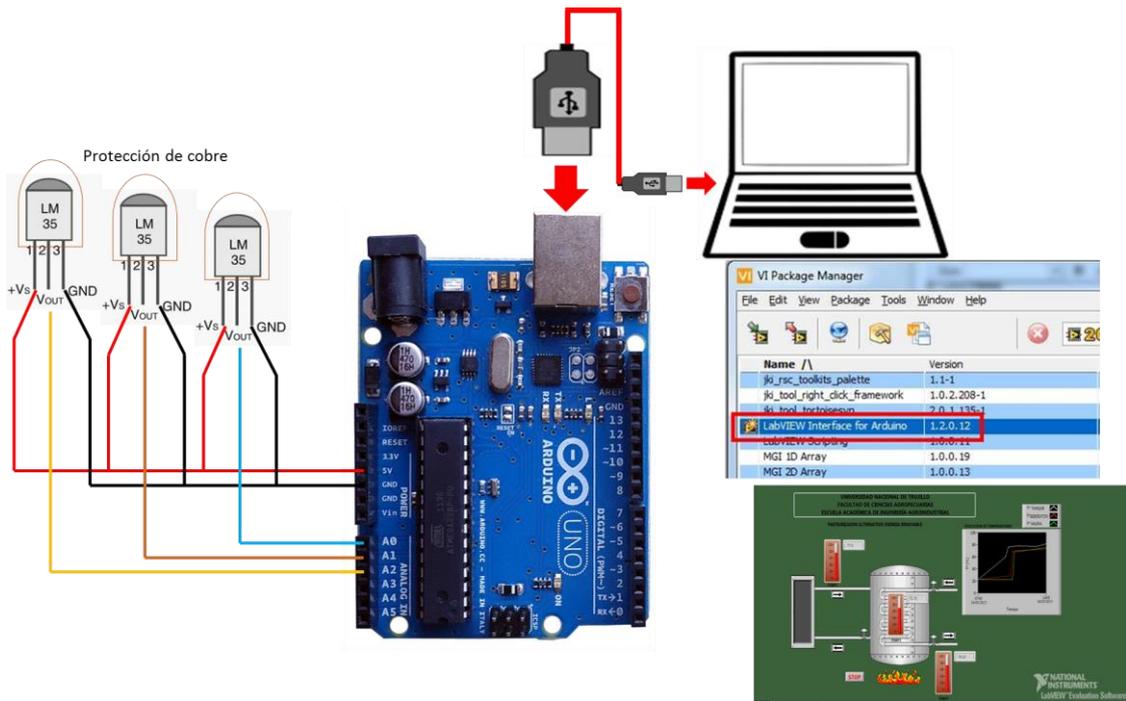


Figura 5. Representación gráfica de las conexiones de sensores LM35, a la tarjeta Arduino Uno y al *software* LabVIEW.

- b. Los pines y los puntos de unión de los sensores al cable vulcanizado se protegieron con silicona inerte fría, protegiéndose con una capucha de cobre para evitar la humedad, tal como se aprecia en la Figura 5 y Figura 10(c).
- c. Se colocaron los sensores S_1 , S_2 y S_3 en los puntos de medición como se muestra en la Figura 1.
- d. Se conectó la tarjeta Arduino Uno al ordenador con una conexión USB en el punto indicado en la Figura 5.
- e. Antes de empezar a trabajar con Arduino se instalaron los *drivers*, ya que el ordenador no reconoce la tarjeta cuando se conecta al USB del ordenador. Para empezar, hay que ir a la página oficial de Arduino (<http://www.arduino.cc>) de donde se descarga el *software* dentro de la opción de *Windows* como un archivo ejecutable o como un archivo ZIP. Dentro del archivo ejecutable, se encuentra tanto el entorno de desarrollo para Arduino, como los *drivers* necesarios para que el dispositivo sea reconocido por el ordenador.
- f. Para que el ordenador reconozca la tarjeta Arduino, se instalaron los *drivers* para el procesador FTDI, estos *drivers* se encuentran dentro de los archivos que se

descargaron (si la descarga se realizó en formato ZIP, se descomprimen la carpeta para acceder a los *drivers*). Al conectar Arduino mediante USB al ordenador, se observa cómo se enciende un LED verde, esto indica que la tarjeta está siendo alimentada correctamente. Al momento de conectar la tarjeta al ordenador, *Windows* muestra un mensaje de que se conectó un nuevo dispositivo y se ejecuta automáticamente el instalador. En caso de la tarjeta USB no es preciso utilizar una fuente de alimentación externa, ya que el propio cable USB, la proporciona. Si fuera necesario el voltaje de la fuente puede estar entre 6 y 25 V. En el asistente de instalación se consignará que no se conecte a internet para buscar los *drivers*, los que se instalarán desde una localización específica, que se encuentra dentro de la carpeta que se descargó anteriormente. Debe indicarse al asistente de instalación, la ubicación de la carpeta que se ha descargado, en cuyo interior se encuentran los *drivers* necesarios para que el ordenador reconozca al Arduino. Lo primero que se tiene que hacer para comenzar a trabajar con el entorno de desarrollo de Arduino es configurar las comunicaciones entre la placa de

Arduino y el ordenador. Para ello se debe abrir en el menú “Tools” la opción “Serial Port”. En esta opción se deberá seleccionar el puerto serie al que está conectado la tarjeta. En Windows, si se desconoce el puerto al que está conectada la tarjeta se puede descubrirlo a través del administrador de dispositivos (Puertos COM & LPT/USB Serial Port).

- g. Para realizar la programación gráfica fue necesario instalar la interfaz de LabVIEW para Arduino (LIFA) Toolkit (<https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-15971>) la cual es una herramienta gratuita que se puede descargar desde el servidor de NI (National Instruments) y que permite a los usuarios de Arduino adquirir datos del microcontrolador Arduino y procesarlos en el entorno de programación gráfica de LabVIEW. Para utilizar la aplicación LIFA no es necesario disponer de una versión comercial de LabVIEW basta con adquirir el software LabVIEW *Student Edition* que se distribuye por destinos medios a un precio muy asequible (*Sparkfun Electronics* lo distribuye junto con la tarjeta Arduino Uno).

La configuración de la Interfaz de LabVIEW para Arduino es un proceso de seis pasos que se tiene que completar una sola vez, de acuerdo a:

- Instalar en el ordenador el *software* LabView (se instaló la versión 2012).
- Instalar los controladores VISA NI: <http://www.ni.com/download/ni-visa-5.0.3/2251/en/>
- Instalar JKI VI *Package Manager* (VIPM) *Community Edition* (gratuito), todos los sistemas operativos: <http://www.jki.net/vipm>
- Instalar la Interfaz de LabVIEW para Arduino como se describe en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/A20FBBD36820669086257886004D5F4D?OpenDocument>
- Conectar la placa Arduino al ordenador como se describe en: <http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/0F9DAADF9055B086D86257841005D1773?OpenDocument>

- Cargar la interfaz de LabVIEW para *firmware* Arduino, en el Arduino como se describe en:

<http://digital.ni.com/public.nsf/allkb/8C07747189606D148625789C005C2DD6?OpenDocument>

- El *firmware* se puede encontrar en <LabVIEW> \ vi.lib Interface \ LabVIEW para Arduino \ Firmware \ LVIFA_Base. Se debe utilizar el IDE de Arduino para implementar este *firmware* de la placa Arduino.
- h. Para poder comunicar LabVIEW con Arduino, previamente, se debe instalar en la tarjeta el *firmware* correspondiente. Para lo cual se debe instalar antes en el ordenador el entorno IDE Arduino. El fichero que se debe cargar en IDE de Arduino para luego descargar en la tarjeta, que se encuentra en la carpeta donde se ha instalado LabVIEW
 ... \National Instruments\LabVIEW 20XX\vi.lib\LabVIEW Interface forArduino\Firmware\LVIFA_Base
- i. Se ejecuta el IDE Arduino y se carga el fichero de acuerdo a:
 - Abrir el IDE Arduino. Pulsando sobre Arduino.exe. Con la opción Fichero->Abrir se busca el fichero LVIFA_Base.pde: Abrir. Ctrl+O.
 - Una vez cargado en el IDE Arduino se selecciona la tarjeta Arduino Uno.
 - Seguidamente se selecciona el puerto con el que se realizará la descarga del *firmware* sobre la tarjeta Arduino: Herramientas, Puerto Serial.
 - Una vez realizadas estas operaciones basta con pulsar el botón de carga de *sketch* del IDE para que el fichero se transfiera a la tarjeta y, una vez transferido, el Arduino está listo para comunicarse con LabVIEW: LVIFA_Base
- j. Finalmente, en el *software* LabVIEW se diseñó el programa gráfico para procesar las lecturas de los sensores LM35 en forma analógica y poder llevarlos a la magnitud física temperatura (numérica/digital) (Figura 6).

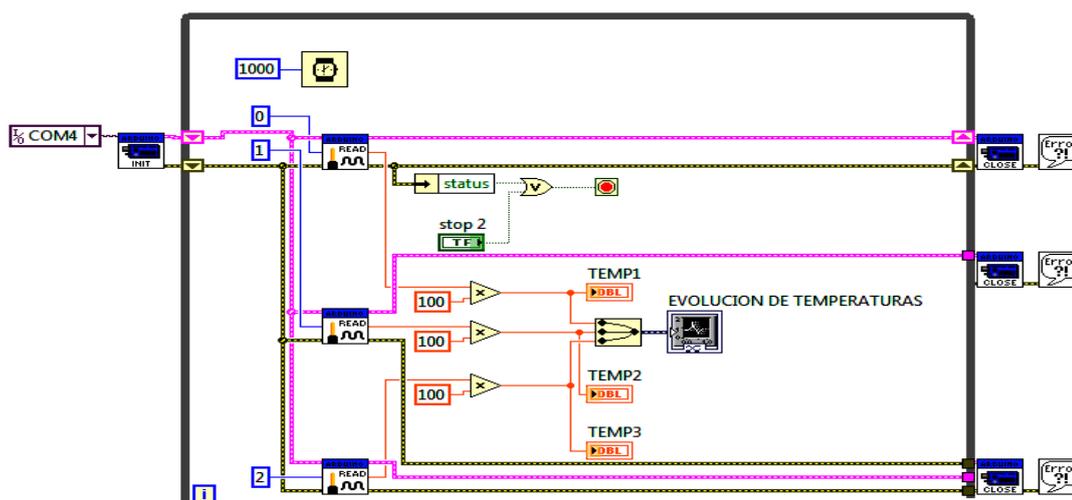


Figura 6. Diseño del programa en el *software* LabVIEW para lectura de los sensores LM35 a través de una tarjeta Arduino Uno.

2.3.4. Operación del pasteurizador solar

- Se verificó el correcto ensamblaje tanto del circuito primario como del circuito secundario y las fugas del recorrido del agua como de la leche al abrir las válvulas V_1 , V_2 y V_3 (Figura 2).
- Se verificó la correcta inclinación ($13,89^\circ$) del CS de Norte a Sur (N-S).
- Se abrió la válvula V_2 a las 6 am (6 horas antes de iniciar la pasteurización) para llegar a la temperatura de tratamiento térmico (mínimo 5 horas de incidencia solar).
- Antes de iniciar la pasteurización se verificó la temperatura del TAIC con el sensor S_1 (73°C). Si la condición climática no era favorable para llegar a la temperatura deseada, se recurrió al sistema auxiliar con gas propano (Fig 2).
- Se vertió la LC (3 *batch* de 10 L cada uno) en el TALSP manteniendo la V_1 cerrada.
- Se abrió la válvula V_1 del TALSP, permitiendo pasteurizar la LC, controlando la temperatura en el punto del SAI donde se encuentra el sensor S_2 y donde se alcanza la temperatura de pasteurización. Se verificó la temperatura a la salida del SAI en el S3 con la apertura/regulación de la V_3 .
- Se recibió la LC en el TRLP, dejándose enfriar a la temperatura ambiente antes de trasladarse a su destino final.

2.3.5. Estudio económico comparativo

Se realizó una comparación económica de los costos de inversión, costos de operación y margen de ganancia del sistema de pasteurización solar frente al uso alternativo de pasteurización con gas propano y energía eléctrica como fuente de calor.

3. Resultados y discusión

De acuerdo al diseño, el equipo contó de un circuito primario, donde el CS calentó el agua recirculante en el TAIC y, un circuito secundario donde se realizó la operación de pasteurización de la LC; la cual fluyó a través del SAI localizado en el interior del TAIC (Figura 7).



Figura 7. Fotografía del equipo pasteurizador: (a) colector solar CS, (b) tanque acumulador-intercambiador de calor TAIC, (c) tanque alimentador de leche sin pasteurizar TALSP, (d) tanque receptor de leche pasteurizada TRLP, (e) sistema auxiliar (hornilla de gas propano).

Se utilizó energía solar como un recurso energético con mayor disponibilidad durante todo el año de manera uniforme comparado con otras regiones del país, lo que hace atractivo su uso (Loayza, 2012).

3.1 Colector Solar (CS)

En la Figura 8 se muestra la secuencia para el armado del colector solar. La Figura 8(c) muestra la parrilla de cobre por donde recircula el agua. Se usó una tubería de cobre, debido a que posee una elevada conductividad térmica $398 \text{ W/m}^\circ\text{K}$. El cobre y sus aleaciones constituyen buenos conductores de calor por los electrones libres que participan en la conducción térmica (Maffia, 2013). En la Figura 8(d) se muestra la lámina de aluminio donde descansa la parrilla de cobre, cuya función es primordial fue captar la energía solar y transferirlo a la tubería de cobre con el agua circulante. La conductividad del aluminio es de $247 \text{ W/m}^\circ\text{K}$ (Maffia, 2013), se utilizó debido a su resistencia a la corrosión, buena conductividad térmica y bajo costo (Fraudita, 2011). En la Figura 8(e) se aprecia que el CS se pintó de color negro, con el objeto de lograr una mejor absorción de energía y evitar pérdidas por reflexión, lo que se tradujo con el calentamiento inmediato del agua (Márquez-Bravo, 2010). De tal forma que, al elevarse el Sol sobre el horizonte en la mañana, el agua aumenta su temperatura hasta llegar a un máximo después del mediodía; luego se enfría al ir declinando el Sol. El pasteurizador solar,

tuvo un área oscura de 2 m^2 , cuya función fue absorber la energía de los rayos solares; ayudado por la lámina de vidrio colocado en su estructura.

3.1.1 Ángulo de inclinación del colector solar

Según Fernández (2006), para calcular la radiación solar incidente sobre una superficie que tiene una determinada inclinación y orientación, es necesario definir algunos términos de la geometría solar, como los ángulos que en ella intervienen. Para el diseño del CS, se calcularon estos ángulos (Tabla 1). El estudio realizado para el diseño y construcción del CS, consideró los límites aplicando los principios de la geometría solar para la provincia de Chao, obteniéndose el ángulo de inclinación del colector solar de $13,89^\circ$ (Tabla 1). Heredia *et al.* (2005) construyeron en la ciudad de Tarapacá-Chile, un sistema de calentamiento de agua con dos colectores solares, los cuales tuvieron una inclinación de 19° orientados hacia el Norte.

Tabla 1. Angulo de inclinación del pasteurizador solar calculados a partir de los parámetros del movimiento solar

δ	φ	ω	θ_z	Ψ_s	Π
$-7^\circ 9'$	$8,112^\circ$	75°	$76,11^\circ$	$80,85^\circ$	$13,89^\circ$

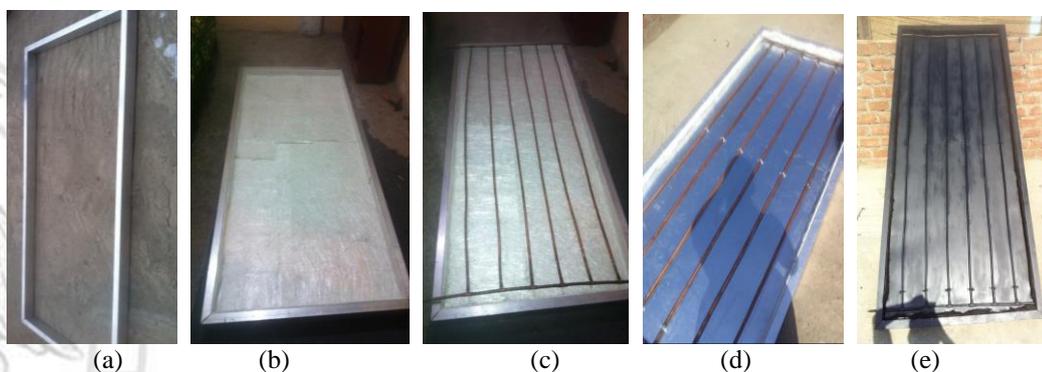


Figura 8. Secuencia del armado de colector solar: (a) marco de colector (b) marco con la fibra de vidrio (c) parrilla de cobre sobre el marco y la fibra de vidrio (d) lámina de aluminio (bajo la parrilla de cobre) (e) panel completo.

3.2. Tanque acumulador intercambiador de calor (TAIC)

El TAIC (Figura 9) tuvo una capacidad de 60 L, colocado a 0.5 m sobre la salida de la tubería de salida del CS (Figura 2), para facilitar la recirculación del agua con el CS.



Figura 9. Tanque acumulador-intercambiador de calor (TAIC).

En la Figura 9 se observa el sistema auxiliar (hornilla con gas propano) cuya función fue proporcionar energía térmica al TAIC en caso de condiciones climáticas desfavorables.

3.3. Construcción del serpentín de acero inoxidable (SAI)

Se estimó la longitud total del SAI en 9,71 m, utilizando las ecuaciones del (5) al (9) (Tabla 2). La LC circuló con un flujo de 2,15 L/min asegurando el tiempo-temperatura de pasteurización del

microrganismo de referencia *Coxiella burnetti* (Tortora *et al.*, 2007).

Tabla 2. Longitud total del serpentín de acero inoxidable (SAI)

L(m)	L'(m)	L _{total} (m)
5,93	3,78	9,71

El SAI se instaló dentro del tanque acumulador-intercambiador de calor de acuerdo a lo mostrado en la Figura 10.

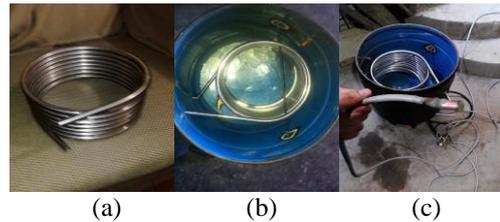


Figura 10. Imágenes del (a) serpentín SAI (b) SAI en el interior del TAIC (c) instalación de los sensores de temperatura.

3.4. Evaluación del Tratamiento Térmico

Se realizaron tres (03) pruebas para la evaluación del tratamiento térmico. Dos (02) pruebas preliminares se realizaron con agua con el objeto de verificar la operación correcta de pasteurización. El proceso principal se inició a las 7:30 horas y se utilizó el sistema auxiliar a las 13:30 horas, ya que el CS no llegó a la temperatura requerida.

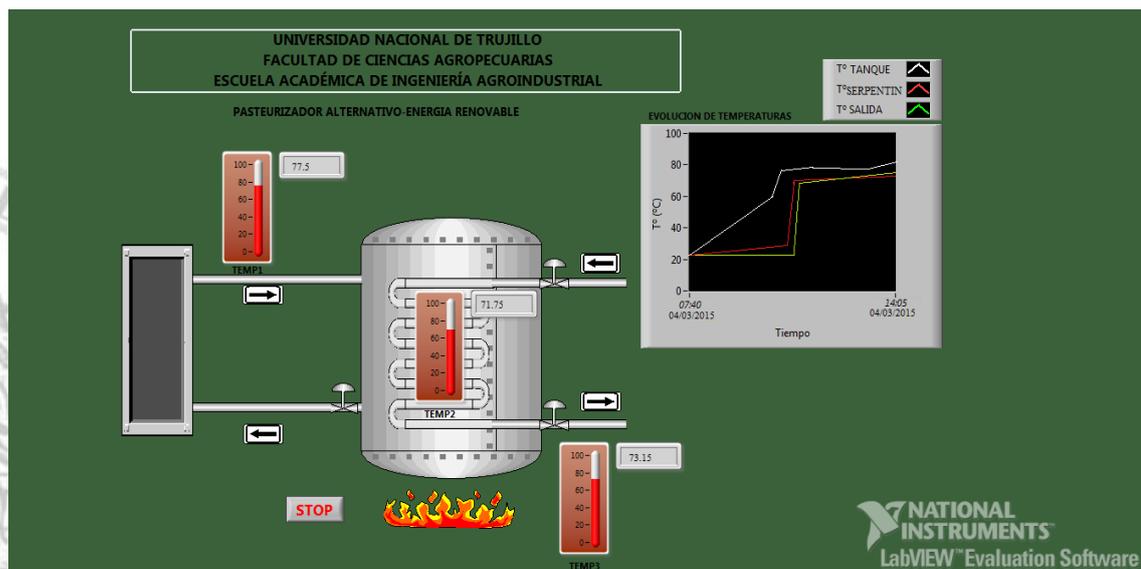


Figura 11. Visualización en LabVIEW del control de temperaturas del proceso de pasteurización de leche de cabra (LC).

En la Figura 11 se aprecia el esquema grafico en LabVIEW del proceso de pasteurización, observándose las lecturas de las temperaturas de los sensores S₁, S₂ y S₃. Las lecturas fueron exportadas al Excel y se detallan en la Tabla 3 (Figura 12).

Se observa en la Tabla 3, que debido a que el CS no logró calentar el agua hasta la temperatura de 78 °C, se encendió el sistema auxiliar (hornilla de gas propano) por 20 minutos, durante el intervalo de 13:30 a 13:50, corroborándose con una gradiente de temperatura mayor.

En la Figura 12 se aprecian las curvas tiempo-temperatura tanto para el agua como de la LC, en el SAI y a la salida de éste.

Tabla 3. Datos de temperatura registrada por los sensores

Hora	Temperatura TAIC (°C)	Temperatura del SAI (°C)	Temperatura a la salida del SAI (°C)
07:30	27	22	21
08:30	32	23	22
09:30	37	25	22
10:30	41	25	23
11:30	46	28	23
12:30	51	30	24
13:30	53	30	24
13:50	76	32	24
13:53	77	72	72
13:57	77	72	73
14:00	78	72	73
14:03	78	73	74
14:05	78	73	73

Para el caso del agua, se aprecia el tramo A-B donde la captación de energía en el CS permitió la elevación de la temperatura del agua durante las primeras 6 horas llegando a una temperatura de 53 °C, en la que, al utilizar el sistema auxiliar debido a las condiciones climáticas desfavorables del día, la temperatura aumentó de manera rápida (tramo B-C). Finalmente, la temperatura del agua dentro del colector solar se mantuvo constante (tramo C-D). Para el caso de la LC se observa el tramo 1-2 que es el tiempo de espera de la leche durante el ordeño, el tramo 2-3 es donde se eleva la temperatura de la leche y el tramo 3-4 es el de pasteurización, en el cual se pasaron 3 *batch* de 10 L de leche por el SAI

de pasteurización, apreciando que la temperatura se mantuvo estable a 73 °C por un tiempo de 15 segundos; cumpliéndose con el requerimiento de una correcta pasteurización de la LC, conforme se corroboró con la tercera curva de temperatura reportado por el sensor S₃ en el tramo Q-R a la salida del SAI, denotándose la proximidad de temperaturas en el tramo 3-4 (73 °C). Según Wayua *et al.* (2012) la leche se debe mantener a 72 °C por 15 segundos. Enright *et al.* (1957) sostienen que la bacteria *Coxiella Burnetii* es uno de los microorganismos más resistentes a tratamientos térmicos presente en productos lácteos. En este sentido se tomó esta bacteria como referencia, buscando reducirla entre 5 a 7 ciclos logarítmicos, en concordancia, aplicando un tratamiento térmico a la LC de 72° por 15 segundos, lo que permite obtener una reducción de 6 ciclos logaritmos. *C. burnetii* presenta un valor Z de 4,34 °C. Habiéndose determinado un valor F (tiempo de destrucción térmica) de 6,6 segundos.

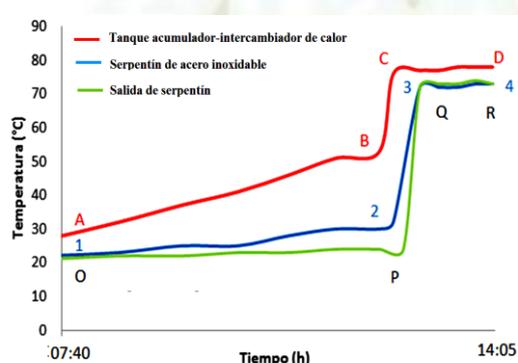


Figura 12. Evolución de la temperatura del agua en el tanque acumulador-intercambiador de calor (TAIC), serpentín (SAI) y pasteurización de la LC a la salida del SAI.

3.5. Estudio comparativo económico

La Tabla 4 detalla los costos de inversión de los sistemas de pasteurización solar, a gas propano y con energía eléctrica con valores de 555,56, 92,59 y 61,73 US dólares respectivamente. Se observa que el pasteurizador solar incurre en un mayor costo de inversión, debido al CS que representa el 44,4% de la inversión total.

Tabla 4. Costos de inversión en US dólares de los sistemas de pasteurización solar, a gas propano y con energía eléctrica (1 US\$ = S/. 3,24 a la fecha de 02/10/2015)

EQUIPO	COSTO (\$)		
	Pasteurizador Solar	A gas propano	Con energía eléctrica
Circuito primario			
Colector solar (CS)	246,91	--	--
Tanque acumulador-intercambiador de calor (TAIC)	46,30	20,80	20,80
Sistema auxiliar (cocina a gas/cocina eléctrica)	13,89	63,29	32,43
Tubería de conexión, bases de apoyo, válvulas y sensores	92,59	--	--
subtotal	399,69	84,09	53,23
Circuito secundario			
Serpentín de acero inoxidable (SAI)	37,04	--	--
Válvula de acero	12,35	--	--
Tanque alimentador de leche sin pasteurizar (TALSP)	12,35	--	--
Sistema control de temperatura	52,47	8,50	8,50
Tanque receptor de leche pasteurizada (TRLP)	10,80	--	--
Tubería de conexión, bases de apoyo.	30,86	--	--
Subtotal	155,86	8,50	8,50
TOTAL	555,56	92,59	61,73

En la Tabla 5, se muestran los costos fijos y variables de operación para los sistemas de pasteurización solar, a gas propano y eléctrico. Se puede apreciar que el costo fijo de operación del pasteurizador solar es el más elevado, siguiéndole el de gas propano y finalmente el eléctrico. Esto se debe a que el sistema con gas propano prescinde del CS, el gas de la hornilla calienta el agua en el TAIC que transfiere calor al SAI. A parte de la hornilla el sistema cuenta con válvula de presión y tanque de gas. Para el caso del sistema eléctrico se ha considerado que el calentamiento del agua en el TAIC, se realiza con una resistencia de 1000W y el costo por kWh de acuerdo a la Empresa Hidrandina en la zona de Chao es de S/. 0,4974 (US\$ 0,15). Se aprecia que para el caso del costo variable de operación del pasteurizador solar es menor, el de gas propano y el eléctrico son mayores.

Con el fin de determinar los márgenes de contribución y la recuperación de la inversión, se realizó un estudio de los costos, con Precio de Venta de US\$ 1,22 y materia prima a utilizar de 30 L de leche diarios (Tabla 6).

Tabla 5. Costos fijos y variables de operación de pasteurizadores solar, a gas propano y eléctrico

Equipo	Pasteurizador Solar	A gas propano	Con energía eléctrica
Costos Fijos (US\$)			
- Mantenimiento	0,06	0,01	0,007
Total Costo Fijo	0,06	0,01	0,007
Costos Variables (US\$)			
- Mano de obra	0,08	0,13	0,15
- Materia prima	0,72	0,72	0,72
- Energía	0,04	0,07	0,015
- Limpieza	0,01	0,008	0,008
Total Costo Variable	0,85	0,93	0,89
TOTAL	0,91	0,94	0,90

En la cual se observa el margen de contribución o ganancia bruta de la leche pasteurizada al utilizar cada uno de los sistemas, obteniéndose una mayor ganancia al utilizarse un sistema eléctrico, seguido por el de pasteurización solar y el que proporciona una menor ganancia es el de gas propano. La ganancia obtenida con el uso del sistema eléctrico se explica por el bajo costo por kWh en una zona rural.

Tabla 6. Comparativo de los márgenes de contribución de acuerdo al equipo a utilizar

Equipo	Costo Total (US\$/L)	Precio Venta (US\$/L)	Ingreso Total (US\$/L)	Ganancia (%)	LC (L/día)	Ganancia (US\$/L)
Pasteurizador Solar	0,91	1,22	0,31	34,1	30	9,30
Gas Propano	0,94	1,22	0,28	29,8	30	8,40
Energía Eléctrica	0,90	1,22	0,32	35,6	30	9,60

El que comparativamente con una ciudad capital como Trujillo es de S/. 0,75 (US\$ 0,23). De acuerdo a esto la inversión para el pasteurizador solar se recuperaría en 60 días de producción, mientras para con el uso de gas propano y energía eléctrica serían de 11 y 7 días respectivamente. Cabe mencionar que, si el volumen de producción aumenta, la recuperación de la inversión sería en menor tiempo. Luego de éste periodo, el que proporciona una ligera mayor rentabilidad es el sistema con energía eléctrica seguida del sistema de pasteurización solar. Hay que precisar que podría mejorarse el rendimiento de pasteurizador solar, aislando el TAIC para evitar pérdidas de energía.

4. Conclusiones

- Se diseñó y montó un pasteurizador solar en la zona rural de la provincia de Chao de la Región La Libertad (Perú), en el establo de la familia Vilcachahua (latitud 08°30'37'', longitud 78°39'04''), en el cual se procesó leche de cabra (LC) inmediatamente después de su ordeño.
- El pasteurizador contó con colector solar (CS) de 2 m² con inclinación N-S de 13,89°, un tanque acumulador-intercambiador de calor (TAIC) provisto de serpentín de acero inoxidable (SAI) de 9,71 m, por donde circularon 3 *batch* de 10 L de leche a 2,15 L/s. El control de temperatura se realizó con tres sensores LM35 acoplados a una tarjeta Arduino Uno y a un ordenador en la cual se instalaron *drivers* de la tarjeta, el *software* LaVIEW y una interfaz de LabVIEW para Arduino, en donde se realizó la programación gráfica.
- El pasteurizador solar funcionó 6 horas y debido a las condiciones climáticas (04.03.2015) se utilizó un sistema auxiliar

de gas propano por 20 minutos, cumpliéndose el tratamiento térmico temperatura-tiempo de 73 °C por 15 segundos, lo que permitió alcanzar un valor F = 6,6, asegurando la destrucción térmica del microorganismo de referencia *Coxiella burnetti*.

- La inversión para el montaje del pasteurizador solar para un procesamiento de 30 L/d de LC fue de US\$ 555,56, el que a un precio de venta de 1,22 US\$/L de leche, se recuperaría en 60 días.
- El sistema de pasteurización solar permite una mayor ganancia de 34,1%, ligeramente menor a un sistema de pasteurización eléctrico que obtiene una ganancia de 35,6%, operando en similares condiciones.

Referencias

- Acha, P.N.; Szyfres, B. 2003. Zoonoses and communicable diseases common to man and animals. In: Bacterioses and Mycoses: Third ed. Pan American Health Organization, Washington, DC USA I: 1358-1365.
- Cortés, C.; De la Fuente, R.; Blanco, J.; Blanco, M.; Blanco, J.E.; Dhabí, G.; Mora, A.; Justel, P.; Justel, P.; Contreras, A.; Sánchez, A.; Corrales, J.C.; Orden, J.A. 2005. Serotypes, virulence genes and intimin types of verotoxin-producing *Escherichia coli* and enteropathogenic *E. coli* isolated from healthy dairy goats in Spain. *Vet. Microbiol.* 110: 67-76.
- Cremonesi, P.; Perez, G.; Pisoni, G.; Moroni, P.; Morandi, S.; Luzzana, M.; Brasca, M.; Castiglioni, B. 2007. Detection of enterotoxigenic *Staphylococcus aureus* isolates in raw milk cheese. *Lett. Appl. Microbiol.* 45: 586-591.
- Desenclos, J.C.; Bouvet, P.; Benz-Lemoine, E.; Grimont, F.; Desqueyroux, H.; Rebiere, I.; Grimont, P.A.; 1996. Large outbreak of *Salmonella enterica* serotype paratyphi B infection caused by a goats' milk cheese, France, 1993: a case finding and epidemiological study. *Br. Med. J.* 312: 91-94.
- Duffie, J.A.D.; Beckman, W.A. 1991. Solar Engineering of Thermal Processes, 2ª Edición. John Wiley & Sons, Inc. New York.

- Enright, J.B., Sadler, W.W.; Thomas, R.C. 1957. Thermal inactivation of *Coxiella burnetii* and its relation to pasteurization of milk, Pub. Health Service Publication 517(47): 1-30.
- Espie, E.; Vaillant, V.; Mariani-Kurkdjian, P.; Grimont, F.; Martin-Schaller, R.; De Valk, H.; Vernozy-Rozand, C. 2006. *Escherichia coli* O157 outbreak associated with fresh unpasteurized goats' cheese. *Epidemiol. Infect.* 134: 143-146.
- Esteban, C.; Franco, J.; Fasulo, A. 2008. Evaluación Experimental de un Destilador Colector Solar Acumulador. *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente* 6(1): 81-85.
- FAO. 2001. Production Yearbook 1999. Food & Agriculture Organization of the United Nations. Statistical Series: 53 (156), Rome, Italy. 251.
- Fernández, P. 2006. Procesos Termosolares en baja, media y alta temperatura. Disponible en: <http://www.marioloureiro.net/ciencia/EnerSolarTermica/SolarPROCESOSTERMO/Solar1.pdf>
- Foschino, R.; Invernizzi, A.; Barucco, R.; Stradiotto, K. 2002. Microbial composition, including the incidence of pathogens, of goat milk from the Bergamo region of Italy during a lactation year. *J. Dairy Res.* 69: 213-225.
- Francis, A.J.; Nimmo, G.R.; Efstratiou, A.; Galanis, V.; Nuttall, N. 1993. Investigation of milk-borne *Streptococcus zooepidemicus* infection associated with glomerulonephritis in Australia. *J. Infect.* 27: 317-323.
- Franco J.; Saravia, L.; Javi, V.; Caso, R.; Fernández, C. 2008. Pasteurization of goat milk using a low cost solar concentrator. *Solar Energy* 82: 1088-1094.
- Fraudita, F.; Delgado, D.; González, C. 2011. Estudio de conductividad eléctrica estratificada en la aleación de aluminio AA5052. 5th Pan American Conference for NDT 2-6. Cancun-Mexico. Disponible en: http://www.ndt.net/article/panndt2011/papers/102_Fraudita.pdf
- Genigeorgis, C.; Carniciu, M.; Dutulescu, D.; Farver, T.B., 1991. Growth and survival of *Listeria monocytogenes* in market cheeses stored at 4 to 30 degrees C. *J. Food Protect* 54: 662-668.
- Heredia, V.; Tapia, J.; Flores, L.; Godoy, J.; Vergara J. 2005. Colector solar construido mediante taladrado por fluencia térmica. *Rev. Facultad de ingeniería-universidad de Tarapacá* 13(2): 65-70.
- Ibarz, A.; Barbosa-Cánovas, G. 2005. Operaciones unitarias en la ingeniería de alimentos. Ediciones mundi-prensa. Madrid-España. Pp. 855.
- Kalyankar, S.D.; Khedkar, C.D.; Patil, A.M. 2016. Goat:Milch. *Encyclopedia of Food and Health*. Elsevier Ltd. 256-260.
- Kuusi, M.; Lahti, E.; Virolainen, A.; Hatakka, M.; Vuento, R.; Rantala, L.; Vuopio-Varkila, J.; Seuna, E.; Karppelin, M.; Hakkinen, M.; Takkinen, J.; Gindonis, V.; Siponen, K.; Huotari, K.; 2006. An outbreak of *Streptococcus equi* subspecies *zooepidemicus* associated with consumption of fresh goat cheese. *BMC Infect. Dis.* 6, 36.
- Leedom, J.M., 2006. Milk of nonhuman origin and infectious diseases in humans. *Clin. Infect. Dis.* 43: 610-615.
- Loayza, O. 2012. Diseño e implementación de un seguidor solar para el control electrónico de un reflector scheffler. Tesis Ingeniero electrónico. PUCP. Lima-Perú. Pp. 50.
- Maffia, E. 2013. Estructura y propiedades de las aleaciones: cobre y sus aleaciones. Disponible en: http://www.ing.unlp.edu.ar/catedras/M0624/descargar.php?secc=0&id=M0624&id_inc=2732
- Márquez-Bravo, L. 2010. Desinfección Solar. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México. Disponible en: <http://www.bvsde.paho.org/bvsacg/e/fulltext/simposio/ponen14.pdf>
- Mendia, F. 2006. Introducción de la cocina solar en la isla de la española. Proyecto de Investigación. Ingeniería sin fronteras. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Disponible en: http://cocinasolar.isf.es/pdf/Proy_invest.pdf
- Muehlherr, J.E.; Zweifel, C.; Corti, S.; Blanco, J.E.; Stephan, R. 2003. Microbiological quality of raw goat's and ewe's bulk-tank milk in Switzerland. *J. Dairy Sci.* 86: 3849-3856.
- Picozzi, C.; Foschino, R.; Heuvelink, A.; Beumer, R. 2005. Phenotypic and genotypic characterization of sorbitol-negative or slow-fermenting (suspected O157) *Escherichia coli* isolated from milk samples in Lombardy region. *Lett. Appl. Microbiol* 40: 491-496.
- Reyes, S. 2002. Introducción a la Meteorología. Universidad Autónoma de Baja California. 428. pp. (PA: CEOFZ20021)
- Ribeiro, S.D.A. 1997. Caprinocultura-criação racional de caprinos. Ed. Nobel, São Paulo, p. 317.
- Ribeiro, A.C. 2008. O melhoramento animal e a qualidade do leite dos caprinos no Brasil de caprinos. In: Simpósio Brasileiro de Melhoramento Animal, 7th, CD-ROM, 24 pp.
- Ribeiro, A.C.; Ribeiro, S.D.A. 2010. Specialty products made from goat milk. *Small Ruminant Research* 89: 225-233.
- Ryan K.J.; Ray, C.G. 2004. Sherris Medical Microbiology. An Introduction to Infectious Diseases (4th ed. edición). McGraw Hill. Pp. 979.
- Rufes, P. 2010. Energía Solar Térmica - Técnicas para su aprovechamiento. Editorial Marcombo S.A. España. 306 p.
- Sankaran, N. 2000. *Coxiella burnetii*, Microbes and people: an A-Z of microorganisms in our lives, Phoenix, Arizona: The Oryx Press, pp. 297.
- Soncini, G.; Valnegri, L. 2005. Analysis of bulk goats' milk and milk-filters from Valtellina and Valchiavenna (*Lombardy Prealps*) for the presence of *Listeria* species. *Small Rumin. Res.* 58: 143-147.
- Thompson, J.S.; Thompson, A. 1990. In-home pasteurization of raw goat's milk by microwave treatment. *International Journal of Food Microbiology* 10: 59-64.
- Tortora, G.J.; Funke, B.R.; Case, C.L.; Introducción a la Microbiología. 2007. 9ª Edición. Edit Médica Panamericana S.A. Buenos Aires, Argentina. Pp. 988.
- Vicario, D. 2013. Pasteurización de leche en Managua con energía solar térmica. Proyecto fin de carrera (Ingeniería Industrial) presentado en la

- Escuela Politécnica Superior de la Universidad Carlos III de Madrid.
- Vorontsov-Veliamínov, B.A 1979. Problemas y Ejercicios Prácticos de Astronomía. Editorial MIR. 6° Edición.
- Wayua, F.O.; Okoth, M.W; Wangoh, J. 2012. Design and performance assessment of a flat-plate solar milk pasteurizer for arid pastoral areas of Kenya. *Journal of Food Processing and Preservation* 37: 120–125.
- Zabala, P. 2005. Aspectos Nutricionales y Tecnológicos de la Leche. Dirección general de promoción agraria. Lima-Jesús María- Perú. Disponible en:
[http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con3_uibd.nsf/7AE7E7AB111562710525797D00789424/\\$FILE/Aspectosnutricionalesytecnol%C3%B3gicosdelaleche.pdf](http://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con3_uibd.nsf/7AE7E7AB111562710525797D00789424/$FILE/Aspectosnutricionalesytecnol%C3%B3gicosdelaleche.pdf)

Agroind Sci
Agroind Sci
AGROINDUSTRIAL

