

**Estudio de viabilidad técnico-económico del sistema híbrido basado en biogás y energía solar para calentar aviarios**

Silvana Paola Moreira Ifrán<sup>1</sup>, Nelson Calderon Henao<sup>1</sup>, Jiam Pires Frigo<sup>1</sup>, Oswaldo Hideo Ando Junior<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Grupo de Pesquisa em Energia e Sustentabilidade Energética (GPEnSE), ILATIT, UNILA, Av. Sílvio Américo Sasdelli, 1842, 85866-000, Foz do Iguaçu, Paraná, Brasil.

E-mail autor correspondente: oswaldo.junior@unila.edu.br  
Artigo enviado em 10/02/2020, aceito em 03/12/2020

**Resumen:** Este artículo presenta un modelo híbrido de biogás termoeléctrico solar que tiene como objetivo utilizar de manera eficiente la irradiación solar junto con el calor obtenido de la quema de biogás. Al principio, se presentan los avances más recientes en términos de generadores solares térmicos, generadores basados en biogás y ambas tecnologías que funcionan conjuntamente; luego, se describe la metodología implementada a lo largo de la investigación, para luego presentar la evaluación y validación del generador solar termoeléctrico de biogás. Finalmente, los resultados se discuten desde la perspectiva de la factibilidad de implementar esta tecnología. El nuevo sistema híbrido puede generar hasta 16,79 MWh / año, tiene un período de recuperación de 7 años y una tasa interna de rendimiento del 9,34%.

**Palabras clave:** energía solar, biogás, generación de energía, eficiencia energética, gestión de la energía.

**Technical-economic Feasibility Study of Hybrid System Based on Biogas and Solar Energy for Warming Aviaries**

**Resumo:** Este artigo apresenta um modelo híbrido de biogás termoeléctrico solar que visa o uso eficiente da irradiação solar em conjunto com o calor obtido da queima do biogás. No início, foram apresentados os avanços mais recentes em termos de geradores solares térmicos, geradores a biogás e ambas as tecnologias trabalhando juntas; em seguida, foi descrita a metodologia implementada ao longo da investigação, para a seguir apresentar a avaliação e validação do gerador termoeléctrico solar a biogás. Por fim, os resultados foram discutidos sob a ótica da viabilidade de implantação dessa tecnologia. O novo sistema híbrido pode gerar até 16,79 MWh/ano, tem um período de retorno de 7 anos e uma taxa interna de retorno de 9,34%.

**Palavras-chave:** Energia solar, biogás, geração de energia, eficiência energética, gestão de energia.

**Introducción**

El oeste del Estado brasileño de Paraná se ha consolidado como una región especializada en la producción avícola, situación que implica la

generación de un grande volumen de residuos como la cama de aviario (material distribuido en el piso de los galpones avícolas que sirve como lecho para las aves y que combina estiércol con restos de alimentos y plumas). Este residuo suele ser usado como fertilizante

orgánico y como insumo en la producción de biogás (Alves, 1991; Silveira et al., 1992; Hahn, 2004; Pires et al., 2013).

El uso de la cama de aviario como fertilizante presenta limitaciones, ya que cuando se utiliza en exceso contamina el suelo y el agua (debido a la liberación de CO<sub>2</sub> y CH<sub>4</sub>). Es importante destacar que cuando la cama aviaria se aprovecha únicamente como fertilizante los gastos logísticos y de saneamiento ambiental tienden a incrementarse considerablemente (Neitzke, 2010).

En el caso de producción de biogás de origen avícola, la calidad y el potencial de producción del gas dependen de las características de la cama de aviario que, a su vez, están condicionadas por la climatización del galpón, el régimen alimenticio de las aves, la disponibilidad de bebederos, la ventilación y la iluminación del local (Nascimento et al., 2011). Una deficiencia en cualquiera de estos aspectos puede ocasionar estrés en las aves y, en los casos más graves, su muerte. El estrés, tanto por exceso como por falta de calor durante las primeras semanas de vida de las aves, altera su metabolismo y puede causar pérdida de masa corporal y deterioro de la salud (Moura et al., 2008).

Con el fin de mejorar los procesos de calefacción de los aviarios y respondiendo a las demandas del mercado, que exige acciones volcadas hacia la sustentabilidad, se han incorporado soluciones que hacen uso responsable y eficiente de los recursos disponibles; por ejemplo, se han venido instalando campánulas a gas, hornallas a leña y gas, pisos radiantes, paredes y techos con aislamiento térmico, sistemas termosolares, sistemas integrados de calentamiento y ventilación en los galpones avícolas (Menegali et al., 2009).

Este artículo presenta un nuevo sistema para el aprovechamiento de los residuos generados en un aviario de corte de la ciudad de Cascavel, PR, Brasil.

En el sistema propuesto, la cama de aviario es utilizada como insumo para la producción del biogás que alimenta el sistema de calefacción y, dependiendo de la disponibilidad, para generar hasta 16,79 MWh/año de energía eléctrica; al mismo tiempo, es aprovechada la energía solar captada a través de colectores solares que contribuyen a garantizar la temperatura ideal para la cría de pollos de engorde. El sistema propuesto presenta un payback de 7 años y una tasa interna de retorno de 9,34%, lo que supone una interesante inversión desde el punto de vista económico. Este estudio busca contribuir a subsanar el vacío que existe en la literatura especializada sobre sistemas de calefacción alternativa en aviarios.

### **Estado del arte**

En este capítulo se abordan los principales aspectos de los más modernos calentadores de aviarios, las nuevas propuestas para el uso de la cama de aviario y las tecnologías para producción de biogás.

Según Oliveira (2012), el biogás producido a partir de la digestión anaeróbica de cama de aviario puede ser usado para varios fines: producción de vapor, generación de energía eléctrica o como combustible en cualquier proceso. Las alternativas de aprovechamiento en las cuales el biogás es consumido en el propio local de producción son las más comunes dado que el proceso logístico es simplificado. Durante la producción de biogás también es obtenido un producto secundario: biofertilizante. Cuanto más eficientes sean los procesos de recolección de residuos, separación de substratos, alimentación de reactores y biodigestión, mejores serán el biogás y el biofertilizante producidos (Jones e Ogden, 1984; Lucas et al., 1993; Steil, 2001; Fukayama, 2008; Aires, 2009).

En relación al confort térmico, varios autores han observado la influencia de varios parámetros en el desempeño de los criaderos de pollos. Según Funck e Fonseca (2008), uno de los aspectos más importantes durante la cría de pollos es la temperatura, pues la salud y el desarrollo de masa corporal de las aves son factores directamente influenciados por esta. En (Ponciano et al., 2011) pudo ser constatado que si los pollos son mantenidos a una temperatura ambiente adecuada (termoneutralidad), no se desperdicia energía metabólica en su regulación, lo que se traduce en ganancia de masa corporal y aumento de la rentabilidad de los galpones.

En (Galbiatti et al., 2010; Silva et al., 2011) es comprobada la viabilidad técnica del uso de fuentes renovables para el calentamiento de galpones, fomentando el cuidado del medio ambiente y la eficiencia energética, trayendo así impactos socioeconómicos positivos. En ese mismo sentido, Campos et al. (2013) realizó un estudio sobre el impacto del uso de colectores solares para calentamiento del aviaros, monitoreando diferentes variables como temperatura y humedad; si bien las conclusiones de este trabajo son prometedoras en relación al uso de energía solar en territorio brasileño, se evidencia que por sí sola esta fuente no es suficiente para atender la demanda de los galpones, aunque puede ser utilizada como sistema auxiliar cuando es acoplada a fuentes convencionales de calentamiento.

Por otro lado, Tessaro (2011) analiza la posibilidad de usar bombas de calor aire/aire y calentadores eléctricos de paso para controlar la temperatura dentro del galpón; este trabajo resulta interesante por sus conclusiones y valioso como modelo de comparación para el sistema propuesto en este artículo. Vale la pena resaltar que los

calentadores eléctricos fueron ampliamente utilizados en granjas, disipando calor a través de resistencias blindadas y lámparas incandescentes; cuando la industria avícola creció, esta solución se tornó poco rentable debido a su alto costo y baja eficiencia (Tessaro, 2011).

Cuando se trata de soluciones alternativas, estudios como los presentados en Tessaro (2011) utilizando sistemas de calentamiento solar y en De Abreu (2003), usando carbón vegetal, se tornan referentes. A diferencia del sistema aquí propuesto, los estudios citados evaluaron por separado los diferentes componentes del calentador y utilizaron aire como fluido de trabajo.

Al consultar los bancos de patentes fue constatada la existencia de un registro para sistema de calentamiento avícola semejante al aquí propuesto, sin embargo, dicho sistema utiliza únicamente una caldera alimentada con energía solar (Cazzuni, 1998). Otras patentes de interés son:

- I. Calentadores a partir de la quema de gas licuado de petróleo (GLP) y leña, compuestos por un quemador convencional y un sistema de distribución de aire caliente (Cazzuni, 1998; Michelin, 2002; Zim, 2011);
- II. Calentadores eléctricos, basados en resistencias blindadas, que utilizan aire como fluido de trabajo para transferir la energía térmica hacia los galpones (Brandellero, 2014; Morawski, 2016);
- III. Calentador genérico para cualquier combustible acoplado a panel solar para suplir falta de combustible que incorpora un sistema auxiliar solar a un horno genérico (Gomes, 2004).

Es interesante destacar que, en relación al calentador híbrido aquí propuesto, los sistemas citados difieren

tanto en el tipo de combustible utilizado como en la disposición estructural.

El sistema presentado en este artículo se diferencia de los demás trabajos publicados en tres aspectos principalmente, estos son:

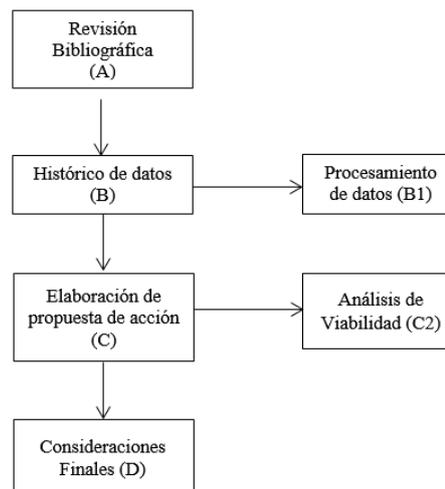
- I. Producción de biogás a partir de la cama de aviario para autoconsumo;
- II. Control térmico dentro de un galpón avícola a través de la combinación de sistemas auxiliares de calentamiento;
- III. Generación de energía eléctrica con biogás excedente.

Por último, Aires (2009) demuestra que la biodigestión anaeróbica de cama de aviario de corte es una alternativa sustentable para tratar los residuos avícolas, posibilitando la generación de energía eléctrica de bajo costo y contribuyendo a la disminución del impacto ambiental de la industria avícola.

### Material y métodos

La propuesta metodológica utilizada a lo largo de esta investigación sigue la lógica descrita en diagrama de flujo de la Figura 1.

En la etapa A de esta investigación se realizó el levantamiento de información relevante para la construcción del sistema propuesto; fueron consultadas fuentes bibliográficas y documentales especializadas, reportes de investigaciones con características similares y trabajos en las áreas específicas (biogás, energía termosolar y avicultura). La información recabada sirvió como línea de base para validar la coherencia de los resultados obtenidos en esta investigación.



**Figura 1.** Flujograma de la metodología de trabajo.

En la etapa B se realizó el levantamiento de los datos del aviario objeto de estudio; fue determinada la composición de la cama de aviario, la potencia térmica requerida, la ubicación geográfica y la disponibilidad de irradiación solar. En la etapa B1 fueron procesados los datos con el fin de obtener una estimativa de la producción de biogás y de la tasa local de aprovechamiento del recurso solar, para entonces evaluar la viabilidad técnica del sistema.

En la etapa C, luego de los análisis anteriores, fue elaborado un plan de acción para evaluar la viabilidad técnico-económica del sistema. La etapa C2 consistió en la ejecución del plan de acción para efectivamente determinar la viabilidad del sistema de calentamiento híbrido.

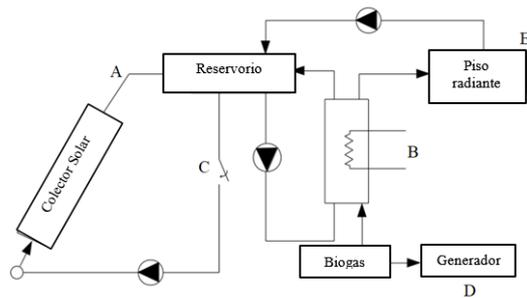
Finalmente, en la etapa D, fueron compilados y ordenados todos los hallazgos; de forma simultánea fueron propuestas las correspondientes mejoras con el propósito de viabilizar la implantación del sistema.

### Configuración y dimensionamiento

El principal diferencial del sistema propuesto consiste en la unión de dos tecnologías (generación termosolar y generación basada en biogás) con el propósito de maximizar el

uso de la energía solar durante el calentamiento.

Factores como la necesidad real de dar un tratamiento adecuado al residuo de cama de aviario, la demanda de calor y electricidad de los galpones y la disponibilidad del recurso solar, tornan interesante la implementación del sistema presentado en la Figura 2.



**Figura 2.** Configuración del sistema propuesto.

### *Sistema híbrido propuesto*

El sistema híbrido propuesto (solar y biogás) acopla dos sistemas de calentamiento. El primero de ellos consiste en un campo de colectores solares, el segundo es comportado por un quemador de biogás; ambos están conectados a través del sistema hidráulico y de almacenamiento mostrado en la Figura 2.

La energía solar, por ser virtualmente gratuita, abundante e inagotable, fue adoptada como fuente principal, mientras que el biogás opera como sistema complementario dada la posibilidad de almacenarlo y utilizarlo en ausencia de recurso solar, lo que mejora la confiabilidad de la operación. La configuración presentada en la Figura 2 permite también aislar los colectores solares durante la noche o en días con ausencia de radiación directa significativa que puede afectar negativamente el rendimiento del sistema por pérdidas de calor.

El modelo propuesto permite la operación independiente de cada uno de los sistemas constituyentes, es decir, en caso de ausencia de energía solar el sistema de quema de biogás será capaz

de abastecer el circuito de serpentinas para atender la demanda térmica del galpón y viceversa. Según las estimativas realizadas, en todos los lotes de aves (un lote corresponde al grupo de aves que permanece en el mismo corral hasta el día del sacrificio) el uso simultáneo de ambos sistemas de calentamiento será necesario sólo durante la mitad del tiempo de engorde (aproximadamente veinte días). Durante los meses más cálidos el biogás será utilizado únicamente por cinco días.

El biogás no quemado será utilizado para generar energía eléctrica con el fin de abastecer parcialmente la demanda de los galpones y demás instalaciones (ver Figura 2).

### *Metodología para dimensionamiento del sistema*

Inicialmente fue determinada la tasa de irradiación solar local, posteriormente fueron seleccionados los colectores (tubos a vacío, aunque el sistema puede ser adaptado con colectores de placas) para entonces dimensionar el tanque de acumulación. Para el sistema de quema de biogás fueron dimensionados el quemador de paso y el generador eléctrico. El piso radiante consta de una serpentina de PVC, distribuida uniformemente a través del suelo donde reposan la cama del aviario y los pollos; estos ductos están conectados al circuito del sistema termosolar y al quemador de paso.

Para el control de todos los elementos del sistema es necesario implementar un sistema de monitoreo que permita regular el caudal del circuito hidráulico; para tal fin se propone el uso de un sistema de control de lazo cerrado que fije la temperatura de salida del quemador en función de la temperatura ambiente y de la temperatura óptima requerida al interior del galpón. Esta investigación se enfocó en la operación

del sistema híbrido propuesto desde la perspectiva termodinámica y económica, no en los sistemas auxiliares mencionados anteriormente.

### *Estudio del caso*

El aviario objeto de estudio se encuentra situado en la ciudad de Cascavel, Estado de Paraná, Brasil. La producción por lote es de 14.000 a 16.000 aves, cada lote es mantenido en el aviario entre 40 y 50 días. Durante ese período es controlada la cantidad de comida y agua dispuesta, así como la ventilación y la temperatura del lugar. En la Tabla 1 se muestran los rangos de temperatura en los que se debe mantener el aviario en función de la edad de los pollos.

**Tabla 1.** Temperatura de crianza de pollos.

Edad (días)	Temperatura (°C)
1 - 7	32 - 35
8 - 14	29 - 32
15 - 22	26 - 29
22 - 28	24 - 27
29 - 35	21 - 24
36 - muerte	18 - 24

Actualmente, la climatización del local depende de la quema de viruta de eucalipto en un horno que entrega aire caliente y es distribuido por todo el corral usando ventiladores; el control de temperatura regula dos variables: el caudal de aire que pasa hacia el galpón y la presencia de lonas de contención (especialmente durante los primeros trece días de vida y durante los meses de invierno: junio, julio y agosto). La menor temperatura promedio dentro del galón es de 21,0 °C, registrada en el mes de junio, razón por la cual el dimensionamiento del sistema se basó en dicha condición crítica.

La electricidad consumida en el aviario para dispositivos auxiliares, de control y demás usos es obtenida directamente de la red de distribución.

En cuanto al tratamiento actual de la cama del aviario, esta es descartada en un 90% y apenas el 10% restante es aprovechado como abono. Para el descarte son contratados camiones que retiran los desechos cada 8 ciclos (un ciclo es el tiempo comprendido entre el primer día que los pollos son colocados en el corral y el día que son retirados del mismo). A continuación, son discutidos los principales elementos del sistema de calefacción propuesto:

### *Síntesis de la operación*

La solución presentada a la empresa propietaria del aviario combina dos fuentes de energía que permiten un mejor manejo de los recursos disponibles localmente. En primera instancia, un grupo de colectores solares conectados a un tanque de almacenamiento de agua caliente son estratégicamente dispuestos para aprovechar el potencial solar de la región. Sin embargo, utilizar únicamente este sistema no es suficiente para satisfacer las necesidades energéticas del aviario, principalmente en horario nocturno o días nublados donde la eficiencia de los colectores disminuye. Para conseguir atender la totalidad de la demanda térmica en el aviario se sugiere la instalación de un quemador de paso alimentado con biogás. El biogás es generado a partir de la cama de aviario removida de los galpones.

### *Colectores solares*

Es necesario determinar la energía bruta que puede ser extraída y la energía de entrada primaria del sistema solar térmico que se utiliza para calentar el agua, para ello fue utilizada (1) (Duffie et al., 2013).

$$Q = \dot{m} \times c_{p,agua} \times (T_{in} - T_{out}) \quad (1)$$

$$Q = \eta \times A_{col} \times I$$

Donde  $\dot{m}$  es el flujo másico de agua,  $c_{p,agua}$  el calor específico a presión constante del agua,  $T_{in}$  la temperatura de

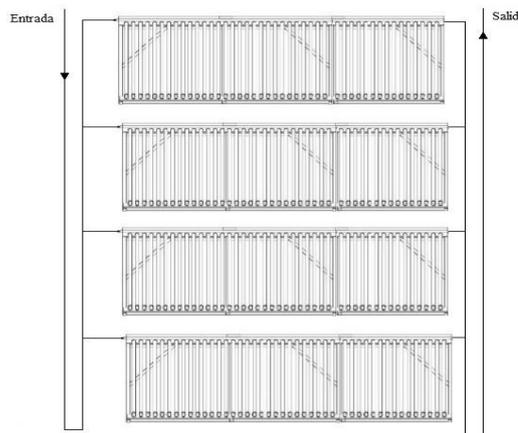
entrada del agua,  $T_{out}$  la temperatura de salida del agua,  $A_{col}$  el área de colectores,  $I$  la irradiancia local y  $\eta$  la eficiencia local de los colectores. Esta última fue determinada a través de (2) (DUFFIE; BECKMAN, 2013).

$$\eta = Fr(\tau\alpha) - FrUL \times \frac{T_m - T_{amb}}{I} \quad (2)$$

Donde  $T_m$  es la temperatura promedio del agua entre la entrada y la salida del colector,  $T_{amb}$  la temperatura ambiente, para el caso de  $Fr(\tau\alpha)$  y  $FrUL$ , factor de rendimiento óptico del colector y coeficiente de pérdidas térmicas, respectivamente, los valores son determinados y publicados para cada modelo de colector aprobado por el Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMET, 2020), para fines de análisis fueron utilizados valores promedio de modelos comerciales de colectores solares a vacío.

El objetivo del sistema termosolar es elevar la entalpia del agua lo máximo posible dentro de su capacidad operativa y, al mismo tiempo, entregar un caudal suficiente de agua caliente para climatizar el galpón, para ello la mejor configuración de los paneles es en serie-paralelo, teniendo un tiempo de residencia mayor en los tubos a vacío y posibilitando la obtención de temperaturas mayores (Avila et al., 1992).

Para el caso de estudio fue establecido el número de doce colectores (cuatro baterías en paralelo de tres colectores conectados en serie cada una) en función de la relación costo beneficio ofrecido, considerando el espacio disponible para instalación, la cantidad de energía que puede ser extraída, el costo de mantenimiento y la relación de uso en los meses más cálidos. En la Figura 3 se muestra la disposición del sistema de colectores a vacío.



**Figura 3.** Configuración de la batería de colectores solares.

Para poder entregar agua en las temperaturas requeridas durante el invierno, únicamente a partir del campo solar, sería necesario un número demasiado elevado de colectores. Esta cantidad de colectores dejaría el sistema en condición de sobredimensionamiento en el verano, lo que inviabilizaría económicamente el sistema. Para la configuración de colectores presentada en la Figura 3 y considerando una irradiancia solar diaria promedio de 3,11 kWh/m<sup>2</sup>·día (Diaz et al., 2019; Cresesb, 2020) fueron estimados los parámetros operativos presentados en la Table 2.

Para alcanzar la temperatura del fluido de trabajo que garantiza una adecuada climatización en el galpón es utilizado el calentador de paso que aprovecha el biogás producido a partir de la cama del aviario; el sistema de quema de biogás se encuentra acoplado al sistema de colectores solares (Figura 2). Un mecanismo de control de temperatura hace la conexión entre ambos sistemas, de esta manera en los meses cálidos el sistema solar térmico será suficiente durante el día y sólo será necesario usar el biogás en las noches; ya en los meses fríos, aunque los colectores logren elevar la entalpia del agua, será necesario hacer uso del sistema de quema de biogás.

**Tabla 2.** Disponibilidad del sistema solar térmico.

Potencia disponible[kW]	T <sub>fria</sub> [°C]	T <sub>caliente</sub> [°C]	Vol. agua caliente [m <sup>3</sup> ]
5,54	8,00	70,0	1,88

\* Donde T<sub>fria</sub> la temperatura de entrada y T<sub>caliente</sub> la de salida

Para el dimensionamiento del tanque de acumulación se estableció una temperatura de 70°C. Dado que en los meses de invierno será necesario accionar el calentador de paso, se estima que sea necesario un tanque de 2.000 litros para lograr satisfacer las necesidades del aviario.

### Biogás

El uso de la cama de aviario para producir biogás es una práctica común en los grandes aviarios de engorde, sin embargo, este aprovechamiento generalmente busca generar energía eléctrica y no calor.

En el sistema propuesto, el biogás es utilizado como combustible en el quemador de paso, conectado en serie con el circuito solar térmico.

En la se presentan los datos de uso de cama de aviario provistos por la granja avícola objeto de estudio.

El volumen de biogás producido fue estimado con base en Jones e Ogden (1984), utilizando (3).

$$B = V \times \rho \times P_b \quad (3)$$

Donde B es el volumen total de biogás, V el volumen extraído de cama de aviario por lote (declarado por la empresa),  $\rho$  la densidad de la cama de aviario (400 kg/m<sup>3</sup>), y P<sub>b</sub> el potencial específico de producción del biogás de la cama de aviario (0,1576 m<sup>3</sup>/kg).

**Tabla 3.** Registros de producción de cama de Aviario y biogás.

Viruta eucalipto [m <sup>3</sup> ]	Cama Extraída [m <sup>3</sup> ]	Potencial energético o biogás [m <sup>3</sup> /kg]	Producción biogás [m <sup>3</sup> ]
10	20	0,1576	1260,8
90	180	0,1576	11347,2

Para determinar la cantidad de agua que puede ser calentada con el biogás producido fue utilizada nuevamente (2), para determinar la masa y a partir de ella el volumen, con c<sub>p</sub> constante e igual a 4,1868 kJ/kg °C,  $\rho_{\text{agua}}$  como 1000 kg/m<sup>3</sup> y considerando el peor caso donde el sistema de colectores no logre aportar energía térmica suficiente (horario nocturno en invierno) el agua a temperatura ambiente estaría a 8°C y debe alcanzar 100°C para atender el gradiente de temperatura requerido por el piso radiante. Los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4.** Resultados para el biogás.

Volumen de biogás [m <sup>3</sup> ]	Energía extraíble		Volumen de agua [m <sup>3</sup> ]
	[kWh]	[MJ]	
1260,8	7.829,6	28.186,4	90,26
11347,2	70.466,1	253.678,0	812,4

El 10 m<sup>3</sup> de viruta de eucalipto son utilizados periódicamente por lote de aves, cada 45 días aproximadamente, y 90 m<sup>3</sup> son utilizados por cada 8 lotes, cada 360 días aproximadamente. Se estima que para cada metro cúbico de viruta limpia se obtiene el doble de cama de aviario.

### Piso radiante

Un piso radiante consiste en una o varias serpentinas que se distribuyen a lo largo del suelo, cubiertas por una capa protectora (Figura 4); dichas serpentinas transportan un fluido en alta temperatura que transfiere calor al ambiente a ser climatizado. En el caso del aviario, las serpentinas contienen agua líquida a 100°C que garantiza la transferencia de calor necesaria para

climatizar el galpón, tal y como descrito en la Tabla 1.



**Figura 4:** Modelo de piso radiante.

Los pisos radiantes hidráulicos presentan varias ventajas sobre los sistemas convencionales de calentamiento (con aire por ejemplo), como mejor control de ventilación y confort térmico, Krarti et al. (2011). Como fue constatado por Larsen (2017), este tipo de sistema de calefacción permite una distribución homogénea de temperatura, menor transporte de polvo que los sistemas convencionales de convección forzada, mejor aprovechamiento del espacio y ausencia de ruidos. Además, este tipo de sistema de calefacción posibilita el ajuste de la humedad de la cama, reduciendo así la producción de amoníaco (Larsen et al., 2017).

Cabe remarcar que la etapa crítica de la cría de aves tiene lugar durante los primeros días de vida de los pollos, en este período la temperatura del galpón debe permanecer alrededor de los 35°C; en el verano paranaense, durante algunas horas del día, será totalmente prescindible un sistema de calefacción.

#### *Generación de energía eléctrica*

El biogás no quemado por el sistema de calefacción puede ser aprovechado en un generador eléctrico para cubrir parcialmente las necesidades energéticas de los galpones. Para este caso particular, el consumo energético del aviario fue de 12,36 kW (8,9 MWh/mes) por concepto de

iluminación, cortina automática, ventiladores, etc.

En la estimativa de potencial energético se considera el período de un año, que es aproximadamente lo que dura el ciclo de 8 lotes donde se cambia completamente la cama del aviario. Siguiendo la metodología propuesta por Oliveira et al. (2012) el potencial energético bruto fue determinado a través de (4).

$$PB = \frac{m \times P_c}{k} \quad (4)$$

Donde PB el potencial energético bruto en MW; m es la masa de cama de aviario acumulada en el período de análisis; P<sub>c</sub> es el poder calorífico de la cama de aviario en MJ/kg (ubicado en un rango de 9 a 13,5 MJ/kg) y k es la cantidad en tiempo en segundos dentro del período analizado (Oliveira et al., 2012).

A partir de PB es posible calcular el potencial energético técnico como a través de (5)

$$PT = PB \times \eta \quad (5)$$

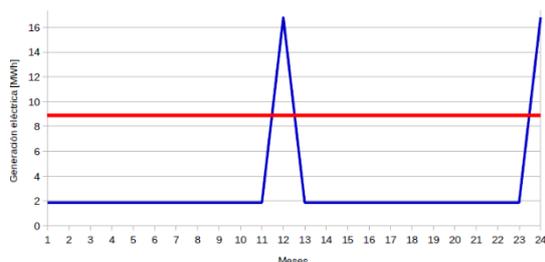
Donde PT el potencial energético técnico en MW; PB el potencial energético bruto en MW y η la eficiencia del sistema de conversión.

La eficiencia eléctrica de sistemas de generación alimentados con biogás está en el intervalo de 25 a 35% (Sordi et al., 2004); asumiendo 30% como valor de referencia para el rendimiento del sistema de generación, se obtienen los datos presentados en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Potencial energético del biogás.

Potencial energético bruto [MW]	Potencial energético técnico [MW]
0,011	0,0032
0,013	0,0039

En la Figura 5 se presenta una estimativa de la demanda eléctrica (representada con el color rojo) y de la producción de energía eléctrica a partir del biogás (representada en color azul).



**Figura 5.** Estimativa generación eléctrica.

### Análisis de viabilidad

El estudio de viabilidad atendió dos criterios fundamentales: técnico y económico.

#### Viabilidad técnica

En cuanto a la viabilidad técnica, de acuerdo con las estimativas presentadas en la sección de la configuración y dimensionamiento, es posible afirmar que los sistemas acoplados permiten la correcta calefacción de los galpones. El nuevo sistema proporciona ganancias en términos de rendimiento global en el proceso de cría de pollos de corte, lo que garantiza un mejor aprovechamiento de los recursos locales. Otra característica importante es que los equipos utilizados en la propuesta son de fácil acceso, operación y mantenimiento, y una vez instalados implican un mejor control de las variables del proceso dentro y fuera del corral.

#### Viabilidad económica

En este análisis fueron considerados los siguientes aspectos: compra de equipos, costos de reutilización de la cama de aviario y ahorro por concepto de generación de calor y electricidad. En la Tabla 6 se presentan las estimativas de inversiones y ganancias tras la implementación del sistema propuesto. Es importante resaltar que un aviario convencional

como el analizado tiene un costo de instalación de US\$ 33.040.

**Tabla 6.** Inversiones necesarias para implementar el nuevo sistema de híbrido de calefacción.

Activo	Precio [US\$ x 1000]
Planta de generación	10,28
Planta de captación de biogás	3,75
Quemador	2,00
Sistema termosolar	4,50
Piso radiante	2,50
Generador eléctrico	4,50
Costo de instalación	5,51
<b>Total</b>	<b>33,04</b>

En la Tabla 7 se muestran los costos de operación de ambos sistemas (termosolar y calentador a biogás) y las ganancias proyectadas. Los costos fueron estimados a partir del precio de los componentes disponibles en el mercado y en función de proyectos de porte semejante con parámetros operativos similares; el costo de instalación fue determinado utilizando el método propuesto por (Copel, 2020).

**Tabla 7.** Costos operacionales.

Ítem	Valor [US\$ x 1000/anual]
Operación y mantenimiento	1,38
Ahorro combustible*	2,10
Ahorro Electricidad	1,21/kWh **
Ahorro logística	5,75 por lote

\* El aviario utiliza 15 m<sup>3</sup> de leña de eucalipto por lote: 120 m<sup>3</sup>/año.

\*\* Precio del kWh para el sector rural [40].

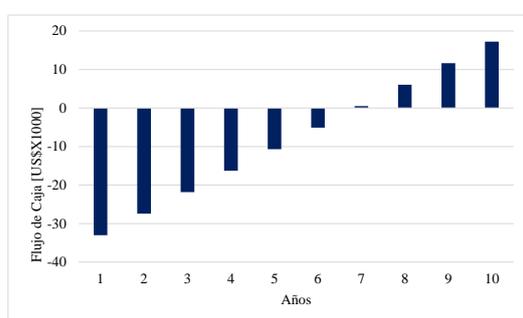
En la Tabla 8 son presentados los parámetros más relevantes del análisis económico del sistema; la tasa de descuento fue seleccionada a partir de la tasa mínima atractiva de retorno de los principales bancos de Brasil (5,95%) (Pinto, 2012).

**Tabla 8.** Parámetros económicos.

PAYBACK	7 años
TIR	9,34%

El retorno de la inversión puede ser obtenido en aproximadamente 7 años

(Figura 6), la tasa interna de retorno es mayor que la tasa de interés de los bancos consultados (9,34%) y por tanto el sistema se muestra viable desde el punto de vista económico. En la Figura. 6 también puede observarse el comportamiento económico del sistema propuesto tomando un período de 10 años, que corresponde a la vida útil estimada del generador eléctrico, aunque para el biodigestor y el sistema termosolar se espera una vida útil de 20 años.



**Figura 6.** Flujo de caja en miles de US\$ a 10 años.

### Agradecimientos

Os autores agradecem ao CNPq pelo fomento e apoio na realização do Projeto.

### Consideraciones finales

El sistema híbrido propuesto se muestra viable desde las perspectivas técnica y económica. Desde el punto de vista económico cabe destacar que el retorno de la inversión es relativamente rápido debido al ahorro obtenido con la puesta en marcha del sistema.

Una característica interesante del proyecto es que puede ser dividido, dependiendo de las necesidades y recursos disponibles del aviario en cuestión. Puede optarse por instalar solamente el sistema de calentamiento a biogás y aun así los resultados serían positivos, en ese caso el retorno de la inversión sería más rápido inclusive; asimismo es importante remarcar que en

ese caso debería instalarse un sistema auxiliar (GLP, leña, etc.) para complementar la demanda térmica de los galpones, especialmente en las noches de invierno.

Si se opta por acoplar únicamente el sistema termosolar al sistema existente en cada aviario, el payback es de 7 años colocando solamente 4 baterías de paneles y el problema de la disposición de los residuos de la cama de aviario se mantiene por lo que es la solución menos recomendable pues tampoco se obtendría ahorro en la cuenta de energía eléctrica.

En términos ambientales, es evidente que el aporte de la propuesta es interesante debido a la prevención de la contaminación. Por otro lado, en aviarios donde el sistema vaya a sustituir la quema de combustibles de origen fósil la ganancia ambiental estará también asociada a la disminución de gases de efecto invernadero.

### Referencias

- AIRES, A. M. **Biodigestão anaeróbia da cama de frangos de corte com ou sem separação das frações sólida e líquida.** 2009. Disertação (Pós-Graduação em Zootecnia) - Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal - São Paulo, 2009.
- ALVES, A. A. **Fontes alternativas de cama de frangos para alimentação de ruminantes.** 1991. Disertación de Maestría - Universidad Federal de Ceará, Fortaleza, 1991.
- BRANDELLERO, N. A. **Aquecedor de aviário elétrico.** BR10 2013 000464 2 A2. Depósito: 8 jan. 2013. Concessão: 26 ago. 2014.
- CAMPOS, A. T.; KLOSOWSKI, S.; SOUSA, F. A.; PONCIANO, P. F.; NAVARINI, F. C.; YANAGI JUNIOR, T. Eficiência de sistema de aquecimento auxiliar para aviários, com base nos índices de conforto

térmico. **Bioscience Journal**, v. 29, n. 3, 4 jun. 2013.

CAZZUNI, F. **Central de aquecimento para aviário**. MU7703272-1 Y1. Depósito: 23 jul. 2013. Concessão: 10 nov. 1998.

COPEL. **Companhia Paranaense de Energia**. 2020. Disponível em: <https://www.copel.com/hpcweb/>.

CRESESB. **Centro de Referência para Energia Solar e Eólica**. 2020. Disponível em: <http://www.cresesb.cepel.br/>.

DA SILVA PIRES, P. G.; DELA RICCI, G.; VEIGA MENDES, J. Características de Cama de Aviário e sua Reutilização. **In: III SIMPÓSIO DE SUSTENTABILIDADE & CIÊNCIA ANIMAL**. Pirassununga, SP.: Agosto de 2013.

DA SILVA, T. D.; MENEZES, M. de S. **Uma Discussão Ambiental: O Aquecimento Global e a Busca Pelo Desenvolvimento Sustentável**. Geografia em Atos (Online), 2011.

DE ABREU, P. G. Modelos de Aquecimento. **In: IV SIMPÓSIO BRASIL SUL DE AVICULTURA**. Chapecó, SC.: 2003. p. 65-77.

DIAZ, V. S. et al. Proposal Solar Drying With Heat Storage Applied to Medicinal Plants. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 16, p. 80, 2019.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4ª ed. University of Wisconsin - Madison: Copyright 2013 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved, 2013. *E-book*.

FUKAYAMA, E. H. **Características Quantitativas e Qualitativas da cama de frango sob diferentes reutilizações: efeitos na produção de biogás e biofertilizante**. 2008. Tese (Doutorado)

- Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal - São Paulo, 2008.

FUNCK, S. R.; FONSECA, R. A. Avaliação energética e de desempenho de frangos com aquecimento automático a gás e a lenha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 1, p. 91-97, 2008.

GALBIATTI, JOÃO A.; CAMELO, ANAIRA D.; SILVA, FLAVIA G.; GERARDI, ELIANA A. B.; CHICONATO, DENISE A. Estudo quali-quantitativo do biogás produzido por substratos em biodigestores tipo batelada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, n. 4, p. 432-437, Abril 2010

GOMES, R. **Sistema de aquecimento para suínos, aves e outros animais, com fontes de energia alternativas**. MU 8102418-5 U2. Depósito: 8 out. 2001. Concessão: 17 fev. 2004.

HAHN, L. **Processamento Da Cama de Aviário e suas Implicações nos Agroecossistemas**. 2004. Dissertação (Pós-Graduação em Agroecossistemas). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2004.

INMET. Instituto Nacional de Meteorologia. 2020. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/>.

JONES, H. B.; OGDEN, E. A. **Biomass Energy Potential From Livestock And Poultry Wastes In The Northeast**. *In: AMERICAN AGRICULTURAL ECONOMICS ASSOCIATION (AAEA) 1984, Ithaca, New York. AgEcon - Research In Agricultura & Applied Economics*. Ithaca, New York: 1984. p.17.

KRARTI, M.; CHUANGCHID, P.; IHM, P. **Foundation Heat Transfer Module for EnergyPlus Program**. *In: SEVENTH INTERNATIONAL IBPSA CONFERENCE*

- 2011, Rio de Janeiro, Brasil. Muinding Simulation. Rio de Janeiro, Brasil: 2011. p. 931-938.
- LARSEN, S. F.; SARAVIA, L.; DORADO, L.; LESINO, G. Colectores Solares De Aire Para Calefacción Mediante Piso Acumulador. **Revista: Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente. Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 11, p. 61-66, 2017.
- LUCAS, J. J. et al. **Avaliação do uso de inóculo no desempenho de biodigestores abastecidos com estrume de frangos de corte com cama de maravalha.** CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 1993, p. 915-930.
- MENEGALI, I.; Tinôco, I.; Baêta, F.; Cecon, P.; Guimarães, M.; Cordeiro, M. Ambiente térmico e concentração de gases em instalações para frangos de corte no período de aquecimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. suppl, p. 984-990, 2009.
- MICHELON, Antenor A. **Aquecedor de aviário com combustão a lenha.** MU 8001966-8 U2. Depósito: 25 ago. 2000. Concessão: 9 abr. 2002.
- MORAWSKI, S. A. **Aquecedor de aviário elétrico.** BR2014 028717 5 A2. Concessão: 17 jun. 2016.
- MOURA, D. J. de et al. Noise analysis to evaluate chick thermal comfort. **Scientia Agrícola**, v. 65, n. 4, p. 438-443, 2008.
- NASCIMENTO, G. R. do et al. Índice fuzzy de conforto térmico para frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 2, p. 219-229, 2011.
- NEITZKE, G. **Geração Elétrica Distribuída a partir Da Gaseificação De Peletes De Cama De Aviário.** 2010. Dissertação (Pós-Graduação em Ciências Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2010.
- OLIVEIRA, M. O.; SOMARIVA, R.; JÚNIOR, O. H.; NETO, J. M.; BRETAS, A.; PERRONE, O. E.; REVERSAT, J.H. Biomass Electricity Generation Using Industry Poultry Waste. **Renewable Energy and Power Quality Journal**, p. 1650-1654, 2012.
- PINTO, M. O. **Fundamentos de Energia Eólica.** 1ª ed. Brasil: LTC, 2012. *E-book*.
- PONCIANO, P. F.; LOPES, M. A.; YANAGI JUNIOR T.; FERRAZ, G. A. S. Análise do ambiente para frangos por **meio da lógica fuzzy: uma revisão.** **Archivos de Zootecnia**, v. 60, n. 232, p. 1-13, 2011.
- SILVEIRA DE AVILA, V.; MAZZUCO, H.; PEREIRA DE FIGUEIREDO, E. A. Cama de aviário: materiais, reutilização, uso como alimento e fertilizante. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Embrapa, v. **Circular técnica** n. 16, p. 41, 1992.
- SORDI, A.; SOUZA, S. N. M.; OLIVEIRA, F. H. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica proveniente do uso dos resíduos da avicultura de corte na mesorregião oeste do Paraná. **Engenharia na Agricultura**, v. 12, 2004.
- STEIL, L. **Avaliação do uso de inóculos na biodigestão anaeróbia de resíduos de aves de postura, frangos de corte e suínos.** 2001. Dissertação (Pós-Graduação em Biotecnologia) - Universidade Estadual Paulista, Araraquara - São Paulo, 2001.
- TESSARO, A. R. **Bomba De Calor AR/AR Como Sistema Alternativo No Aquecimento De Aviários.** 2011. Disertação de Maestría - Universidade Estadual Do Oeste do Paraná, Cascavel, 2011.

Ando junior et al.

ZIM, N. **Aquecedor para aviário.** MU  
9001420-0 U2. Depósito: 13 ago. 2010.  
Concessão: 20 dez. 2011.