



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE BIOLOGÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA**

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA
AMBIENTAL**

***“ANÁLISIS DE ENERGÍA Y EXERGÍA PARA GRANJAS PRODUCTORAS
DE HUEVO”***

TESIS PROFESIONAL

Que para obtener el grado de:

MESTRA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

I.B.Q. MA. CONCEPCION VEGA CRUZ

Asesor de Tesis:

DRA. LILIANA MÁRQUEZ BENAVIDES

Co-Asesor de Tesis:

DR. EDGAR LENYMIKRO MORENO GOYTIA

Morelia, Michoacán, México, Agosto 2016

AGRADECIMIENTOS

A Dios

Quien me ha acompañado en todo momento, me ha dado fortaleza y ha sabido guiarme con éxito al buen camino.

A mi madre

Quien me ha apoyado en todo momento de manera incondicional, quien creyó en mí y para poder concluir con esta meta.

A mis amigos

Los que siempre han estado apoyándome en todo momento, en los buenos y malos ratos, brindándome su amistad incondicional.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)

Por la beca otorgada que me permitió cubrir mis créditos de maestría y solventar mis necesidades económicas durante el tiempo de estudio.

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Por haberme abierto las puertas a uno de sus posgrados y a sus instalaciones para continuar con mi desarrollo profesional.

Al Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Por haberme permitido conocer nuevas áreas de la investigación y contribuir con mi formación profesional.

La presente investigación se realizó en el **Laboratorio de Residuos Sólidos y Uso Eficiente de Energía** del **Instituto de Investigaciones Agropecuarias y Forestales (IIAF)**, dependiente de la **Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH)**, bajo la asesoría de la **Dra. Liliana Márquez Benavides** y la Co-asesoría del **Dr. Edgar L. Moreno Goytia**. Así mismo, este trabajo fue financiado por el **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)**, con la beca No. **330593**.



Índice

RESUMEN	1
ABSTRACT.....	2
1. INTRODUCCIÓN	3
2. MARCO TEÓRICO	4
2.1. Cambio climático	4
2.1.1. Efecto invernadero.....	6
2.1.2. Gases causantes del efecto invernadero	6
2.1.3. Impacto de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) al cambio climático.....	7
2.2. Industria productora de huevo en México.....	8
2.2.1. Unidades productoras de huevo.....	9
2.2.2. Proceso de producción de huevo para plato	11
2.2.3. Requerimiento energético en la industria avícola	14
2.2.4. Legislación aplicable a procesos avícolas en materia de producción, agua y consumo de energía.....	15
2.3. Como contribuye el sector energético a las emisiones de GEI	15
2.3.1. Factor de emisión de energía eléctrica	16
2.4. Ambiente, energía y demanda alimentaria.....	17
3. ANTECEDENTES	19
3.1. Estudio del proceso avícola.....	19
3.2. Consumo de energía en la industria avícola.....	21
3.3. Ahorro de energía eléctrica en la producción de huevo	23
3.4. Huella de carbono de la producción de huevo	24
3.5. Análisis exergético para procesos alimenticios.....	26
4. JUSTIFICACIÓN	29
5. HIPÓTESIS	30
6. OBJETIVOS	31
6.1. Objetivo general	31
6.2. Objetivos específicos	31
7. PLAN GENERAL DE TRABAJO	32
8. METODOLOGÍA.....	34

8.1. Reconocimiento del área de estudio.....	34
8.2. Estudio del uso de la energía para la producción de huevo	38
8.3. Evaluación de la demanda energética encontrada y su emisión de CO ₂ eq.....	40
8.4. Análisis exergético para la producción de huevo.....	41
8.4.1. Cálculo de la exergía física.....	42
8.4.2. Cálculo de la exergía química.....	46
9. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	51
9.1. Perfil energético para el proceso de producción de huevo.....	51
9.1.1. Etapa de cría de pollitas.....	52
9.1.2. Etapa de desarrollo de pollitas.....	55
9.1.3. Etapa de postura.....	57
9.1.4. Demanda energética para la producción de huevo	59
9.2. Productividad energética del proceso de producción de huevo	62
9.3. Emisiones de GEI por el gasto energético en la producción de huevo	63
9.4. Análisis exergético para la producción de huevo.....	64
9.4.1. Balance exergético genera de la granja “Laguna Colorada”	65
9.4.2. Análisis exergético por equipo que participa en el proceso de producción de huevo	66
9.4.2.1. Calentador a gas L.P.....	67
9.4.2.2. Focos fluorescentes	68
9.4.3. Balance exergético por etapa del proceso de la granja “Laguna Colorada”	69
9.4.4. Reporte de resultados para el análisis exergético de la producción de huevo	72
10. COMPARATIVO EXERGÉTICO DE UNA CASETA DE AMBIENTE NATURAL Y UNA CASETA DE AMBIENTE CONTROLADO	77
10.1. Exergía específica y productividad exergética.....	79
11. ESTRATEGIAS DE AHORRO DE ENERGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE HUEVO.....	81
11.1. Sistema de calefacción	82
11.1.1. Aislamiento en las paredes de la caseta.....	82
11.1.2. Sustitución de gas L.P.....	82

11.2. Sistema de iluminación	83
11.2.1. Sustitución de focos fluorescentes	83
11.2.2. Paneles fotovoltaicos	85
11.3. Sistema de extracción de aire	86
11.3.1. Mantenimiento del equipo	87
11.4. Estimación del ahorro energético total para la granja “Laguna Colorada”	88
12. CONCLUSIONES	92
13. TRABAJOS FUTUROS	93
14. CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS	94
15. VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS	95
16. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	96
<i>ANEXOS</i>	100

Índice de tablas

Tabla 2.1. Potencial de Calentamiento Global (GWP) para GEI	7
Tabla 2.2. Tipos de instalaciones para casetas productoras de huevo	10
Tabla 2.3. Consumo de piensos para aves de postura.....	11
Tabla 2.4. Clasificación para la producción de huevo.	13
Tabla 2.5. Normas aplicables a procesos avícolas.....	15
Tabla 2.6. Factores de emisión por tipo de combustible.....	17
Tabla 3.1. Requerimiento de combustible fósil necesario para producir 1 kcal de proteína animal, referente al consumo de piensos (kg).....	22
Tabla 3.2. Comparación de costos por tipo de lámpara, costos en dólares.....	24
Tabla 3.3. Consumo de energía, exergía y emisiones de CO ₂ para la producción de una tonelada de yogurt sabor fresa	27
Tabla 3.4. Balance de exergía en una planta de procesamiento de jugo de naranja	28
Tabla 8.1. Análisis para los equipos de acuerdo al tipo de energía que se les suministra	41
Tabla 8.2. Registro de flujos de entrada y salida encontrados para la energía eléctrica.....	42
Tabla 8.3. Flujos energéticos encontrados para el calentador a gas	47
Tabla 8.4. Flujos exergéticos para el calentador.....	49

Tabla 9.1. Unidades para el reporte de resultados	51
Tabla 9.2. Resultados obtenidos para la etapa de cría de las pollitas	54
Tabla 9.3. Resultados obtenidos para la etapa de desarrollo de las pollitas	56
Tabla 9.4. Resultados obtenidos del perfil energético para la etapa de postura	59
Tabla 9.5. Demanda energética para el proceso de producción de huevo de la granja “Laguna Colorada”	60
Tabla 9.6. Emisiones de CO ₂ eq generadas en el proceso de producción de huevo	63
Tabla 9.7. Porcentaje de pérdida exergética para procesos alimenticios	66
Tabla 9.8. Unidades de reporte para resultados	72
Tabla 9.9. Resultados del análisis exergético por etapa y por proceso	73
Tabla 10.1. Diferencias entre casetas de postura de ambiente natural y controlado	78
Tabla 10.2. Comparativa exergética entre una caseta de ambiente natural y una caseta de ambiente controlado	78
Tabla 11.1. Comparativo entre focos fluorescentes y focos LED para el proceso general de la granja “Laguna Colorada”	84
Tabla 11.2. Sistema fotovoltaico para la iluminación de la granja “Laguna Colorada”	86
Tabla 11.3. Mantenimiento para sistemas de extracción de aire	87
Tabla 11.4. Estrategia general A) para el ahorro de energía	88
Tabla 11.5. Estrategia general B) para el ahorro de energía	89
Tabla 11.6. Estrategia general C) para el ahorro de energía	90

Índice de figuras

Figura 2.1. Porcentajes de los principales estados productores de huevo para el 2012	8
Figura 2.2. Ciclo de vida de una gallina ponedora	12
Figura 2.3. Participación de las categorías en las emisiones de GEI	16
Figura 3.1. Flujo simplificado de un sistema de producción de aves de corral	20
Figura 3.2. Análisis del proceso avícola, delimitado al proceso productivo de huevo	21
Figura 3.3. Huella de carbono (kg CO ₂ -eq) por cada 1000 ponedora en instalaciones de Iowa en 2009	25
Figura 3.4. Huella de carbono (kg CO ₂ -eq/ton) para la producción de huevo en instalaciones de Iowa en 2009	25

Figura 8.1. Ubicación del área de estudio.....	34
Figura 8.2. Caseta para la cría de pollitas en la granja “Laguna Colorada”	35
Figura 8.3. Caseta de postura en la granja “Laguna Colorada”	36
Figura 8.4. Delimitación para éste estudio dentro del proceso general para la producción de huevo.....	37
Figura 8.5. Diagrama de flujo del proceso para la producción de huevo en la granja.....	38
Figura 8.6. Esquema de distribución de los equipos dispuestos en la caseta de cría de la granja “Laguna Colorada”	39
Figura 8.7. Diagrama de flujos energéticos para el sistema de iluminación.....	42
Figura 8.8. Diagrama de flujos de entrada y salida de exergía en un sistema de estudio	45
Figura 8.9. Diagrama de flujos energéticos para un calentador a gas.....	47
Figura 8.10. Balance de exergía del calentador	49
Figura 9.1. Diagrama de la caseta de cría y su requerimiento energético total	53
Figura 9.2. Demanda energética en la etapa de cría	53
Figura 9.3. Diagrama de la caseta de desarrollo y su requerimiento energético total	55
Figura 9.4. Demanda energética para la etapa de desarrollo	56
Figura 9.5. Requerimiento total de energía eléctrica en una caseta de postura	57
Figura 9.6. Demanda energética para la etapa de postura.....	58
Figura 9.7. Porcentaje de la demanda energética para la producción de huevo	61
Figura 9.8. Balance exergético para el proceso de producción de huevo	65
Figura 9.9. Análisis exergético para cada equipo en el proceso (76 semanas).....	67
Figura 9.10. Pérdida de exergía para el calentador a gas.....	67
Figura 9.11. Balance exergético para cada etapa de la granja “Laguna Colorada”	70
Figura 9.12. Análisis exergético para los equipos en cada etapa del proceso	71
Figura 9.13. Demanda exergética para 1,000 aves al día en la producción de huevo	74
Figura 9.14. Demanda exergética por ton de huevo producida	75
Figura 10.1. Exergía específica y productividad exergética para la caseta de ambiente natural y ambiente controlado.....	79
Figura 11.1. Porcentaje de pérdida exergética por equipo (76 semanas).....	81
Figura 11.2. Diferencia entre el uso actual de energía eléctrica y el posible ahorro de Energía para cada 1,000 aves al día a) y por ton de huevo producido b)	91

RESUMEN

La producción de huevo en México ocupa el 5° sitio de la producción mundial y también es el país con mayor consumo de este alimento. Sin embargo, se desconoce la cantidad de energía requerida para llevar a cabo su proceso productivo; así como también el número de emisiones de CO₂eq que se generan a partir de la producción nacional de huevo.

El objetivo de la investigación fue identificar la demanda de energía eléctrica y de gas L.P., mediante un análisis energético, para de este modo cuantificar el número de emisiones de CO₂eq derivadas del proceso de producción de huevo. Además, con el análisis de exergía que presenta este estudio, se conoce el porcentaje de pérdida energética en la producción de huevo y en donde ocurren dichas pérdidas, lo que resulta útil para la reducción del consumo energético y en consecuencia, la mitigación del impacto al ambiente que representa el proceso productivo de huevo.

Los resultados obtenidos en la granja estudiada muestran que el proceso general de la producción de huevo demanda 14,681 kWh por ciclo productivo (76 semanas), lo que representa una emisión de 12.2 kg de CO₂eq por cada tonelada de huevo que en la granja se produce. Por otro lado, el análisis de exergía arrojó que el 47% de la energía utilizada en la producción de huevo es desperdiciada; esto representa una oportunidad de ahorro energético.

Mediante el análisis de exergía se hizo evidencia del exceso en la demanda energética que existe en el proceso de producción de huevo, por lo que este estudio propone alternativas al proceso para que sea sostenible energéticamente. Para lograrlo se ocupa reducir la demanda de energía y hacer uso eficiente de los recursos energéticos disponibles que permita mitigar el impacto de las emisiones de GEI en el ambiente derivadas de la producción de huevo.

palabras Clave: analisis exergetico, emisiones de co2, energia, producción de huevo y eficiencia energetica.

ABSTRACT

Egg production in Mexico occupies the 5th place of the global production; also it is the country with the highest egg consumption. However, the energy amount required to carry out its processes are largely unknown; as well as the associated $CO_{2equivalent}$ (CO_{2eq}) emissions to this productive process.

The goal of this study was the identification of the electrical energy and L.P. gas demand with an energy analysis; to thereby quantify the $CO_{2equivalent}$ emissions from egg production process. Besides, with exergy analysis of this study the percent of loss energy to egg production is known and the site where the losses are. This is useful to energy consumption reduce and, like consequence the mitigation of environmental impact that egg production has.

The obtained results showed that the studied farm the egg production total process energy demand 14,681 kWh per each cycle (76 weeks); that represented 12.2 kg of $CO_{2equivalent}$ emissions per each egg ton of egg produced at this farm. On the other hand, exergy analysis shows the 47% loss energy at egg production; as represented a chance to energy save.

By exergy analysis the energy demand excessive was evidence to the process of egg production, so this study proposes alternatives to sustainable energy for the process. To achieve reduced energy demand and make efficient use available energy resources that may mitigate the environmental impact for the GHG emissions derived to egg production.

1

INTRODUCCIÓN

México se encuentra en el 12° sitio a nivel mundial en emisiones de CO₂, lo que sugiere un aproximado del 1.5% del total de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) a nivel mundial (INEGEI 1990-2010). Del total de las emisiones de CO₂ que México reportó para el 2010, 12.3% se adjudica a la agricultura, la cual se divide, de acuerdo con el INEGEI (1990-2010), en 1) procesos agrícolas (cultivos y manejo de suelos) y 2) procesos pecuarios (fermentación entérica y manejo de estiércol). Dentro de los procesos pecuarios se encuentra la avicultura, esta representa una de las actividades más dinámicas en el sector agroalimentario del país con un 63% del total de la producción pecuaria total. De este porcentaje, el huevo para plato se estima tiene un 29% de participación (UNA, 2013).

México se destaca por tener el primer lugar en consumo de huevo fresco y el sexto lugar como productor de este alimento, seguido de China, Estados Unidos, India, Rusia y Japón respectivamente (UNA, 2012). La Unión Nacional de Avicultores, UNA, ha señalado que para el año 2013, la producción de huevo fue de 2.5 millones de toneladas y se estimó un consumo per cápita de 21.9 kg por año. La industria avícola requiere de energía eléctrica para su iluminación y calefacción adecuadas y así conseguir el confort idóneo para las aves de postura (FAO, 2013). Se debe considerar el gasto energético que las instalaciones avícolas consumen, en especial en el proceso de producción de huevo para plato. Conocido este consumo, se abre una puerta para la huella de carbono relacionada directamente con dicha producción para dar pie a un proceso eficiente energéticamente, consiguiendo ahorrar energía eléctrica y gas L.P. en el proceso de producción de huevo para plato.

En la actualidad, México no cuenta con la información necesaria para poder estimar las emisiones de GEI que representa el sector avícola, por lo tanto el objetivo que tendrá este trabajo es analizar el gasto energético y potencializar el ahorro energético que representa la producción de huevo dentro de la industria avícola nacional y con ello establecer paramétricamente la contribución que este proceso tiene a los gases de efecto invernadero (GEI).

2

MARCO TEÓRICO

2.1. Cambio climático

El Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC) define el cambio climático como la variación en el estado medio del clima en la atmósfera terrestre y que persiste durante un periodo prolongado. Este cambio se puede deber a procesos naturales o cambios antropogénicos persistentes en la composición de la atmósfera, suelo y agua (IPCC, 2001). Otra definición para este término es la que cita la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMCC). Esta lo define como un cambio del clima que se atribuye de manera directa o indirecta a la actividad humana y que altera la composición de la atmósfera mundial sumándose a la variabilidad natural del clima observada durante periodos de tiempo comparables. Todas éstas alteraciones al clima a las que hacen referencia las definiciones anteriores se deben a la cantidad de calor que es retenida en la atmósfera de la Tierra, a la variación de energía solar que llega a la superficie terrestre y la capacidad que ésta tiene para reflejarla a la atmósfera (EPA, 2013).

La temperatura de la Tierra depende del equilibrio entre las entradas y salidas del sistema energético del planeta (EPA, 2013), aproximadamente una tercera parte de la energía solar que alcanza la zona superior de la atmósfera terrestre, se refleja directamente de nuevo al espacio, mientras que las dos terceras partes restantes son absorbidas por la superficie y en menores cantidades por la atmósfera; entonces, la Tierra debe equilibrar la energía entrante que absorbe teniendo que irradiar la misma cantidad de energía al espacio, pero como la Tierra es mucho más fría que el Sol, ésta irradia en longitudes de onda mucho más largas para la banda infrarroja del espectro (IPCC, 2007).

El cuarto reporte de evaluación del IPCC sobre el Cambio Climático 2007 afirma que el cambio climático para futuros años (haciendo una estimación al año 2020), se manifestará a través de ciclones tropicales más intensos y el nivel del mar aumentará entre 0.18 y 0.54 metros a nivel global, así como también aumentarán las precipitaciones en latitudes altas y en las regiones donde actualmente son abundantes; disminuyendo en los subtrópicos y en lugares donde existe escasa precipitación. México en particular, se encuentra vulnerable ante este tipo de eventos climáticos extremos lo que ha provocado pérdidas de alrededor de 2.1 millones de pesos anuales. Estos impactos representan consecuencias sociales, económicas y ambientales (INECC, 2012).

A nivel mundial, el cambio climático se encuentra relacionado a cambios en los ecosistemas y su biodiversidad así como en la actividad humana que influye sobre ellos, desde los océanos y ecosistemas marinos, los bosques, hasta las formas en que conseguimos nuestros alimentos (agricultura y ganadería), así como las formas en que producimos se distribuye y consume la energía. Aunque el cambio climático se considera un proceso normal del planeta, este proceso se ha visto acelerado por la actividad antropogénica y la generación excesiva de Gases de Efecto Invernadero (GEI) (Cárdenas, 2010).

En el quinto informe de evaluación del IPCC sobre el cambio climático 2013, se ha detectado la influencia humana en el calentamiento de la atmósfera y los océanos, así como alteraciones en el ciclo global del agua, reducciones de la cantidad de nieve y hielo, la elevación media mundial del nivel del mar y en los cambios de algunos fenómenos climáticos extremos; estos cambios, ya sean positivos o negativos, para el balance energético global se expresan en términos de forzamiento radiativo (magnitud utilizada para comparar las influencias de naturaleza térmica sobre el clima mundial); el informe considera las contribuciones de los forzamientos antropogénicos al calentamiento medio global se sitúan en un rango de -0.6°C y 0.1°C , mientras que la contribución de los forzamientos naturales se encuentra entre -0.1°C y 0.1°C ; con esto se deja evidencia de que el incremento a la temperatura global no se debe únicamente a la variabilidad natural de las temperaturas (IPCC, 2013).

2.1.1. Efecto invernadero

La atmósfera de la Tierra es una mezcla de gases y aerosoles (partículas sólidas y líquidas), los cuales son responsables de absorber la radiación térmica emitida por los suelos y el océano para volverla a irradiar a la Tierra, actuando como una manta; a este proceso se le conoce como “el efecto invernadero” y hace posible la vida tal y como se conoce en el planeta (EPA, 2013).

2.1.2. Gases causantes del efecto invernadero

Se les denomina Gases de Efecto Invernadero (GEI) a los gases que atrapan el calor en la atmósfera, como el vapor de agua (H_2O), dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) y gases como los hidrofluorocarbonados (HFC), perfluorocarbonados (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF_6); muchos de éstos gases son generados y emitidos por actividades humanas. La EPA (2013) reconoce a cuatro tipos de GEI de larga permanencia:

1. Dióxido de carbono (CO_2), el cual se origina a través de la quema de combustibles fósiles (carbón, gas natural y petróleo), residuos sólidos, árboles y productos de madera, y también a consecuencia de ciertas reacciones químicas utilizadas principalmente en industrias. El CO_2 es removido de la atmósfera cuando se absorbe por las plantas como parte del ciclo biológico del carbono.
2. Metano (CH_4), se emite durante la producción y transporte de carbón, gas natural y petróleo. Las emisiones de CH_4 también son resultado de la ganadería y otras prácticas agrícolas y por la descomposición de residuos orgánicos en los vertederos municipales de residuos sólidos.
3. Óxido nitroso (N_2O), es emitido durante actividades agrícolas e industriales, así como en la combustión de combustibles fósiles y por la descomposición de residuos sólidos en vertederos municipales.
4. Gases fluorados, los hidrofluorocarbonados, perfluorocarbonados y el hexafluoruro de azufre, son gases de efecto invernadero considerados sintéticos y son emitidos por una gran variedad de procesos industriales, se emiten principalmente en pequeñas cantidades, pero debido a su gran capacidad de retener el calor en la atmósfera, son considerados como gases de alto potencial de calentamiento atmosférico.

2.1.3. Impacto de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) al cambio climático

El efecto que tienen los GEI en el cambio climático depende principalmente de la concentración en que estos sean emitidos y del tiempo que permanecen en la atmósfera. A mayor emisión de GEI mayor su concentración en la atmósfera (medida en partes por millón (ppm)). Las mediciones que se han hecho para estimar las concentraciones de GEI a nivel mundial son consideradas aproximadamente las mismas, sin tomar en cuenta el tipo de emisiones de GEI o la fuente de la cual provenga (EPA, 2014).

Cada tipo de gas de efecto invernadero que se emite cuenta con un Potencial de Calentamiento Global (GWP, por sus siglas en inglés), los gases con un estimado mayor de GWP son capaces de absorber más energía y de ésta forma contribuir al calentamiento de la Tierra. Se define el GWP como una medida de la energía total que absorbe un gas en determinado horizonte de tiempo (Barros, 2006), en el Protocolo de Kioto, se adoptaron 100 años como el horizonte de tiempo para los GEI y se expresan en forma relativa al GWP de un gas de referencia, que se adoptó al CO₂, por la importancia que éste gas representa en el problema del cambio climático y por ser el gas de efecto invernadero con mayor porcentaje en la composición atmosférica. De acuerdo con el IPCC (2007), se tiene establecido un GWP para cada uno de los gases (Tabla 2.1.), que permite estimar las emisiones de CO₂ equivalente para cada tipo de gas que se está emitiendo, esto se obtiene del producto de la cantidad de GEI emitida por su GWP establecido.

Tabla 2.1. Potencial de Calentamiento Global (GWP) para GEI (EPA, 2013).

Gas de Efecto Invernadero	Fórmula química	GWP ₁₀₀
Dióxido de carbono	CO ₂	1
Metano	CH ₄	25
Óxido nitroso	N ₂ O	298
Hidrofluorocarbonados	---	124 – 14800
Perfluorocarbonados	---	7390 – 12200
Hexafluoruro de azufre	SF ₆	22800

2.2. Industria productora de huevo en México

La Unión Nacional de Avicultores (UNA) indica que la actividad avícola mexicana ha crecido en los últimos 2 años a un ritmo constante anual del 5%, contribuyendo de manera importante al desarrollo del Producto Interno Bruto (PIB). El sector avícola tiene una participación del 63% de la producción pecuaria. El 29% de esta producción es de huevo para plato con 2.5 millones de toneladas en el 2013 (UNA, 2013). Esta producción ubica a México como sexto productor mundial de huevo para plato (UNA, 2013).

De acuerdo con el censo Agrícola, Forestal y Ganadero 2007 del INEGI, el país cuenta con 131'065,007 de gallinas ponedoras para abastecer el mercado nacional. Los principales estados productores son: Jalisco, Puebla, Sonora y Nuevo León. La Figura 2.1 muestra los porcentajes que cada uno de estos estados aportó a la producción de huevo en el año 2012.

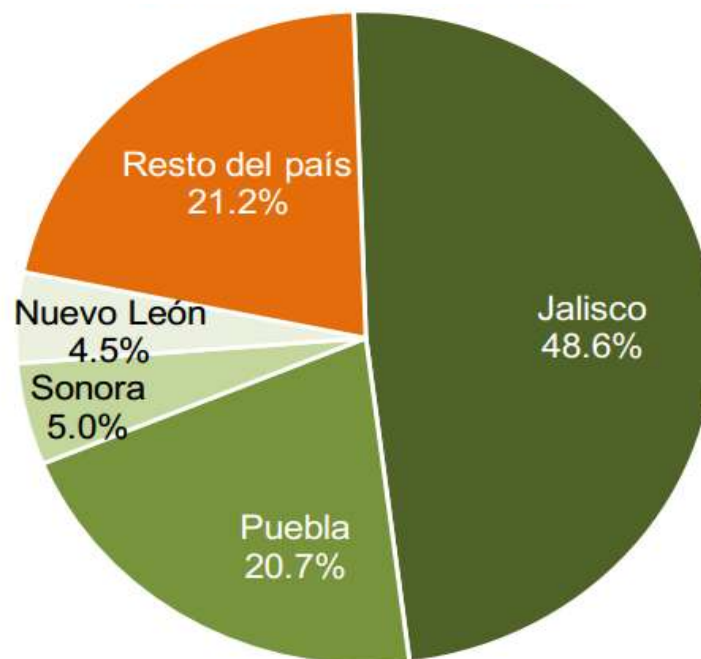


Figura 2.1. Porcentajes de los principales estados productores de huevo para el 2012.
(SIAP-SAGARPA, 2012)

2.2.1. Unidades productoras de huevo

Existen diferentes formas de producir huevo para plato, de acuerdo con la Organización Interprofesional del Huevo y sus Productos (2011), son cuatro las formas del alojamiento para las gallinas ponedoras, de las cuales no se tiene registro en la variación nutricional del producto; estas formas de alojamiento son:

1. Producción en jaula: Permite un control sanitario efectivo, las aves tienen acceso directo y constante a una alimentación equilibrada y agua.
2. Producción en suelo: En estas instalaciones las aves se disponen libremente en las naves y cuentan con comederos, bebederos, perchas y nidos para poner los huevos.
3. Producción campera: Las aves también se encuentran alojadas en naves pero estas cuentan con acceso a corrales al aire libre.
4. Producción orgánica: Estas instalaciones son iguales a la producción campera, la diferencia radica en la alimentación de las aves que es proveniente exclusivamente de la agricultura orgánica.

De estas cuatro formas de alojamiento que plantea la Organización Interprofesional del Huevo y sus Productos en México es comúnmente utilizada la producción en jaulas (SAGARPA, 2009).

Las jaulas, unidades o casetas productoras de huevo tienen la finalidad de brindar protección, comodidad y seguridad a las aves creando un ambiente adecuado para la producción. De acuerdo con el Manual de Buenas Prácticas Pecuarias Producción de Huevo Para Plato (SAGARPA, 2009) se pueden encontrar dos tipos de casetas para la producción de huevo: las casetas abiertas y las casetas cerradas o de ambiente controlado. En la tabla 2.2 se pueden observar las diferentes características que presentan cada tipo de unidad.

Tabla 2.2. Tipos de instalaciones para casetas productoras de huevo (SAGARPA, 2009).

Tipo de instalación	Características
Caseta de ambiente controlado	<p>Construcciones cerradas</p> <p>Temperatura, humedad y ventilación artificiales</p> <p>Alta tecnología</p> <p>Fuerte inversión económica</p>
Caseta de ambiente natural	<p>Construcciones de muros abiertos</p> <p>Máxima ventilación natural</p> <p>Cuentan con cortinas o sombreaderos</p> <p>Barreras de aire según orientación topográfica</p>

Las unidades de producción se deben diseñar según el Manual de Buenas Prácticas Pecuarias Producción de Huevo Para Plato. Estas son:

- Ancho de la caseta: 10 a 15 m (depende del clima de la región).
- Alto de la caseta: 2.2 a 3 m. Jaulas de 3 o más niveles requieren mayor altura.
- Largo de la caseta: Hasta 100 m de largo, esto depende de la producción que se desea alcanzar.
- Pisos: De concreto o similar que permita la fácil remoción de la gallinaza.
- Paredes y techos: Concreto, tabique, block o acero recubiertos de material aislante (poliuretano expandido, en espuma o planchas). En unidades abiertas se recomienda blanquear techos y paredes para disminuir la absorción de calor.
- Puertas: No existe una media, pero se recomiendan suficientemente grandes para el libre acceso de vehículos que retaran la gallinaza, las aves y el producto.

2.2.2. Proceso de producción de huevo para plato

De acuerdo con lo analizado para las unidades de producción de huevo y las instalaciones de las casetas que alojan las jaulas de producción, lo siguiente es conocer el proceso productivo, para lo cual el Manual de Buenas Prácticas Pecuarias Producción de Huevo para Plato establece 3 etapas de manera general (SAGARPA, 2009):

1. Cría de las gallinas ponedoras

Esta etapa se debe realizar en ambientes controlados para lograr el desarrollo reproductivo de las aves de postura, el lote completo permanece así hasta su traslado, el cual se hace en cajas de 56x 46x15 cm, respetando el manejo de 85 a 100 pollitas por caja.

2. Producción

Una vez en la unidad de producción de huevos, se debe proveer a las gallinas de luz, agua y alimento (Tabla 2.3.). La iluminación y el alimento, representan un factor importante para la tasa de producción, considerando los siguientes puntos:

- No aumentar ni disminuir la longitud del día durante el desarrollo.
- La iluminación debe programarse para iniciar la producción con el peso corporal, desarrollo y condición correctos.
- Proveer de 17 horas de luz (natural + artificial).
- Comienza a las 17-18 semanas de edad.

Tabla 2.3. Consumo de piensos para aves de postura (SAGARPA, 2009).

Etapas	Desglose	Ración diaria (gr)
Desarrollo	Crecimiento (4 a 16 semanas)	80
	Desarrollo (16 a 18 semanas)	90
Postura	Postura (19 a 71 semanas)	110

3. Embalaje de huevo

Existen 2 formas para llevar a cabo la etapa de embalaje de huevo. Estas son 1) Manual o 2) Mecanizada, que es la más común actualmente. En la segunda se usa una banda en movimiento de 5 a 10 cm de ancho, que se encuentra colocada al frente de las jaulas y entrega el huevo al final de cada hilera donde se recolectan todos los huevos de la hilera. Desde este punto el huevo es transportado directamente a la empacadora para su limpieza y clasificación y empaque.

Las tres etapas que recién se han descrito se resumen en la Figura 2.2. En ésta se aprecia el ciclo de vida de una gallina ponedora, desde la inclusión de la pollita, hasta concluir su periodo reproductivo. La imagen incluye la producción de huevo para incubación y para plato. Este último es del interés para este trabajo (García, 2009).



Figura 2.2. Ciclo de vida de una gallina ponedora (García, 2009).

En México, la clasificación del producto obtenido (huevo para plato), según la norma NMX-FF-079-SCFI-2004 y sus especificaciones se detallan en la Tabla 2.4.:

- A) México extra
- B) México 1
- C) México 2
- D) Fuera de clasificación

Tabla 2.4. Clasificación para la producción de huevo (NMX-FF-079-SCFI-2004).

Grado de clasificación	Cascarón	Clara	Yema
México extra	Normal, íntegro y limpio	Limpia, firme y transparente, los límites de la yema deben estar claramente definidos	De forma redondeada, libre de defectos, ubicada al centro sin manchas de sangre y carnosidades
México 1	Normal, íntegro y limpio	Transparente y firme, permitiendo ver los bordes de la yema	De forma redondeada, libre de defectos, ubicada al centro sin manchas de sangre y carnosidades
México 2	Puede presentar anomalías pero debe estar intacto, libre de manchas, excremento, sangre u otros materiales	Puede ser débil y acuosa de tal forma que la yema se acerque del cascarón provocando que ésta sea poco visible, puede presentar puntos de sangre o carne sin exceder los 3.1 mm	Puede aparecer oscura y estar ligeramente aplanada o alargada, desplazada fuera de la posición céntrica pero sin sangre.
Fuera de clasificación	Lavado, sucio, manchado de sangre, excremento o cualquier materia extraña, quebrado	Cuando tenga cuerpos extraños o manchas, que solas o en conjunto tengan un tamaño mayor a 3.1 mm o cuando aparezca turbia	Oscura, no céntrica, de conformación anormal con disco germinativo desarrollado y/o crecimiento microbiológico

2.2.3. Requerimiento energético en la industria avícola.

La gran mayoría del consumo energético de las granjas avícolas está directamente asociado al confort y bienestar de las aves, debido a la temperatura, ventilación y calidad del aire adecuados. El uso de energía (luz y gas) varían en cada granja y según el desarrollo de las aves, las características de la nave y el tipo de unidad o case que se tenga y el mantenimiento. La ubicación geográfica de la granja juega un factor importante para determinar el consumo de energía. De este consumo depende el tipo de aislamiento que se deba usar para minimizarlo (Vaca, 2008).

Para una caseta de ambiente controlado, por ahora el consumo de combustibles fósiles (petróleo, gas y sus derivados) es necesario. Sin embargo, la quema de éste tipo de combustibles contribuye con la generación de emisiones de CO₂.

En las granjas avícolas productoras de huevo para plato, los combustibles fósiles se consumen principalmente en:

- Equipos de alimentación, utilizados para distribuir el alimento hasta las jaulas de las aves.
- Iluminación de la granja, necesaria para estimular la producción de las gallinas.
- Conservación y transporte de huevos.
- Climatización y ventilación del local, con predominio en la época de verano con el fin de evitar que la temperatura dentro de las casetas ponga en peligro la vida de las aves.

Adicionalmente estas actividades ocupan agua por lo que hay que agregar energía eléctrica para motores y equipos de bombeo.

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE) presenta varias metodologías para poder representar las emisiones de GEI derivadas de los consumos de energía.

2.2.4. Legislación aplicable a procesos avícolas en materia de producción, agua y consumo de energía

La Tabla 2.5 presenta la normatividad que regula de manera directa e indirecta las granjas productoras de huevo, esto en base a lo indicado en los catálogos de Normas Mexicanas y Normas Oficiales Mexicanas que emite la Secretaría de Gobernación:

Tabla 2.5. Normas aplicables a procesos avícolas.

Norma	Descripción
NOM-159-SSA1-1996	Bienes y servicios. Huevo, sus productos y derivados. Disposiciones y especificaciones sanitarias.
NMX-FF-079-SCFI-2004	Productos avícolas. Huevo fresco de gallina. Especificaciones y métodos de prueba.
NOM-001-SEDE-2012	Instalaciones eléctricas (utilización).
NOM-017-ENER/SCFI-2012	Eficiencia energética y requisitos de seguridad de lámparas fluorescentes compactas autobalastadas. Límites y métodos de prueba.
NOM-004-ENER-2008	Eficiencia energética de bombas y conjunto motor-bomba, para bombeo de agua limpia, en potencias de 0,187 kW a 0,746 kW. Límites, métodos de prueba y etiquetado.

2.3. Como contribuye el sector energético a las emisiones de GEI

El sector energético se encuentra íntimamente ligado con el crecimiento económico y social del país, ya que la energía es insumo en todos los sectores de la economía, además, el sector energético es responsable de más de la mitad de las emisiones de gases de efecto invernadero a nivel mundial (AEI, 2009). La generación y uso de la energía contribuyen de manera significativa a la emisión de GEI, de aquí la importancia de generar datos estadísticos que permitan realizar los cálculos de sus emisiones.

De acuerdo con el Inventario Nacional de Emisiones de Gases Efecto Invernadero (1990-2010, INEGEI), la categoría de energía es la principal fuente de emisiones de Gases Efecto Invernadero (GEI), la cual representó en México 67.3% del total de las emisiones durante 2010 y, dentro del contexto mundial, la Agencia Internacional de Energía ha identificado que la categoría de energía contribuye con aproximadamente 82.0% de las emisiones de GEI en el mundo; el 44.0%, se derivan de la liberación de CO₂. El consumo de energía y las emisiones de GEI asociadas al consumo de combustibles en el país, han mostrado un comportamiento ascendente en los últimos años. De 2002 a 2012 la tasa de crecimiento promedio anual del consumo de energía fue de 2.0%, mientras que las emisiones por consumo de combustibles crecieron 2.7% promedio anual (SENER, 2012).

Los sectores agrícola, residencial, servicios y comercial dependen de la energía a partir de la electricidad y petrolíferos, diésel, gas natural y gas L.P. Para el 2010 ésta categoría aportó en promedio 503,817.6 Gg de CO_{2eq}, mientras que la agricultura el 12.3% (92,184.4 Gg CO_{2eq}), como se muestra en la figura 2.2.

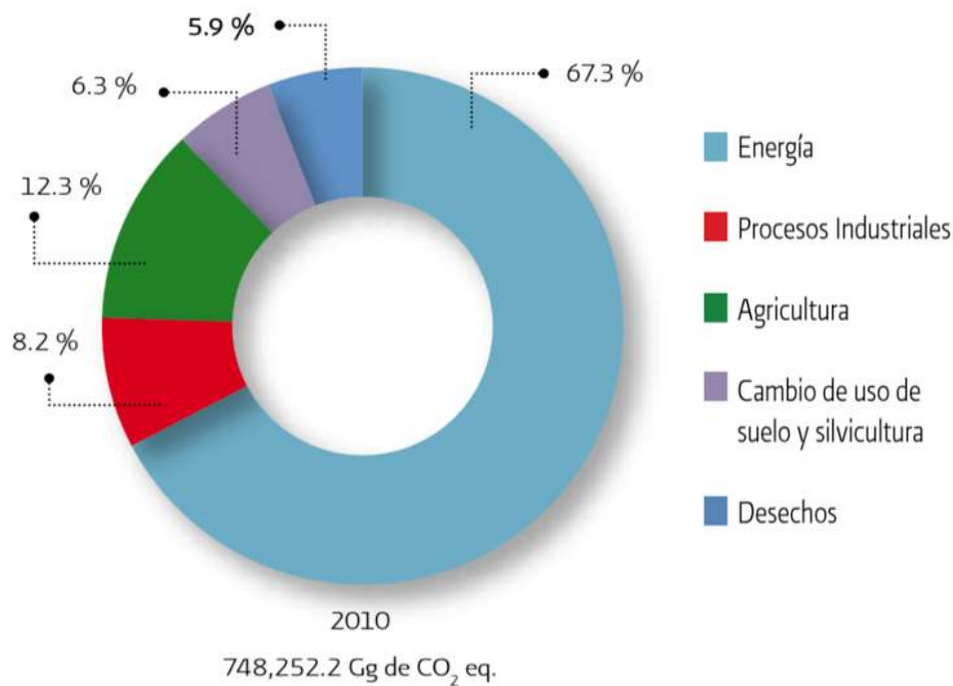


Fig. 2.3. Participación de las categorías en las emisiones de GEI (INEGEI, 2010).

2.3.1. Factor de emisión de energía eléctrica

Este factor se emplea para la estimación de emisiones de GEI indirectas y que provienen del uso de la electricidad (SEN, 2013). Participando principalmente dos sectores: el público y el privado; el sector público lo integra la Comisión Federal de Electricidad (CFE) y Productores Independientes de Energía (PIE), el sector privado agrupa diferentes modalidades de cogeneración, abastecimiento, usos propios y exportaciones, cabe mencionar que para el uso de este factor solo se considera la electricidad del sector público y datos que de ella se obtengan.

El IPCC ofrece factores de emisión para los combustibles más comunes, éstos se muestran en la Tabla 2.6.:

Tabla 2.6. Factores de emisión por tipo de combustible (IPCC, 2013).

Combustible	CO ₂ (kg CO ₂ /TJ)	CH ₄ (kg CH ₄ /TJ)	N ₂ O (kg N ₂ O /TJ)
Carbón	94600	1	1.5
Diésel	74100	3	0.6
Combustóleo	77400	3	0.6
Gas Natural	56100	1	0.1

2.4. Ambiente, energía y demanda alimentaria

La disponibilidad y accesibilidad de los alimentos son temas de gran importancia para todos los países, el sector alimentario ocupa la primera posición a nivel mundial entre las necesidades jerárquicas del ser humano y éstos representan una alta demanda de recursos energéticos, que va a depender del tipo de alimento que se esté produciendo y el uso eficiente que se le esté dando a la energía; sin embargo, los cambios en los sistemas intensivos de producción de alimentos ha venido de la mano en los últimos años con la disponibilidad relativamente barata de combustibles fósiles y que además se hace evidente en los países en vías de desarrollo debido a que los sistemas de producción que utilizan no son para nada funcionales con el medio ambiente (Kanaly *et al.*, 2009).

Aunque las necesidades energéticas de un país para la producción de sus alimentos no se considere necesariamente en el presupuesto energético del mismo, deben ser tomados en cuenta debido a la marcada industrialización en los sectores de producción de alimentos, dado que las proyecciones indican que la industrialización en este ramo continuará en aumento (FAO, 2012). El Consejo Mundial de la Energía (2007), proyecta que para el año 2050 la demanda de energía primaria se elevará a unos 15 millones de toneladas de petróleo por año, lo que significa tres veces más el nivel de la demanda actual (5 millones de toneladas por año), y por ende la energía de combustibles fósiles se prevé que represente el 70% de este aumento en la demanda (CME, 2007).

En los últimos años, la producción de carne, leche y huevos se ha desplazado de Europa, Norteamérica y América Central a Asia y América del Sur, cabe destacar que para el año 2005, los países en desarrollo estaban contribuyendo 54,7% a la producción mundial de carne y el 67,7% a la producción de huevo (Windhorst, 2006). Por otra parte, Windhorst (2006) señaló que cinco países en desarrollo también se habían convertido en los productores de huevos dominantes para el 2005: India, México, Brasil, Indonesia y Turquía (Windhorst, 2006). Y hasta la actualidad, México sigue constante, siendo uno de los principales productores de huevo a nivel mundial (UNA, 2013), lo que nos lleva a pensar en los consumos de energía que se usan para el proceso, sin embargo no se cuenta con los datos necesarios para poder estimar el uso de energía y por ende las emisiones de GEI que de este proceso se están emitiendo.

3

ANTECEDENTES

3.1. Estudio del proceso avícola

Analizar el perfil de consumo de energía eléctrica, gas y agua del proceso avícola redonda caracterizar y particularizar el performance energético de elementos y bloques constitutivos y asimismo catalogar los mecanismos y procesos por cantidad de consumo y por tipo de fuente de energía. Analizar, estudiar y entender el proceso desde la óptica entrada (electricidad+gas+agua) / salida (huevo para plato) permitirá verificar los promedios y límites que tiene un consumo de energía y aquellos en donde se pueden iniciar programas de conservación y ahorro de energía. En la figura 3.1 se observa el proceso avícola ideal, mostrando las entradas y recirculaciones del proceso únicamente, así como los diferentes requerimientos (Vamilson *et al.* 2008). Sin embargo, en todo el proceso productivo se identifican diferentes entradas que representan salidas de diferente tipo, en el proceso avícola se identifican principalmente:

- Consumo de energía al interior de la granja
- Producción de piensos
- Manejo y disposición de los residuos
- Transporte de insumos y productos

Estas entradas al sistema productivo delimitan el estudio para la producción de huevo, como lo muestra la Figura 3.2., que es de interés para el conocimiento de las emisiones de GEI (Wiedemann y McGahan, 2011).

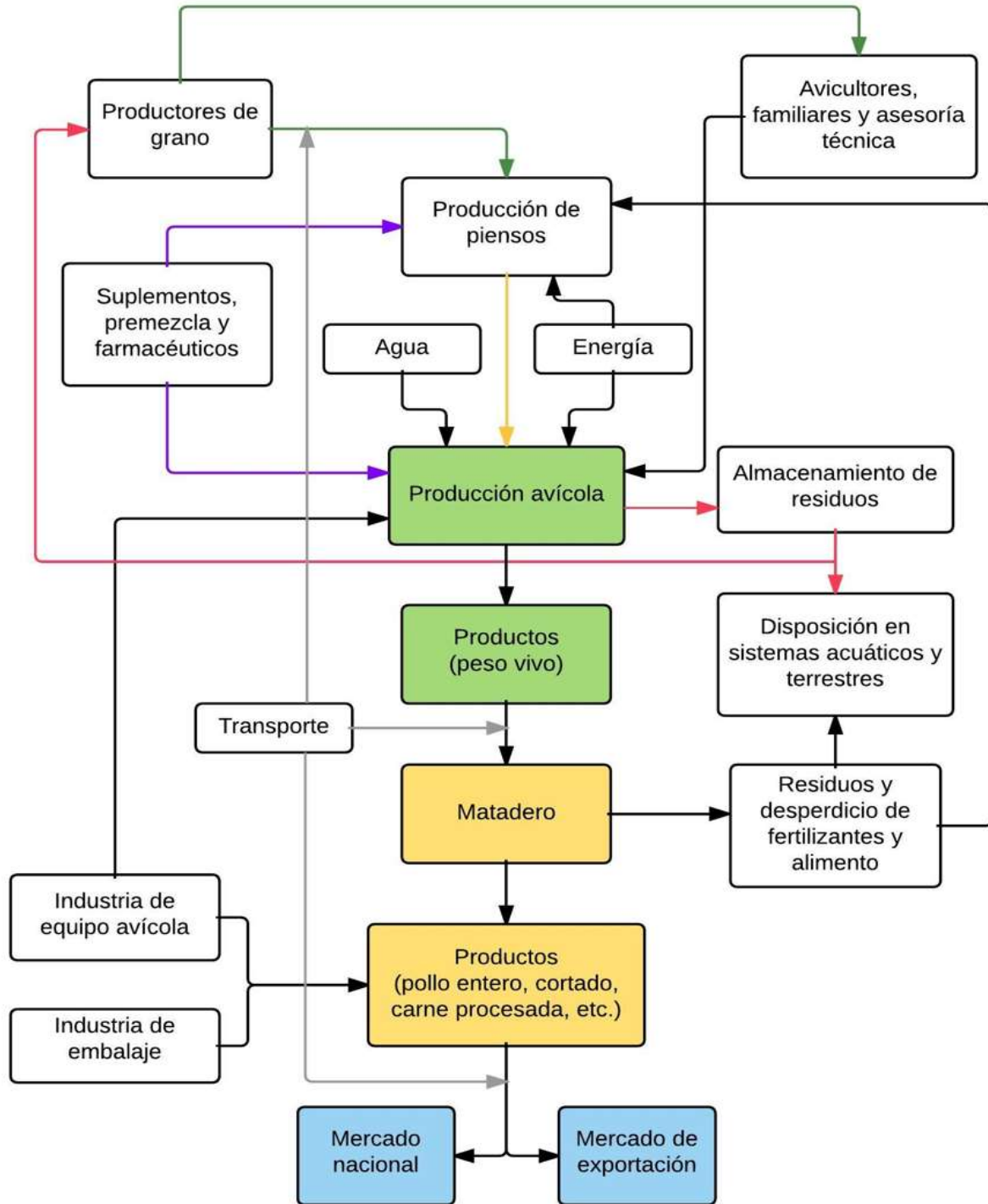


Figura 3.1. Flujo simplificado de un sistema de producción de aves de corral

(Vamilson *et al.* 2008).

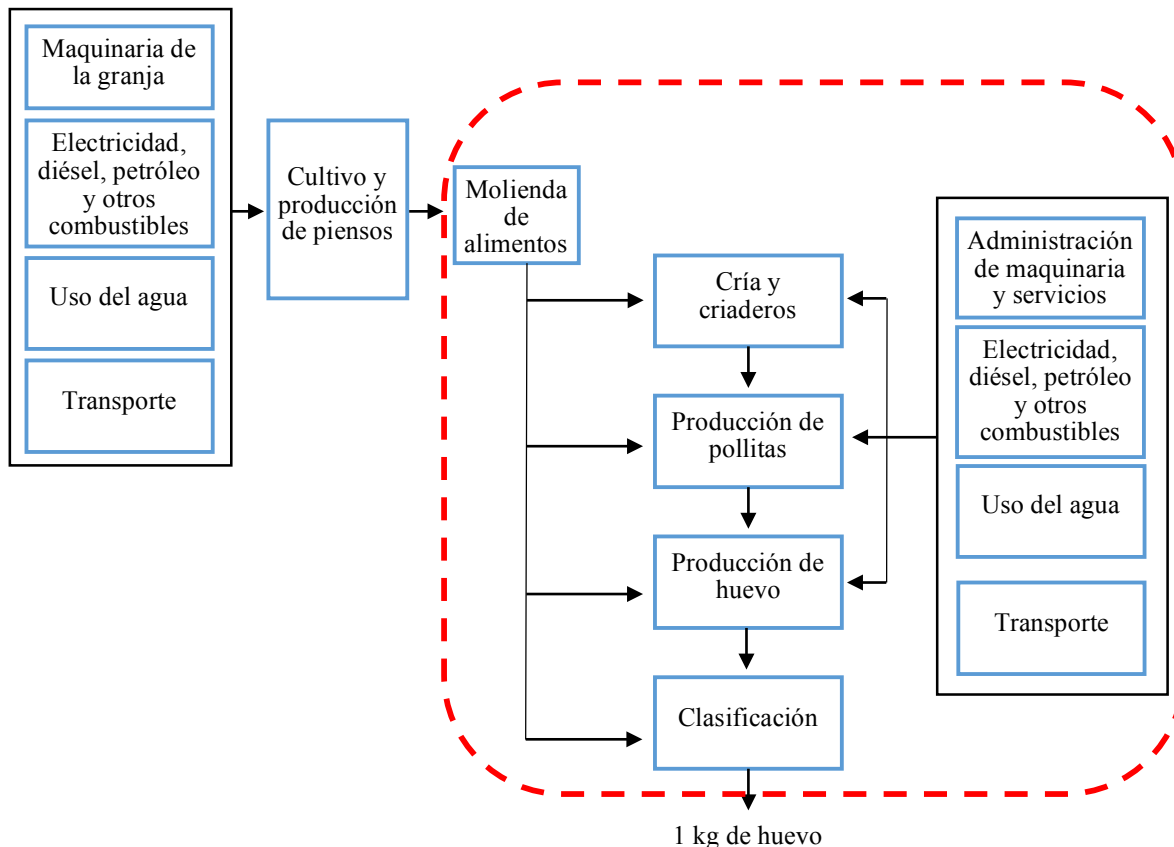


Figura 3.2. Análisis del proceso avícola, delimitado al proceso productivo de huevo (Wiedemann y McGahan, 2011).

3.2. Consumo de energía en la industria avícola

Las granjas avícolas requieren de grandes cantidades de energía para proveer de confort térmico, calidad del aire y luminosidad adecuada para las aves en las diferentes etapas de crecimiento y producción de huevo. De igual manera se requiere de energía para movilizar el alimento, equipo, materiales, deshechos, entre otras actividades como la obtención de agua, etc. Los sistemas de producción avícola inciden en diferentes gastos de energía y debido a la similitud que existe entre las granjas, Pimentel y Pimentel (2003) compara la producción del sector avícola (carne de ave y huevo) y el sector ganadero (carne de cerdo y ganado vacuno) estadounidenses con los costos energéticos para la producción de 1 kcal de proteína animal.

A partir del consumo de piensos en kg (grano y forraje) de los cuáles ya se tiene conocimiento de la cantidad de combustible fósil que se requiere para llegar hasta el consumo de los animales, observando que el mayor consumo de energía se obtiene de la producción de huevo y el ganado vacuno como lo muestra la tabla 3.1. En México, desafortunadamente no se cuenta con los datos que puedan ayudar a determinar el consumo de energía fósil para la producción de éstos alimentos de origen animal.

Tabla 3.1. Requerimiento de combustible fósil necesario para producir 1 kcal de proteína animal, referente al consumo de piensos (kg) (Pimentel y Pimentel, 2003).

Ganado y productos pecuarios	Grano (kg)	Forraje (kg)	Entrada de kcal / kcal de proteína
Cordero	21	30	57 : 1
Ganado vacuno	13	30	40 : 1
Huevo	11	---	39 : 1
Cerdo	---	---	14 : 1
Leche	0.7	1	14 : 1
Pavo	3.8	---	10 : 1
Pollo de engorde	2.3	---	4 : 1

Esta Energía Metabolizable, la define López (2013) como la energía que se encuentra disponible en los alimentos (piensos) que consumen las aves y los requerimientos de energía que las aves necesitan para llevar a cabo sus funciones metabólicas básicas y entre ellas, la producción de huevos. La principal idea que plantea López (2013), es la utilización de la Energía Metabolizable (Em) que generan las gallinas ponedoras por el simple hecho de alimentarse y utilizar ésta energía para los requerimientos de las ponedoras en la etapa de producción (producción de masa de huevo).

Calculando los valores energéticos de grasas y proteínas conocidos por la literatura, López (2013) estimó que la Energía Metabolizable promedio de una ponedora es aproximadamente de 303 kcal. Este dato es de gran utilidad a la hora de requerir energía eléctrica para calefacción de las casetas productoras, puesto que como lo plantea López (2013), por qué consumir más energía de la que las mismas aves la están produciendo.

3.3. Ahorro de energía eléctrica en la producción de huevo

Dentro del proceso productivo de huevo, los aspectos de mayor consumo energético los clasifica Oviedo (2009) en: Iluminación, construcción y aislamiento térmico de las casetas, ventilación y calentamiento de las casetas. Por otro lado, Briganó (2015) expuso que la iluminación ideal para las granjas avícolas en Brasil va de los 40 lux en las primeras 3 semanas de vida de las aves, teniendo la capacidad de poder bajar de 3 a 5 lux para el final del ciclo productivo de las ponedoras; para lo cual propone 3 tipos de lámparas: Incandescentes, Fluorescentes y LED, de las cuáles analizó su rendimiento, cayendo en cuenta que la mejor opción son las lámparas LED, que a pesar de su alto costo inicial de implantación (hasta tres veces más que cualquiera de las otras dos opciones), su buen retorno de inversión se ve reflejado, como lo muestra la Tabla 3.2.

A pesar del conocimiento que se tiene ya del consumo de energía eléctrica para la iluminación de las casetas productoras de huevo; las prácticas que se realizan en este rubro para tratar de minimizar los costos aún están quedando rezagadas, al menos en México, esto ocurre debido a los subsidios con los que cuentan la mayoría de las granjas productoras de huevo.

Tabla 3.2. Comparación de costos por tipo de lámpara, costos en dólares (Briganó, 2015).

	Incandescente	Fluorescente	LED
No. de lámparas	90	90	120
Costo de implantación	137.40	343.51	1820.61
Potencia total (kW/h)	5.40	1.35	0.95
\$/hora	0.62	0.15	0.11
\$/lote	688.81	172.20	121.69
\$/año (Electricidad)	4132.85	1033.21	730.14
Reposición/año	4.46	1.11	0.133
\$/año (Reposición)	612.27	382.67	243.38
\$ total/año	4745.13	1415.89	937.52

3.4. Huella de carbono de la producción de huevo

La huella de carbono es una herramienta que se ha venido utilizando para conocer las emisiones de CO₂, que se generan a partir de un servicio o producto. Pelletier *e. al.* (2013) presenta un análisis de la huella de carbono para la producción de huevo utilizando datos de la actividad industrial del medio oeste en Estados Unidos.

En la Figura 3.3. se pueden observar los datos que obtuvo Pelletier *et al.* (2013) en kg de CO₂ equivalente, haciendo el análisis para 1000 ponedoras, teniendo en cuenta los consumos para: agua y papel, gestión del estiércol, energía, la alimentación y producción de polluelos. Estos datos se recopilaron de la producción del estado de Iowa, Estados Unidos, en el año 2009.

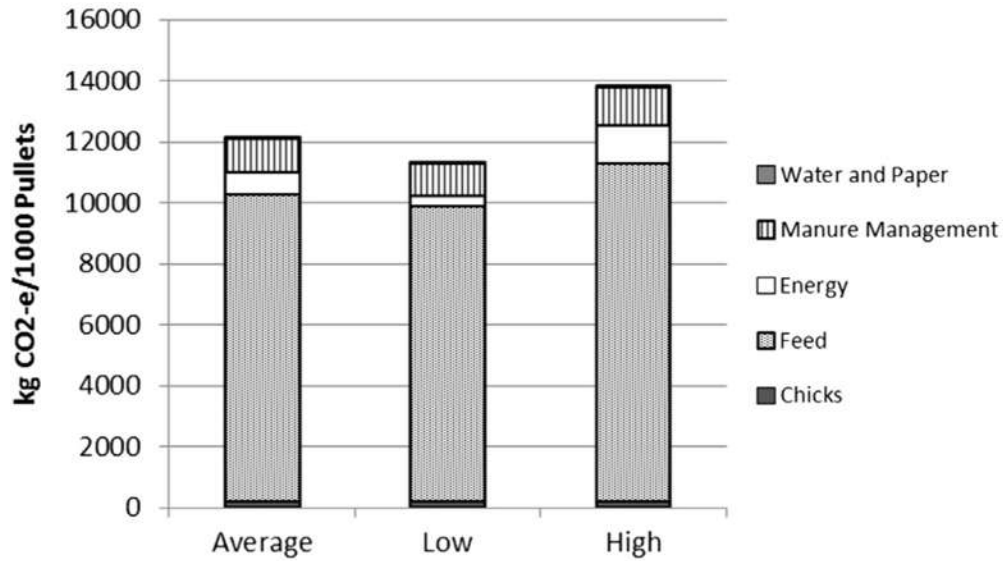


Figura 3.3. Huella de carbono (kg CO₂-eq) por cada 1000 ponedora en instalaciones de Iowa en 2009 (Pelletier *et al.*, 2013).

Mientras que para la producción de huevo, la huella de carbono se refleja en la figura 3.4. para los datos reportados de producción de huevo en el estado de Iowa, Estados Unidos. (Pelletier *et al.*, 2013)

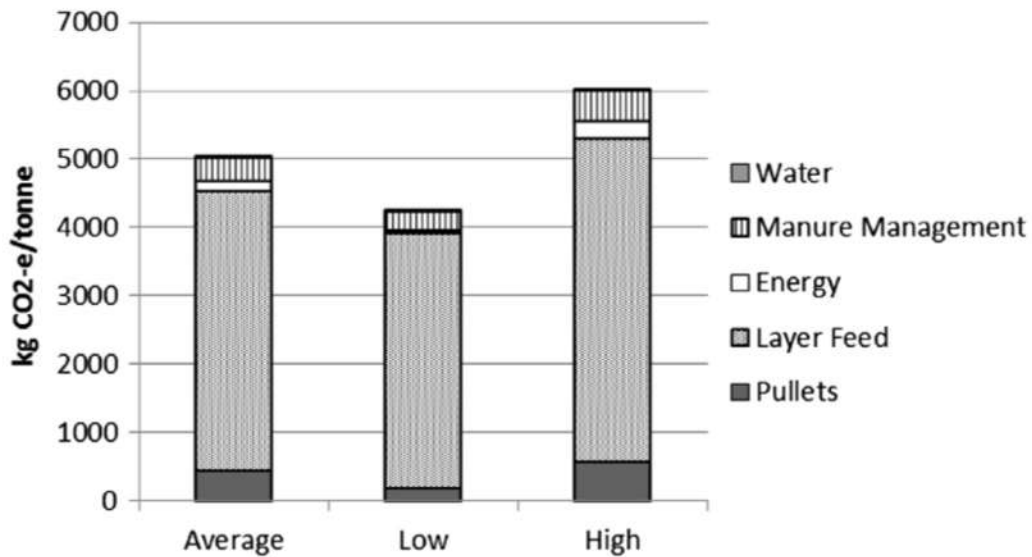


Figura 3.4. Huella de carbono (kg CO₂-eq/ton) para la producción de huevo en instalaciones de Iowa en 2009 (Pelletier *et al.*, 2013).

3.5. Análisis exergético para procesos alimenticios

El análisis exergético para procesos alimenticios, es un término recientemente aplicado ya que se aplicaba a la generación de energía eléctrica; sin embargo el término exergía es aplicable a todos los procesos en donde los equipos necesiten de cualquier tipo de energía para producir trabajo.

Dentro del sector agrícola en Arabia Saudita, Dincer *et al.* (2005) reportó que para un periodo de tiempo de los años 1990 al 2001, éste sector presentó una pérdida exergética del 74.19% - 69.20% lo cual indica que del porcentaje reportado, el restante es la energía útil de todo el sector agrícola para los años que se reportan.

Otros procesos alimenticios que han reportado análisis exergético para sus procesos son la producción de yogurt, que además de reportar la exergía acumulada del proceso, reportan el uso de energía y las emisiones derivadas del proceso de producción de yogurt sabor fresa.

En la Tabla 3.3. se muestran los resultados obtenidos por Sorgüven y Özilgen (2012) donde se puede ver la cantidad de energía utilizada (3168.5 MJ/ton), así como la exergía acumulada del proceso (84183.4 MJ/ton), esto indica que el proceso pierde aproximadamente un 64% de la energía que se le esta suministrando.

Tabla 3.3. Consumo de energía, exergía y emisiones de CO₂ para la producción de una tonelada de yogurt sabor fresa (Sorgüven y Özilgen, 2012).

Actividad	Uso de energía/ton de producto (MJ/ton)	Acumulación de exergía/ton de producto (MJ/to)	Emisiones de CO ₂ /ton de producto (kg/ton)
960 kg de yogurt (90% leche, 3% cultivo microbiano, 6% leche en polvo y 1% pectina)	28,270.2	74,655.0	1917.43
40 kg mermelada de fresa	559.1	670.2	40.2
Mezcla de yogurt y mermelada de fresa	1.4	5.8	0.2
Yogurt sabor fresa (96% yogurt 4% mermelada de fresa)	28,830.7	75,331.0	1,957.8
Empaquetado			
HDEP	19.2	516.0	2.7
PP	10.8	511.2	1.5
PS	5.4	551.4	0.8
PLA	324.0	468.0	45.4
Maquinaria contenedora y de mezclado	1,851.4	7,720.3	259.2
Transporte de basura	32.4	30.0	0.4
Almacenamiento	5.4	22.5	0.8
Transporte a tienda	636.2	589.1	8.9
Aire acondicionado	5.4	22.5	0.8
Total (yogurt sabor fresa en contenedores PLA)	31,685.5	84,183.4	2,273.3

Por otro lado, en Nigeria se ha estudiado el proceso para la producción de jugo de naranja, en donde, se llegó a la conclusión de que la pérdida de exergía representaba un 84% del suministro total de energía al proceso de elaboración de jugo de naranja, como se muestra en la Tabla 3.4.

Tabla 3.4. Balance de exergía en una planta de procesamiento de jugo de naranja (Waheed *et al.* 2008).

Operación unitario	Cambio de exergía del jugo (MJ)	Trabajo útil (MJ)	Cambio de utilidades de exergía (MJ)	Producción de entropía (MJ)	Ineficiencia (%)
Clasificación	-	5.40	-	5.40	0.03
Limpieza	-	67.13	-	67.13	0.32
Enrejado	-	90.20	-	90.20	0.44
Trituradora	-	309.26	-	309.26	1.50
Clasificador de tornillo		90.20	-	90.20	0.44
Centrífuga/tanque de retención	7.22	128.86	-	121.64	0.59
Pasteurización	236.41	259.20	18,608.02	18,630.81	90.09
Empaquetado	-234.81	1,130.11	-	1,364.92	6.60
Total	8.82	2,080.36	18,608.02	20,679.56	100

Existen estudios de análisis exergético para diferentes procesos; sin embargo, el sector alimenticio en México carece de este tipo de estudios y que son útiles para la eficiencia energética de los procesos productivos.

4

JUSTIFICACIÓN

La producción de huevo contribuye a la emisión de GEI. Sin embargo, en el caso de las granjas en México, hay una falta de estudios que caractericen y cuantifiquen científicamente las emisiones de GEI directamente asociadas al consumo de electricidad, gas y agua, y vinculadas al proceso de producción de huevo para plato. Esta falta de información especializada evita el desarrollo de políticas agroindustriales, económicas y ambientales adecuadas y sanas así como estrategias de eficiencia energética para la reducción de GEI en éste subsector.

La falta de información actualizada y fiable abre varias interrogantes. Entre ellas está si la contribución de las emisiones de GEI ha estado siendo subestimada en el inventario nacional de emisiones. Dado que la avicultura mexicana es un sector de alto impacto productivo en el país, esta desviación en el conteo de contribuciones de GEI puede, en lo general y largo plazo, complicar el alcanzar las metas de reducción de GEI comprometidas por la nación. En el mismo sentido pero desde una perspectiva diferente y a corto plazo, es importante establecer una estrategia para mejorar la eficiencia energética para las granjas avícolas. El aumento de la eficiencia se estima reduzca las emisiones de GEI.

Es entonces necesario cuantificar adecuadamente la contribución de GEI de la producción avícola pero la falta de información detallada sobre el uso de energía y recursos en cada constituyente del proceso de producción hace hasta el momento que estas sean deficientes.

Este trabajo se enfoca principalmente al conocimiento del uso de recursos energéticos (electricidad, gas y agua) en granjas productoras de huevo, que será de gran importancia para la cuantificación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se derivan de éste uso.

5

HIPÓTESIS

La contribución al inventario nacional de emisiones de GEI por parte de los procesos de producción de huevo para plato en el país está subestimada. Esta subestimación se asocia a deficiencias en el conocimiento de la relación huevo producido/energía utilizada. Debe cuantificarse en detalle el uso de energía (en la forma de electricidad, agua, gas) para evidencia que el consumo real tiene un rol y participación más importante en la misión de GEI que lo hasta ahora considerado y asimismo que esta revaloración de GEI es mayor a lo contemplado por el INEGEI ya que este último únicamente toma en cuenta la fermentación entérica y el manejo de estiércol para el GEI de este sector.

6

OBJETIVOS

6.1. Objetivo general

Determinar el perfil de consumo de energía utilizado para realizar el proceso de producción de huevo para plato en granjas del sector avícola mexicano de clima templado sub húmedo, con ello estimar las emisiones de GEI asociadas medidas en CO₂ equivalente y hacer un estimado del ahorro de energía mediante un análisis de exergía para el perfil de consumo energético.

6.2. Objetivos específicos

- Conocer el consumo de energía que se genera en una granja avícola para la producción de huevo.
- Perfilar los consumos e insumos energéticos de la granja que permitan hacer estimaciones.
- Cuantificar las emisiones registradas en la granja y expresarlas en medidas de CO₂ equivalente.
- Analizar la pérdida de exergía del proceso de producción de huevo para establecer propuestas de ahorro energético.

7

PLAN GENERAL DE TRABAJO

Fase I. *Reconocimiento del área de estudio.*

Actividad 1. Localización de la granja productora de huevo que será objeto de estudio.

Actividad 2. Reconocer el sistema de producción de huevo que lleva a cabo la granja objeto de estudio.

Fase II. *Estudio del uso de la energía para la producción de huevo.*

Actividad 1. Registrar los usos de la energía (eléctrica y gas L.P) en la granja por la maquinaria y/o equipos encontrados, mediante su capacidad.

Actividad 2. Establecer el uso de energía de la granja con base a la frecuencia de uso de los equipos encontrados.

Actividad 3. Analizar la demanda energética para la producción de 1kg de huevo.

Fase III. *Evaluación de la demanda energética encontrada y su emisión de CO₂-eq.*

Actividad 1. Evaluar el impacto del uso de energía registrado en la granja.

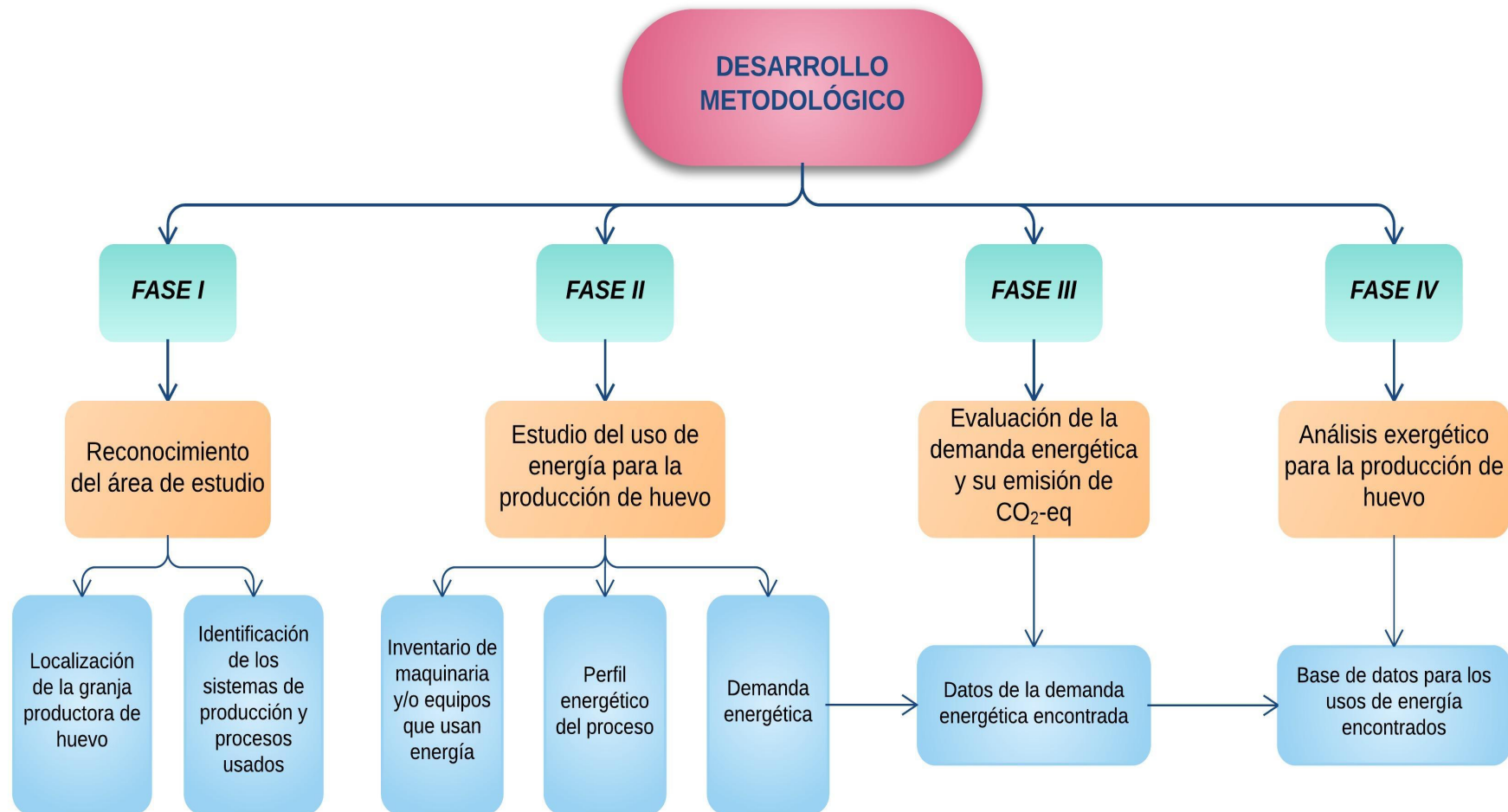
Actividad 2. Estimar las emisiones de CO₂-eq que corresponden al uso de energía encontrado en la granja.

Fase IV. *Análisis exergético para la producción de huevo.*

Actividad 1. Hacer un balance de la exergía en el sistema (casetas), y un análisis comparativo vs casetas de ambiente controlado (teórico).

Actividad 2. Conocer la exergía de los equipos, para puntualizar el ahorro energético.

Actividad 3. Implementar un programa de mejoras en base a los resultados obtenidos para el ahorro de energía en la granja.



8

METODOLOGÍA

La metodología se siguió de acuerdo a las cuatro fases planteadas en el plan general de trabajo:

8.1. Reconocimiento del área de estudio.

Se visitó la granja productora de huevo “Laguna Colorada”, ubicada en el municipio de Tepatlán de Morelos (Figura 8.1.), que se encuentra situado en la región Altos Sur del estado de Jalisco, presentado un clima templado sub-húmedo en la mayor parte del año. La visita a la granja se hizo en el verano del año 2015, teniendo unas condiciones ambientales de temperatura y presión de 23.1°C y 1.023 bar respectivamente.

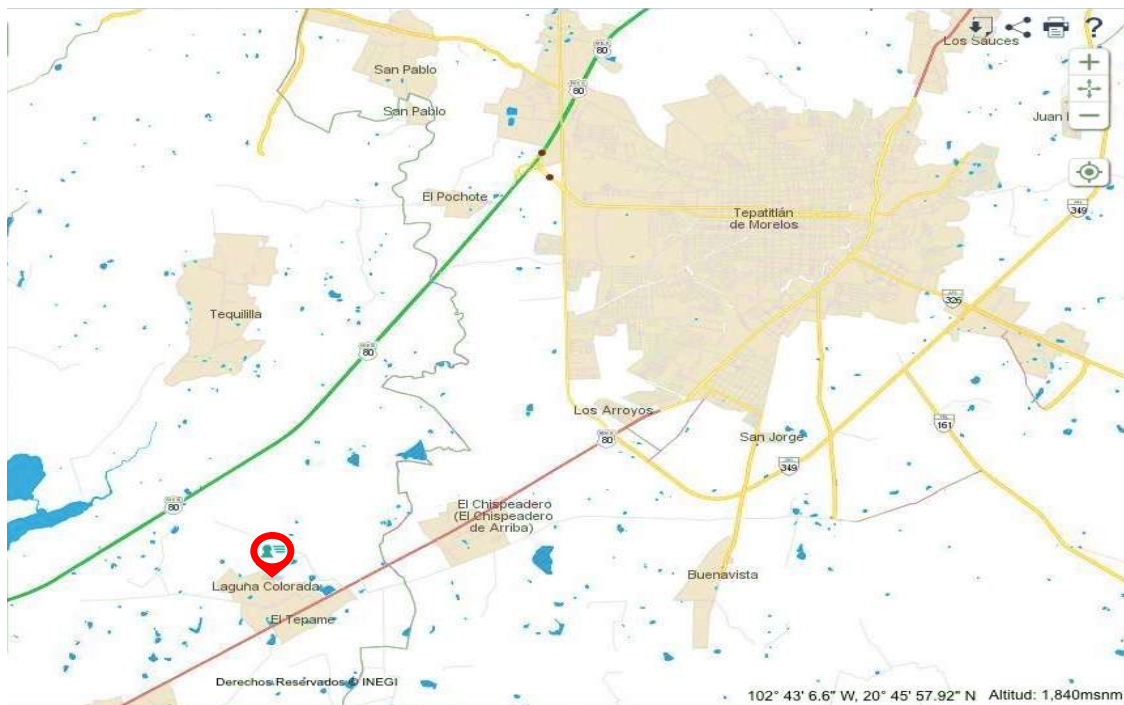


Figura 8.1. Ubicación del área de estudio.

En la granja, se hizo el reconocimiento de las condiciones del proceso, y se encontró que la producción de huevo tiene 3 etapas diferentes, dependiendo de la edad del ave:

1. Cría de pollitas (Edad del ave: Semana 1 a semana 6)
2. Desarrollo de pollitas (Edad del ave: Semana 6 a semana 16)
3. Postura (Edad del ave: Semana 16 a semana 70)

Cada una de éstas etapas se llevan a cabo en casetas de diferentes características:

- Caseta para la Cría de pollitas (Figura 8.2.): En la granja “Laguna Colorada”, ésta caseta es de tipo semi-tecnificada, con equipamiento de maquinaria para proveer de confort a las aves (extracción, calefacción iluminación, etc.)



Figura 8.2. Caseta para la cría de pollitas en la granja “Laguna colorada”.

- Caseta para el desarrollo de las pollitas y postura (Figura 8.3.): Este tipo de casetas en la granja de estudio, se rigen por un diseño mas convencional, donde la mayor parte de los trabajos que en éstas casetas se realizan son manuales.



Figura 8.3. Caseta de postura en la granja “Laguna Colorada”

En cada una de las casetas visitadas, se levantó un inventario de la maquinaria y equipos que requieren de energía en el proceso, así como los insumos que necesitan las aves; la información recibida y observada se registró en las encuestas (Anexo I) y que sirvió para el análisis energético y exergético. Con los datos recabados se estableció una base de cálculos para el estudio de 1kg de huevo.

Se delimitó el área de estudio para las condiciones del proceso de producción de huevo en la granja “Laguna colorada”; con base al proceso general para la producción de huevo que plantea Vamilson, *et. al.* (2008) como lo muestra la Figura 8.4.

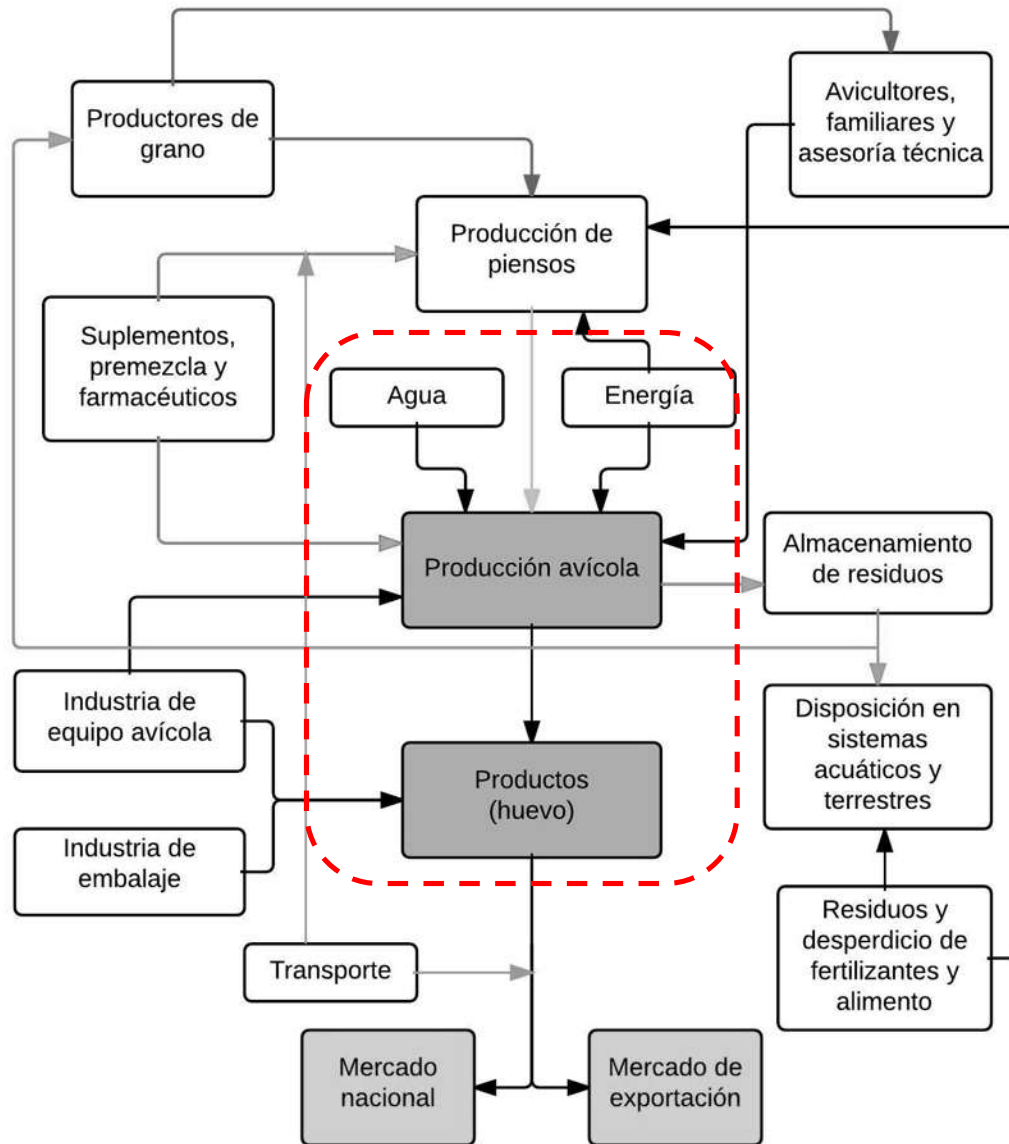


Figura 8.4. Delimitación para éste estudio dentro del proceso general para la producción de huevo.

Se hizo un diagrama de flujo del proceso de producción de huevo para la granja estudiada (Figura 8.5.) donde se muestran las entradas y salidas para producir huevo en la granja “Laguna Colorada”.

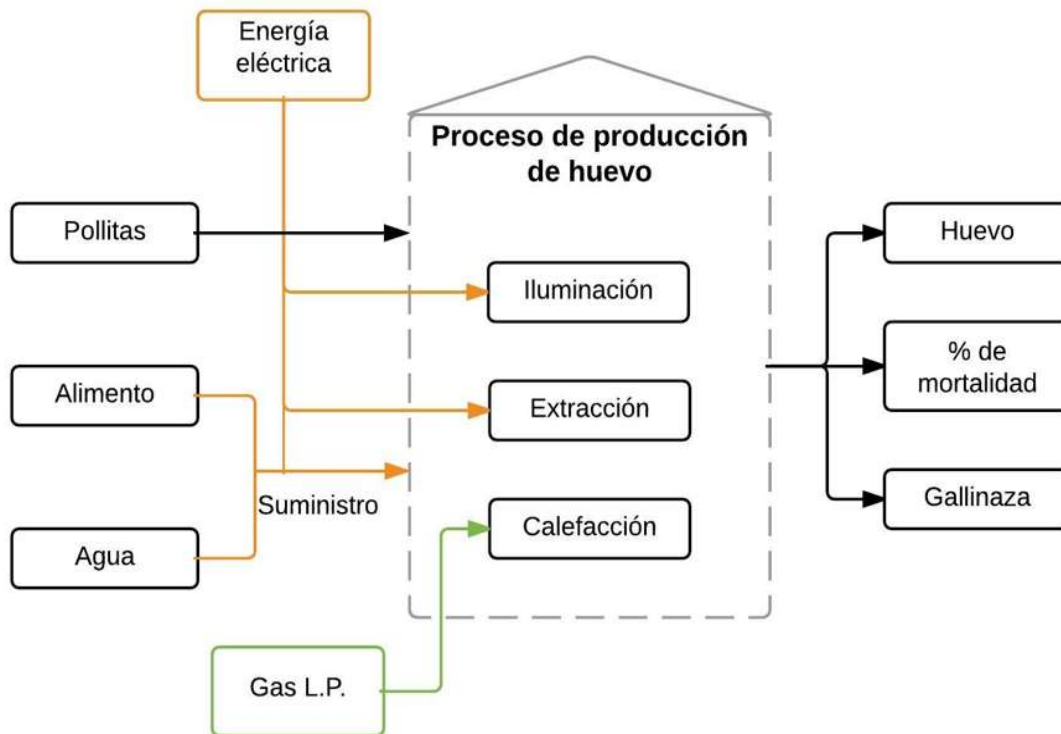


Figura 8.5. Diagrama de flujo del proceso para la producción de huevo en la granja.

8.2. Estudio del uso de la energía para la producción de huevo.

En la granja, se identificó la demanda de energía eléctrica y gas L.P. para las siguientes actividades dentro del proceso de producción de huevo:

- Suministro de alimento para la parvada
- Suministro de agua para la parvada
- Iluminación de la caseta
- Calefacción del ambiente dentro de la caseta
- Extracción de aire caliente en la caseta

Posteriormente se levantó un inventario de la demanda de energía del equipo en watts o unidades equivalentes, así como también la frecuencia de uso del equipo o maquinaria para realizar cada actividad, reportando en las hojas correspondiente para cada etapa del proceso (cría, desarrollo o postura). La Figura 8.6. muestra un esquema de cómo se encontraron distribuidos los equipos en la caseta de cría de la granja “Laguna Colorada”, una conformación similar presentaron las casetas de desarrollo y postura

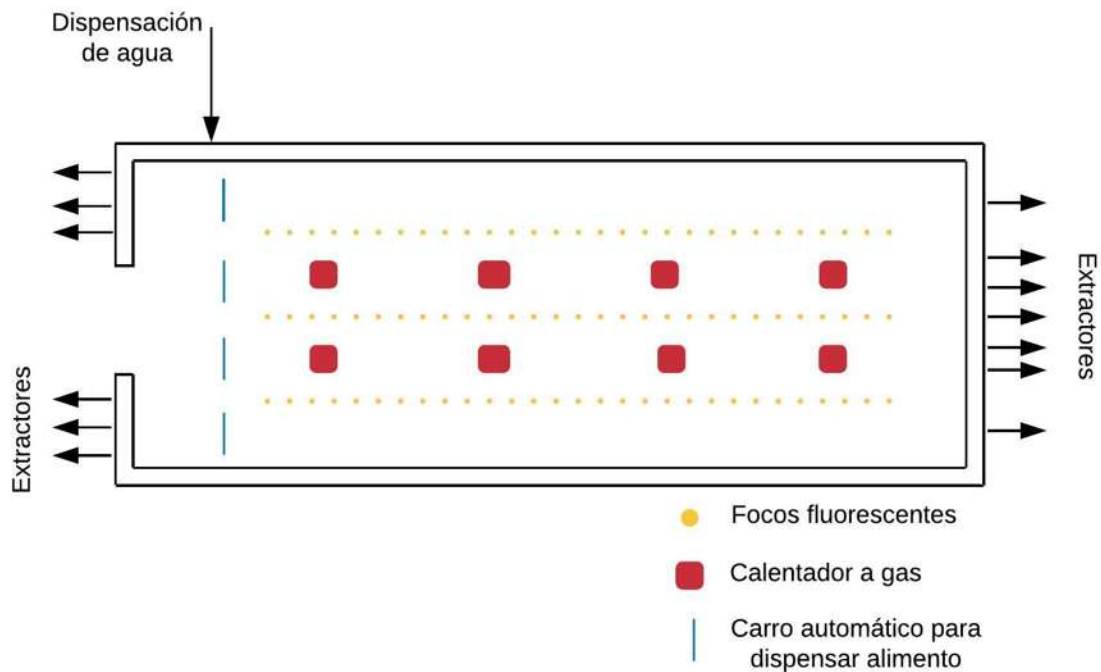


Figura 8.6. Esquema de distribución de los equipos dispuestos en la caseta de cría de la granja “Laguna Colorada”.

Con los datos recopilados de los usos de la energía dentro de las casetas de producción de huevo, se generó una base de datos para homogenizar los datos y hacer las estimaciones para el uso de la energía en la producción de 1kg de huevo.

8.3. Evaluación de la demanda energética encontrada y su emisión de CO₂eq.

Con el requerimiento de energía para la producción de huevo, se calculó la energía específica y la productividad energética por cada kg de huevo producido mediante las ecuaciones 1 y 2 (Moreno, *et al.*, 2012), que definen la relación que tiene la demanda energética que arroja la producción de huevo y la productividad propia del proceso.

$$\text{Energía específica} = \frac{\text{Uso de energía}}{\text{Producción de huevo (kg)}} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$\text{Productividad energética} = \frac{\text{Producción de huevo}}{\text{Uso de energía}} \quad \text{Ec. (2)}$$

Se usaron los factores de emisión para el consumo de energéticos propuestos por el IPCC (Anexo II) y el Sistema Eléctrico Nacional (2013), aplicados a la metodología propuesta por la CONUEE (2009) para la estimación de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por el uso de energía mediante la fórmula:

$$E_{g,f}^c = C_f * FE_{g,f} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

$E_{g,f}^c$ = Emisión del gas de efecto invernadero “g” por la combustión del energético “f” (kg de GEI).

C_f = Consumo del energético “f” (J).

$FE_{g,f}$ = Factor de emisión estándar de gas “g” en la combustión del energético “f” (kg/J).

8.4. Análisis exerético para la producción de huevo.

Se hizo el análisis de la exergía para cada uno de los equipos utilizados en el proceso de producción de huevo, dividiéndose en análisis exerético ya sea químico o físico para los diferentes equipos encontrados (Tabla 8.1.).

Tabla 8.1. Análisis para los equipos de acuerdo al tipo de energía que se les suministra.

Equipo	Tipo de análisis	
Focos fluorescentes	—	Exergía física
Carro automático para dispensar alimento	—	Exergía física
Motor dispensador de alimento	—	Exergía física
Bomba para dispensar agua	—	Exergía física
Extractor	—	Exergía física
Calentador	Exergía química	—

El tipo de análisis se considera de acuerdo al equipo que se analizó, en los cinco primeros de la tabla 8.1. se realizó un análisis de exergía física debido a que el uso de energía de éstos equipos es eléctrica, mientras que el calentador es a Gas L.P., lo que indica que el análisis de la exergía para éste equipo deberá ser de tipo químico, debido al combustible utilizado.

Los sistemas a analizar de acuerdo a los equipos de la granja son:

- Sistema de iluminación
- Sistema de alimentación (carro automático y motor para dispensación)
- Sistema de suministro de agua
- Sistema de extracción de aire
- Sistema de calefacción

8.4.1. Cálculo de exergía física

Para hacer el cálculo de la exergía física (ANEXO IV), se tuvieron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La presión del sistema analizado y el ambiente de referencia son constantes (1.023 bar).
- La temperatura de referencia (T_0) es igual para las 3 casetas de la granja (23.1°C).
- El factor de potencia (FP) de la energía eléctrica es igual a 0.9 (CFE, 2015).

Los flujos energéticos para el cálculo de la exergía física, se pueden observar en la Figura 8.7., donde se ejemplificó para los focos fluorescentes, y se estableció el mismo diagrama para cada uno de los equipos que utilizan energía eléctrica para su funcionamiento. Cada flujo de entrada y salida mostrado en el diagrama, se explica en la Tabla 8.2.

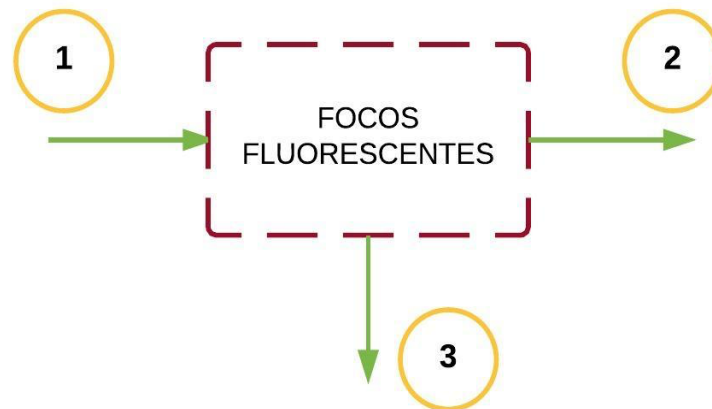


Figura 8.7. Diagrama de flujos energéticos para el sistema de iluminación.

Tabla 8.2. Registro de flujos de entrada y salida encontrados para la energía eléctrica.

	Flujo	Energía (E)	Exergía (b)
1	Energía eléctrica de entrada	$E_1 = P_1$	$b_1 = P_1$
2	Energía de salida	$E_2 = S_1$	$b_2 = P_2$
3	Energía aprovechada	$E_3 = Q_3$	$b_3 = f(Q_3)$

De la Tabla 8.2. se tiene que:

E = Energía eléctrica suministrada

P = Potencia activa del equipo analizado

S = Potencia aparente del equipo analizado

b = Exergía

Q = Energía de salida o aprovechada

Una vez delimitados los sistema y los flujos de entrada y salida, se prosiguió a hacer el cálculo de las exergías para cada uno de los flujos encontrados.

Cálculo de la exergía para el flujo 1

Para el cálculo de la exergía del flujo 1, se obtuvo la potencia activa del equipo a analizar (P_1), mediante:

$$P_1 = S_1 * FP \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

S_1 = Potencia aparente suministrada.

FP = Factor de potencia de la energía eléctrica.

Y que para obtener la potencia aparente (S_1):

$$S_1 = V * I \quad \text{Ec. (5)}$$

Donde:

V = Voltaje de la corriente eléctrica (Volts)

I = Intensidad de la corriente eléctrica (Amperes)

Luego de obtener la potencia activa (P_1) y la potencia aparente (S_1), se obtuvo la exergía del flujo 1 mediante la ecuación:

$$b_1 = \int_{T_0}^{T_f} P_1 dt$$

$$b_1 = V * I * FP \int_{T_0}^{T_f} dt$$

Ec. (6)

Resolviendo la Ec. 6, se obtuvo la exergía del flujo 1.

Cálculo de la exergía para el flujo 2.

Para el cálculo la exergía del flujo 2, fue necesario conocer el rendimiento neto (Fb) del equipo que se está analizando, el cual se obtuvo de la relación entre la potencia aparente y la potencia activa del equipo analizado, teniendo en cuenta las consideraciones de los equipos:

- Para el rendimiento de los focos fluorescentes se utiliza la relación del flujo luminoso del foco (lm) entre la potencia activa del foco (W).
- Para el caso de motores y bombas que utilizan energía eléctrica, la eficiencia está dada por las especificaciones del equipo encontrado.

$$P_2 = P_1 * Fb$$

Ec. (7)

Tomando en cuenta las consideraciones hechas, la exergía del flujo 2 se obtiene mediante:

$$b_2 = \int_{T_0}^{T_f} P_2 dt$$

$$b_2 = V * I * Fb \int_{T_0}^{T_f} dt$$

Ec. (8)

Haciendo esto, se obtiene la exergía del flujo 2, para los sistemas (equipos) de exergía física.

Cálculo de la exergía para el flujo 3.

La exergía del flujo 3 se obtuvo mediante un balance de la entrada menos la salida del sistema analizado, obteniendo la exergía total:

$$b_3 = b_1 - b_2 \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

b_3 = Exergía del equipo.

b_1 = Exergía de entrada (flujo 1).

b_2 = Exergía de salida (flujo 2).

Con la exergía de entrada (flujo 1) y de salida (flujo 2) y obtenido por diferencia la exergía del equipo (flujo 3), como lo muestra la Figura 8.8., se calculó la exergía total de la caseta donde se encuentra el sistema estudiado, por ejemplo en el caso del sistema de iluminación, la exergía encontrada para un foco, se multiplica por el número de focos fluorescentes con los que esta equipada la caseta y así se tiene el total exergético del sistema de iluminación para una caseta.

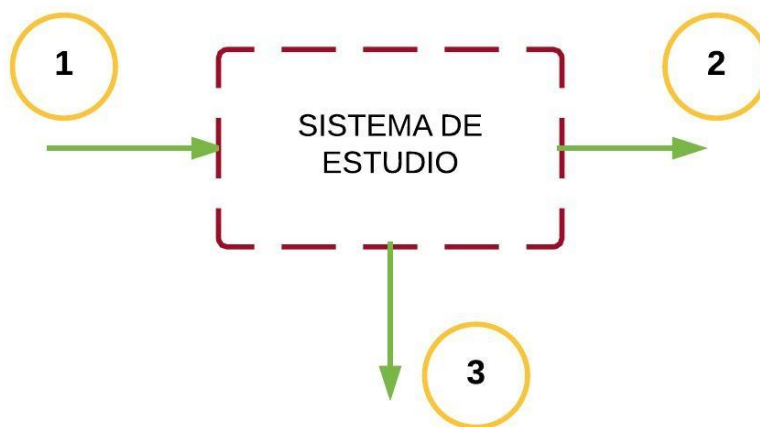


Figura 8.8. Diagrama de flujos de entrada y salida de exergía en un sistema de estudio.

Cálculo del rendimiento exergético

La eficiencia exergética permitió conocer la cantidad de energía que se puede recuperar y los puntos donde se encuentra la mayor pérdida de exergía y que a su vez ayuda a establecer estrategias de ahorro energético para la granja.

Mediante la ecuación 10 se calculó el rendimiento exergético para cada uno de los equipos que se analizaron.

$$\eta_b = \frac{b_U}{b} * 100 \quad \text{Ec. (10)}$$

Donde:

b_U = exergía útil encontrada (kW)

b = exergía entregada al sistema (kW)

8.4.2. Cálculo de la exergía química

Para el cálculo de la exergía química (ANEXO VI) del calentador se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones:

- La Presión del ambiente de referencia y del sistema son constantes.
- El flujo másico de entrada es igual al flujo másico de salida ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$)
- El aire se tomó como un gas ideal.
- Se calcularon las entalpías por interpolación de valores establecidos en tablas de propiedades de gases ideales para el aire, tomados a las temperaturas de entrada y salida del sistema (ANEXO V).

Una vez con las consideraciones a tomar en el sistema, se establecieron los flujos energéticos para el equipo analizado, teniendo en cuenta entradas y salidas de energía que son útiles para el posterior cálculo exergético del equipo; éstos flujos se ejemplifican en la Figura 8.9. y se describen en la Tabla 8.3.

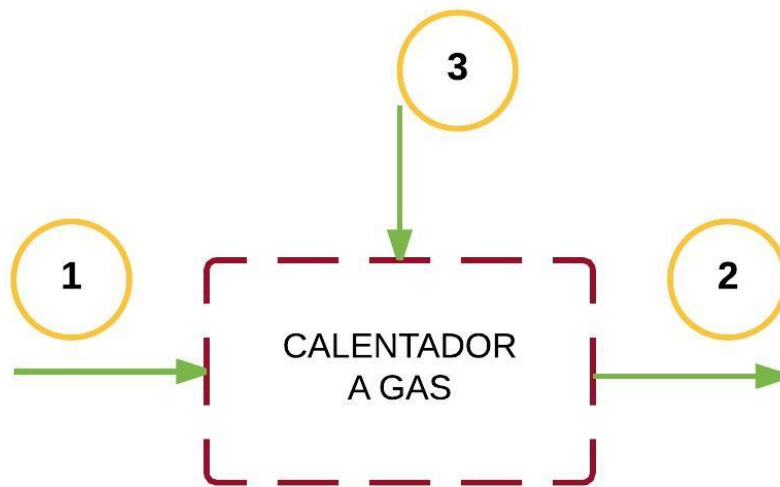


Figura 8.9. Diagrama de flujos energéticos para un calentador a gas.

Tabla 8.3. Flujos energéticos encontrados para el calentador a gas.

Flujo	Descripción
1	Entrada del flujo de aire a temperatura ambiente (T_0)
2	Salida del flujo de aire a temperatura de salida (T_f)
3	Suministro de calor al equipo

Cálculo del flujo de calor

Con los flujos energéticos definidos, lo primero que se debe conocer es el flujo de calor que entra en el equipo que se analizó, esto se hizo mediante un balance de energía para el sistema, de la manera que sigue:

$$\dot{m}_1 h_1 + Q = \dot{m}_2 h_2 \quad \text{Ec. (11)}$$

De la Ec. 11:

$\dot{m}_{1,2}$ = flujo másico de entrada y salida respectivamente (kg·mol/h).

$h_{1,2}$ = entalpías de entrada y salida respectivamente (cal/mol).

Q = Flujo de calor (cal/h).

Y el flujo másico queda definido de la forma:

$$\dot{m} = \rho * V * A \quad \text{Ec. (12)}$$

Donde:

ρ = es la densidad del fluido (kg/m³).

V = Velocidad del fluido (m/h).

A = Área del paso del fluido (m²).

Una vez definidas las variables y teniendo en cuenta la consideración del flujo másico de entrada igual al de salida ($\dot{m}_1 = \dot{m}_2$), se despeja de la Ec. 11 el flujo de calor (Q), resultando la Ec. 13:

$$Q = \dot{m} * (h_2 - h_1) \quad \text{Ec. (13)}$$

La Ec. 13 permitió conocer el flujo de calor que existe en un calentador, instalado en la caseta de cría; éste flujo de calor es el que se tomó en cuenta para hacer el análisis exergético de los calentadores.

Cálculo de la exergía del calentador

Para hacer el cálculo de la exergía del calentador, se tomaron en cuenta las entradas y salidas de exergía del sistema, que se muestran en la Figura 8.10.

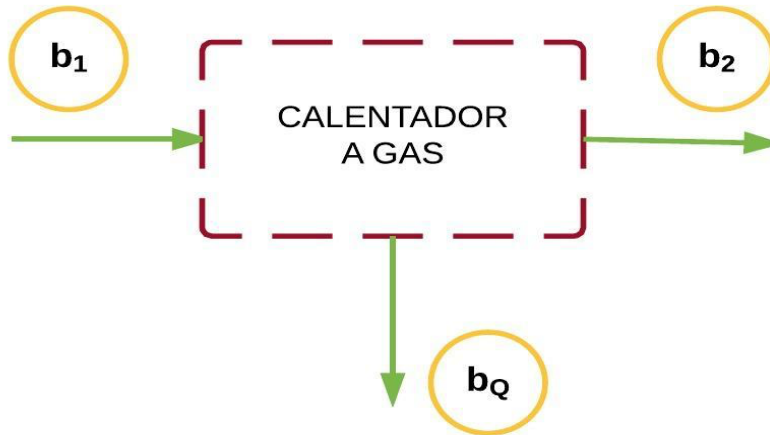


Figura 8.10. Balance de exergía del calentador.

Los flujos de exergía mostrados en la Figura 8.8., se describen en la Tabla 8.4.

Tabla 8.4. Flujos exergéticos para el calentador.

Flujo	Descripción
1 b_1	Exergía de entrada
2 b_2	Exergía de salida
3 b_Q	Exergía del flujo de calor

Para llevar a cabo el balance exergético, se tuvo en cuenta la consideración:

- $b_1 = 0$, puesto que el flujo másico de entrada (aire) se encuentra en las mismas condiciones del ambiente de referencia.

Llevando a cabo el balance de exergía:

$$\begin{aligned}b_2 - b_1 &= b_Q \\b_2 &= b_Q\end{aligned}\quad \text{Ec. (14)}$$

Mientras que b_Q se obtiene mediante:

$$b_Q = Q * \left(1 - \frac{T_0}{T}\right) \quad \text{Ec. (15)}$$

Con la Ec. 15, se obtuvo la exergía del flujo de calor de un calentador, que multiplicado por el numero de calentadores presentes en la caseta, se tiene el flujo exergético total presente en la caseta de cría.

Cálculo del rendimiento exergético

Una vez encontrado el flujo de calor y la exergía del flujo de calor, se calculó el rendimiento exergético para el calentador mediante la Ec. 16.

$$\eta_b = \frac{b_Q}{Q} * 100 \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde:

b_Q = Exergía encontrada para el flujo de calor

Q = Flujo de calor

Adicionalmente se hizo el mismo proceso para el análisis exergético de una caseta tecnificada, únicamente para la etapa de postura de las aves; haciendo la comparativa de una caseta de ambiente natural no tecnificada (como es el caso de estudio de este trabajo) contra la caseta de ambiente controlado.

9

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo del estudio fue conocer las emisiones de GEI medidas en CO₂-eq que se derivan del perfil energético del proceso de producción de huevo, y mediante un análisis de exergía conocer el porcentaje de ahorro energético que pudiera existir en el proceso.

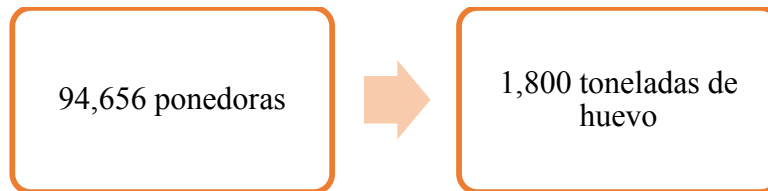
9.1. Perfil energético para el proceso de producción de huevo

Los datos recopilados de las encuestas realizadas en la granja “Laguna Colorada” se utilizaron para hacer el cálculo de la demanda energética (ANEXO III) en cada etapa del proceso de producción de huevo; teniendo los resultados: A) Por cada etapa, donde se alojan las aves respecto a su edad, B) Por el proceso de producción de huevo de la granja, C) Por cada 1,000 aves al día que están en el proceso y, D) Por cada kg de huevo que produce la granja (Tabla 9.1.).

Tabla 9.1. Unidades para el reporte de resultados.

Tipo de resultado	Descripción	Unidad
Por etapa	Resultados para cada etapa del proceso (cría, desarrollo y postura).	$\left(\frac{kWh}{etapa\ fisiológica}\right)$
Por cada 1,000 aves al día	Resultados del perfil energético para 1,000 aves al día en el proceso.	$\left(\frac{Wh}{1,000\ aves \cdot día}\right)$
Por kg de huevo producido	Resultados del requerimiento energético para producir 1 kg de huevo en cada etapa del proceso.	$\left(\frac{Wh}{kg\ de\ huevo}\right)$
Por proceso general	Resultados del consumo energético total de la granja incluyendo las 3 etapas del proceso y las 5 casetas involucradas.	$\left(\frac{kWh}{proceso}\right)$

El proceso de producción de huevo de la granja “Laguna Colorada” tiene la capacidad de alojar hasta 96,000 aves, sin embargo presenta una tasa de mortalidad del 1.4% en cada parvada productiva aproximadamente; conociendo esto para el ciclo productivo analizado, se tiene que:



Una vez diferenciados los tipos de resultados que se obtienen del perfil energético, se analizan cada una de las etapas del proceso, donde se muestran los consumos de energía reportados y los resultados obtenidos para la clasificación.

9.1.1. Etapa de cría de pollitas

La granja “Laguna Colorada” cuenta con una sola caseta de cría de tipo semi-tecnificada, es decir que cuenta con maquinaria especializada para procesos avícolas y controles que evitan realizar algunos trabajos manuales. Esta caseta aloja a 96,000 pollitas desde 1 día de edad y el periodo se prolonga 6 semanas; aquí comienza el ciclo de producción de huevo dentro de la granja.

En la Figura 9.1. se muestra el diagrama de la caseta de cría y sus requerimientos totales de energía eléctrica y gas L.P. identificados para esta etapa del proceso de producción de huevo para plato durante el periodo de cría.

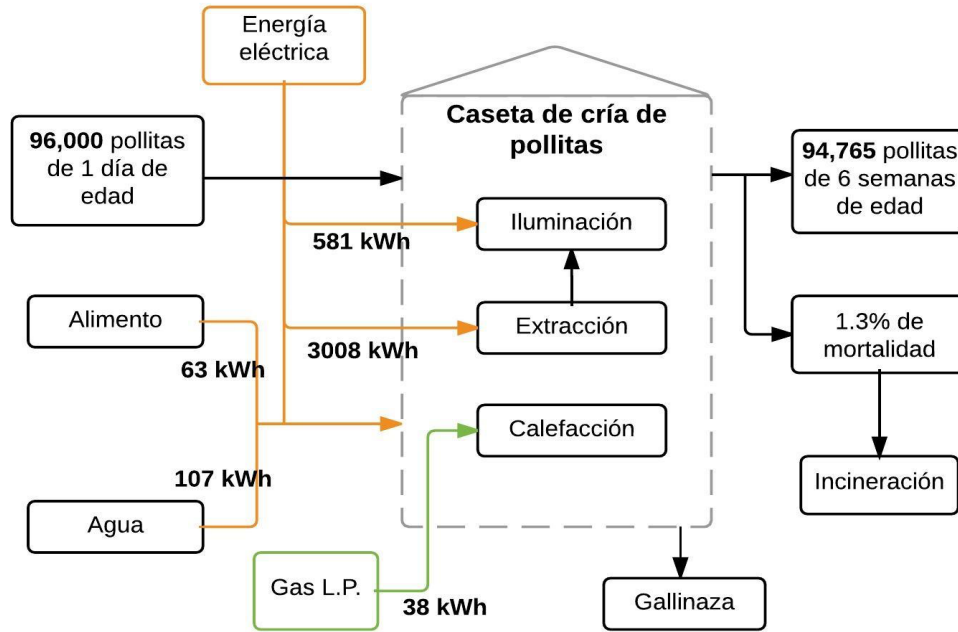


Figura 9.1. Diagrama de la caseta de cría y su requerimiento energético total.

Los equipos identificados en la etapa de cría se muestran en la Figura 9.2. Esta figura presenta el requerimiento total de energía para la etapa, y los porcentajes demandados por cada equipo durante el periodo de 6 semanas en esta etapa.

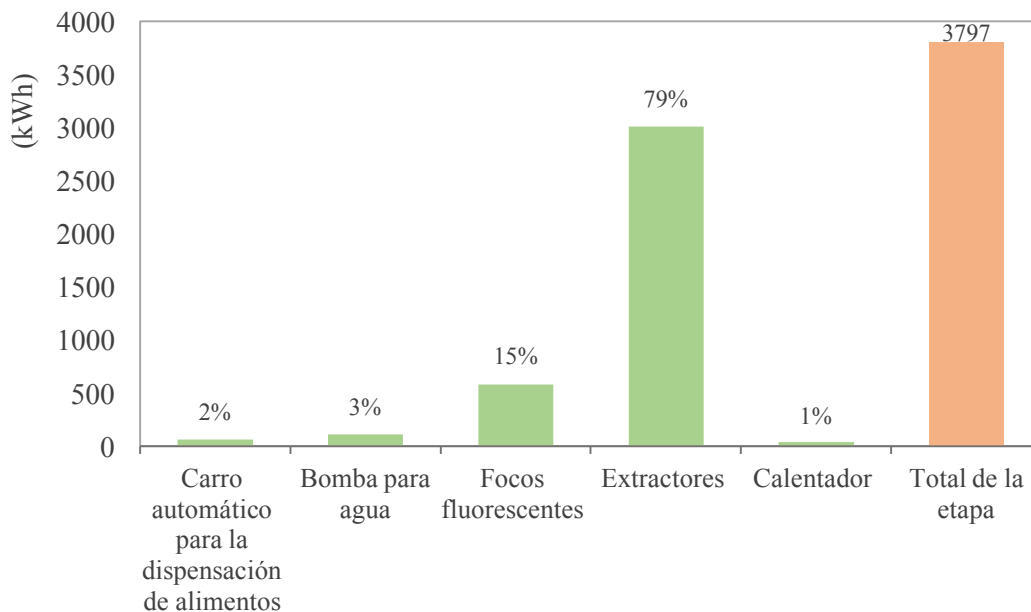


Figura 9.2. Demanda energética en la etapa de cría.

El equipo con mayor demanda de energía eléctrica en la etapa de cría fue el extractor de aire (3,008 kWh/etapa), este equipo requiere el 20.4% del total de energía demanda para el proceso; el calentador resultó el equipo de menor uso energético (38 kWh/etapa), demanda el 0.3% de energía en el proceso; esto debido al corto periodo de uso del equipo (3 semanas/proceso).

La Tabla 9.2. muestra los resultados que se obtuvieron del perfil energético para la etapa de cría de las pollitas.

Tabla 9.2. Resultados obtenidos para la etapa de cría de las pollitas.

Tipo de resultado	Resultado	Unidad
Por etapa	3,797	$\left(\frac{kWh}{etapa\ fisiológica}\right)$
1,000 aves al día alojadas en la etapa	75.2	$\left(\frac{Wh}{1,000\ aves \cdot día}\right)$
Por kg de huevo producido	2.1	$\left(\frac{Wh}{kg\ de\ huevo}\right)$
Total del proceso *	14,681	$\left(\frac{kWh}{proceso}\right)$
Porcentaje de la etapa	25.8	%

* (76 semanas).

El requerimiento energético del proceso en esta etapa, representa 1/4 del consumo total de energía respecto al proceso de 76 semanas; Zakomura, *et al.* (2003), determinó el requerimiento energético metabolizable de las aves de postura (150 kcal EM/huevo) sin embargo, no se especifica el requerimiento en la etapa de cría y no se estima la demanda de recursos energéticos fósiles como lo presenta este estudio.

9.1.2. Etapa de desarrollo de pollitas

A partir de la semana 7 de edad, las pollitas se cambian a las casetas de desarrollo. Las casetas de desarrollo en esta granja se caracterizan por tener una infraestructura tradicional de cortinas, techada de lámina y con labores realizadas manualmente; una caseta tiene la capacidad de alojar 32,000 pollitas en desarrollo, por lo que la granja necesita 3 casetas de este tipo para recibir la parvada saliente de pollitas en cría.

El periodo de desarrollo de las aves tiene un lapso de 10 semanas (hasta las 16 semanas de edad), hasta alcanzar su madurez reproductiva. La Figura 9.3. muestra los requerimientos de energía totales para las 10 semanas del proceso, así como las entradas y salidas en una caseta de desarrollo de la granja “Laguna Colorada”.

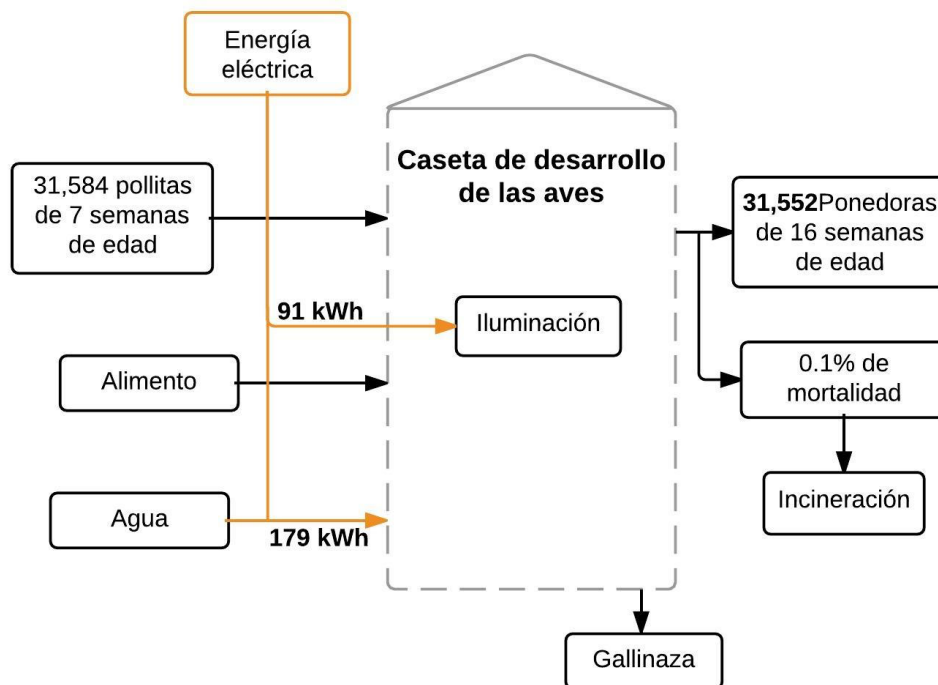


Figura 9.3. Diagrama de la caseta de desarrollo y su requerimiento energético total.

Los equipos identificados que demandan energía eléctrica en la etapa de desarrollo se muestran en la Figura 9.4, donde se observa la participación en porcentaje de ambos equipos y el total de demanda energética para la etapa.

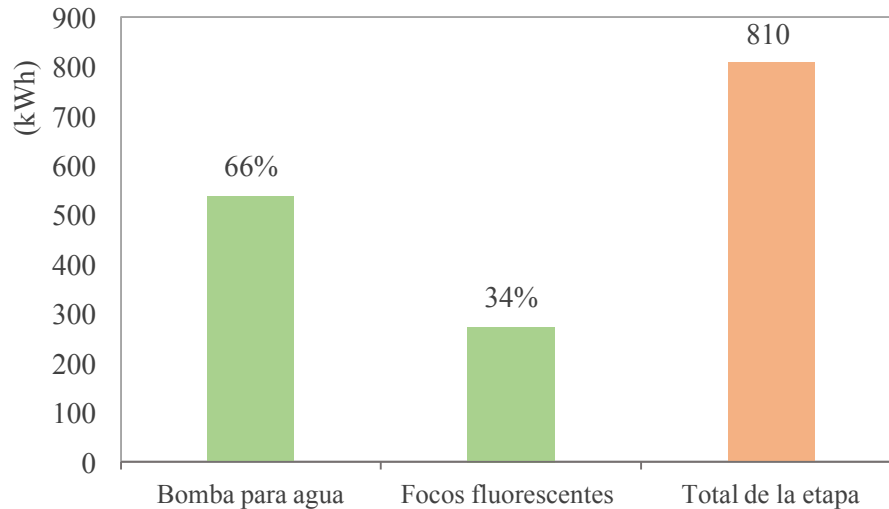


Figura 9.4. Demanda energética para la etapa de desarrollo.

En esta etapa el mayor requerimiento de energía para el proceso lo presenta el sistema que bombea el agua para las aves (3.6%), mientras que el sistema de iluminación (focos fluorescentes) demandan un 1.8% del total de energía requerida en el proceso.

Los resultados obtenidos del perfil energético para la etapa de desarrollo de la granja, se muestran en la Tabla 9.3., identificados para la etapa, el proceso, por cada 1,000 aves y para 1 kg de huevo producido respectivamente.

Tabla 9.3. Resultados obtenidos para la etapa de desarrollo de las pollitas.

Tipo de resultado	Resultado	Unidad
Por etapa	810	$\left(\frac{kWh}{etapa\ fisiológica}\right)$
Por cada 1,000 aves al día	16.1	$\left(\frac{Wh}{1,000\ aves \cdot día}\right)$
Por kg de huevo producido	0.45	$\left(\frac{Wh}{kg\ de\ huevo}\right)$
Total del proceso *	14,681	$\left(\frac{kWh}{proceso}\right)$
Porcentaje de la etapa	5.5	%

* (76 semanas).

La etapa de desarrollo resultó la de menor requerimiento energético, demandando el 5.5% del total de energía para el proceso; esto se debe a que los trabajos desarrollados en estas casetas se llevan a cabo en su mayoría manualmente; el desarrollo de pollitas es común en granjas tradicionales de casetas abiertas, granjas de procesos de ambiente controlado omiten ésta etapa de desarrollo, pasando de la etapa de cría a la etapa de postura.

9.1.3. Etapa de postura

Las casetas de postura de la granja “Laguna Colorada” son casetas de ambiente natural, con características tradicionales tanto de construcción como laborales. Reciben gallinas de 17 semanas de edad y su estancia se prolonga hasta la semana número 77 de vida de las aves, teniendo 60 semanas de producción de huevo para plato.

Cada caseta produce 600 ton de huevo; la granja “Laguna Colorada” cuenta con 3 casetas de postura, lo que resulta en una producción total de la granja de 1800 toneladas de huevo por ciclo de aves. La energía eléctrica que requiere una de estas casetas en el periodo de las 60 semanas, se ve reflejado en la Figura 9.5.

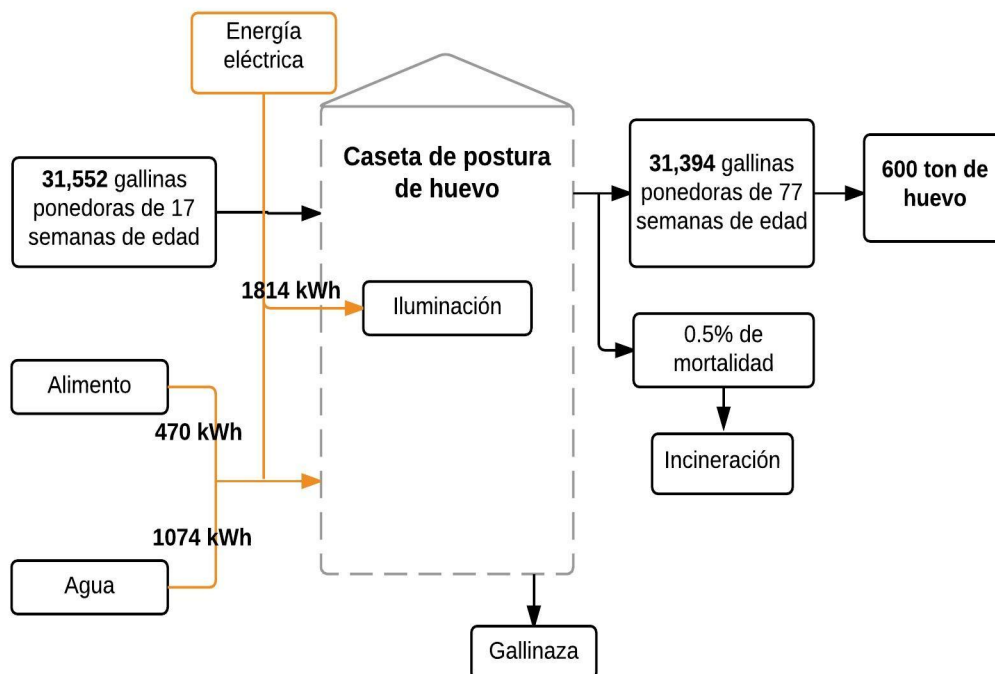


Figura 9.5. Requerimiento total de energía eléctrica en una caseta de postura.

Los equipos que requieren energía eléctrica en la etapa de postura se muestran identificados en la Figura 9.6., donde se observa el porcentaje de demanda energética por equipo y la demanda total de energía en esta etapa.

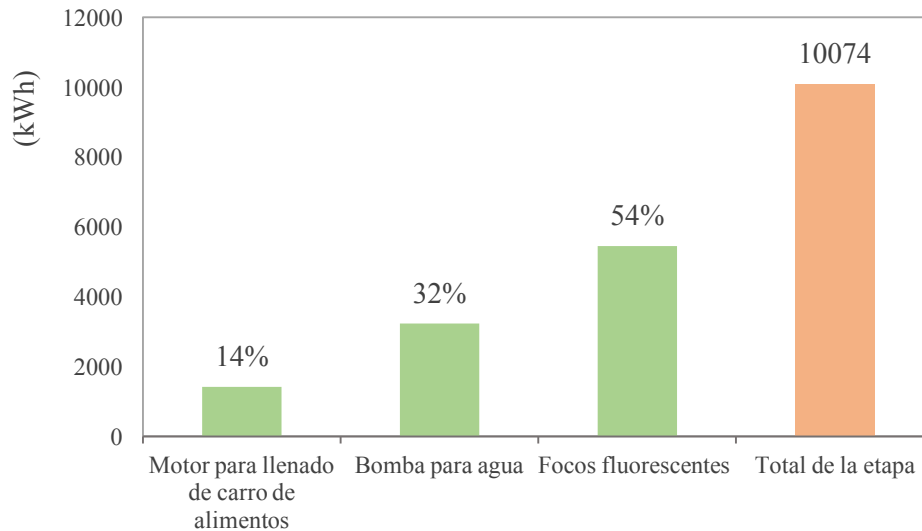


Figura 9.6. Demanda energética para la etapa de postura.

Los focos fluorescentes demandan el mayor requerimiento energético en esta etapa (54%), debido al tiempo de uso del sistema de iluminación (28 h/semana), ya que este factor es imprescindible para la productividad de las gallinas ponedoras. La iluminación en la etapa de postura estimula biológicamente a las aves para su postura y garantiza la producción de huevo. El resultado obtenido para la iluminación en esta granja puede presentar una gran variabilidad entre otros sistemas de iluminación; principalmente debido a la localización geográfica de la granja (latitud), el tipo de casetas productivas, el tipo de luminarias, entre otros factores (Oviedo, 2009).

En la Tabla 9.4. se muestra los resultados del perfil energético para la etapa de postura de la granja, al periodo de 60 semanas de postura.

Tabla 9.4. Resultados obtenidos del perfil energético para la etapa de postura.

Tipo de resultado	Resultado	Unidad
Por etapa	10,074	$\left(\frac{kWh}{etapa\ fisiológica}\right)$
Por cada 1,000 aves al día	201	$\left(\frac{Wh}{1,000\ aves \cdot día}\right)$
Por kg de huevo producido	5.6	$\left(\frac{Wh}{kg\ de\ huevo}\right)$
Total del proceso *	14,681	$\left(\frac{kWh}{proceso}\right)$
Porcentaje de la etapa	68.6	%

* (76 semanas).

La etapa de postura demanda la mayor cantidad de energía para el proceso (68.6% del total de energía suministrada), esto se debe al periodo de tiempo que la aves permanecen en postura (60 semanas).

9.1.4. Demanda energética para la producción de huevo

El proceso de producción de huevo en la granja Laguna Colorada demanda en total 14,681 kWh para una producción de 1800 ton de huevo en un ciclo productivo de 76 semanas; el resumen del consumo energético del proceso se muestra en la Tabla 9.5.

Tabla 9.5. Demanda energética para el proceso de producción de huevo de la granja “Laguna Colorada”.

Equipo	Total del proceso (kWh)	Tasa $\left(\frac{Wh}{1,000 \text{ ave} \cdot \text{día}}\right)$	$\left(\frac{Wh}{\text{ton de huevo}}\right)$
Carro dispensador de alimento (automático)	63	1	35
Motor para el llenado del carro de alimento	1,410	28	783
Bomba para dispensar agua	3,866	77	2,148
Focos (fluorescentes)	6,296	126	3,497
Extractor de aire	3,008	59	1,671
Calentador	38	1	21
Total de energía que demanda la granja (kWh)	14,681	292	8,155

El resultado obtenido para la producción de huevo en éste trabajo, en comparación con Rodríguez *et al.* (2009) quienes registraron una demanda de energía de 265,700 kWh/proceso, es menor y esto se debe a que la granja analizada en este trabajo es de ambiente natural, en donde aún hay operaciones que se hacen manualmente, mientras que en la referencia citada las granjas productoras de huevo son automatizadas.

Por otro lado Pelletier *et al.* (2013) encontraron que para su proceso de producción de huevo en Estados Unidos, se requiere de 223.8 kWh/ton de huevo producido, incluyendo la agricultura de los alimentos y el transporte final del producto; en relación con este estudio, su gasto de energía eléctrica esta por arriba, ya que por tonelada de huevo producido, este estudio demanda 8.1 kWh únicamente por la producción de huevo.

En la Figura 9.7. se muestran los porcentajes resultantes para la demanda energética del proceso de producción de huevo, donde se observa que el mayor uso de energía eléctrica lo presenta la iluminación por focos fluorescentes con un 42.8% debido a que éste sistema se utiliza en las tres etapas del proceso y que además es un factor determinante para la puesta de huevo.

El calentador a gas es el que menor demanda energética presentó para la producción de la granja, esto se debe a que de las 76 semanas que dura el ciclo de una parvada, el sistema de calefacción se utiliza solo las 3 primeras semanas del ciclo.

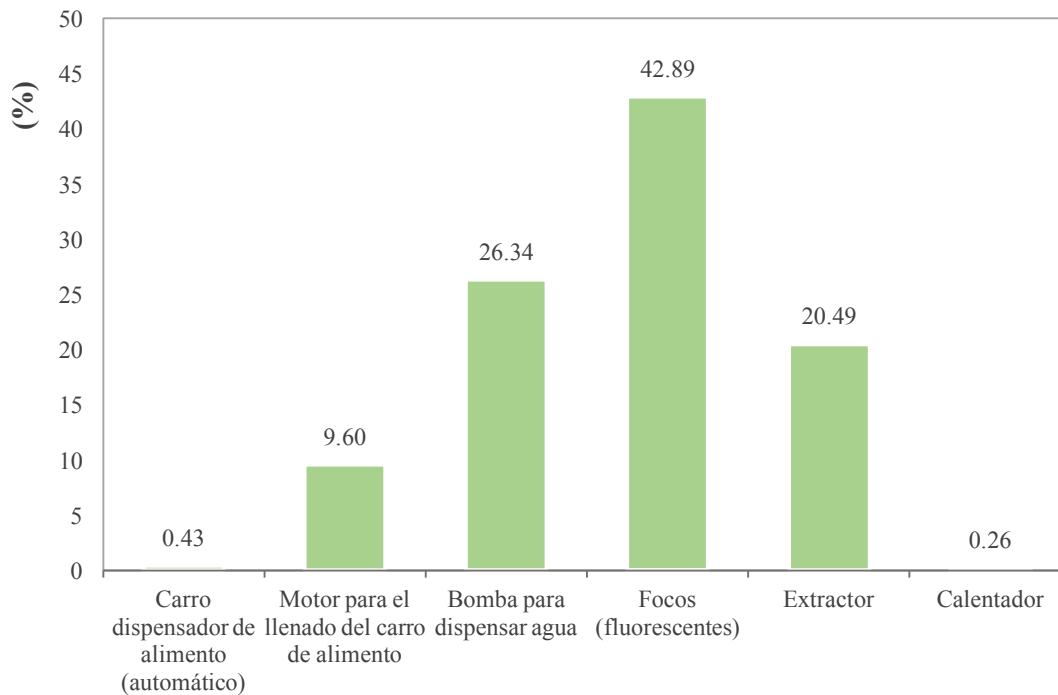


Figura 9.7. Porcentaje de la demanda energética para la producción de huevo.

9.2. Productividad energética del proceso de producción de huevo

Una vez identificado el requerimiento de energía para el proceso productivo, se obtuvo el rendimiento energético del proceso para poder producir 1 kg de huevo a las condiciones que se analizaron, determinando la energía específica y la productividad energética de la granja mediante las ecuaciones 1 y 2 descritas en la sección 8.3. de la metodología de éste trabajo.

$$\text{Energía específica} = \frac{14,681 \text{ kWh}}{1'800,000 \text{ kg de huevo}} = \mathbf{0.008 \text{ kWh/kg de huevo}}$$

$$\text{Productividad energética} = \frac{1'800,000 \text{ kg de huevo}}{14,681 \text{ kWh}} = \mathbf{122.6 \text{ kg de huevo/kWh}}$$

De las ecuaciones propuestas por Moreno, *et al.* (2012), la energía específica encontrada fue de 0.008 kWh/kg de huevo para el ciclo productivo analizado, este resultado refleja la capacidad energética de la granja para poder producir huevo, y tratándose de un proceso tradicional es de esperarse que la productividad energética resulte en un gasto de energía bajo.

El resultado obtenido por Rodríguez *et al.* (2009), que obtuvo 265,770 kWh/proceso; con una producción de 65'084,618 kg de huevo en casetas automatizadas, resultaría tener una energía específica de 0.004 kWh/kg de huevo; en comparación con éste estudio resulta ser un proceso más productivo energéticamente, con una productividad energética de 244.9 kg de huevo por cada kWh requerido.

El proceso tecnificado que presenta la granja estudiada por Rodríguez *et al.*, en 2009, indica que la productividad energética para la producción de huevo en la granja analizada en este trabajo esta sobrada, ya que requiere el doble de energía para una producción menor, lo que representa una razón importante para presentar estrategias de ahorro de energía para la el proceso de producción de huevo en la granja “Laguna Colorada”.

9.3. Emisiones de GEI por el gasto energético en la producción de huevo

Las emisiones de GEI se estimaron con base a los factores de emisión propuestos por el Sistema Eléctrico Nacional, con un factor de emisión para la energía eléctrica de 0.4999 kg de CO₂.eq/kWh (SEN, 2013), y el factor de emisión propuesto por el IPCC para la quema de gas L.P con un factor de emisión de 0.2271 kg de CO₂.eq/kWh (IPCC, 2013).

Con el consumo de energía eléctrica y de gas L.P. para el proceso productivo de huevo, se genera la Tabla 9.6. en donde se muestran los resultados obtenidos para las emisiones de CO₂.eq que se generan a partir del uso de electricidad y la quema del gas L.P. en el proceso.

Tabla 9.6. Emisiones de CO₂.eq generadas en el proceso de producción de huevo.

Equipo	Total del proceso (kWh)	Emisiones (kg de CO ₂ .eq)	Emisiones ($\frac{kg \text{ de } CO_2 \text{ eq}}{1,000 \text{ ave} \cdot \text{día}}$)	Emisiones ($\frac{kg \text{ de } CO_2 \text{ eq}}{\text{ton de huevo}}$)
Carro dispensador de alimento (automático)	63	31.5	0.6	0.02
Motor para el llenado del carro de alimento	1,409	704.4	14.1	0.39
Bomba para dispensar agua	3,866	1,932.6	38.6	1.07
Focos (fluorescentes)	6,296	3,147.4	62.8	1.75
Extractor de aire	3,008	1,503.7	30.1	0.84
Calentador	38	8.6	0.2	0.005
Total de emisiones (kg de CO₂.eq)		7,328.2	146.4	4.07

Esto resulta que para producir 1 ton de huevo, se están emitiendo 4.07 kg de CO₂-eq, este es un valor por debajo de los resultados obtenidos por Pelletier *et al.*, (2013) que obtuvo 5 kg de CO₂-eq por cada kg de huevo que se produce en Estados Unidos; el estudio de Pelletier *et al.* (2013), abarca la agricultura de los alimentos y el transporte, de aquí que el número de emisiones sea mayor.

Vamilson *et al.* (2008), obtuvieron del proceso de producción de pollo de engorde un total de emisiones de 751 kg de CO₂-eq, que se encuentra por debajo del total de emisiones encontradas en este estudio; sin embargo, no representa una comparativa para la producción de huevo, ya que no se realizó en el país y son procesos pecuarios diferentes.

9.4. Análisis exergético para la producción de huevo

El objetivo para esta sección fue conocer la pérdida exergética que presenta el proceso de producción de huevo para determinar cuál equipo o etapa del proceso presenta la mejor oportunidad para ahorrar de energía.

Se registraron las condiciones ambientales del sitio de estudio y las temperaturas interiores de las casetas en cada etapa del proceso (Cría: 31.46°C, desarrollo: 20.81°C y postura: 21.92°C), útiles para el cálculo de la exergía (Ver sección 8.4.1. de metodología).

Cada equipo de la granja se analizó por separado en cada etapa del proceso; con las ecuaciones (5), (7) y (8) descritas en la sección 8.4.1. de la metodología de este trabajo, se obtuvo la exergía por equipo y la exergía del proceso general (ANEXO IV):

b₁ = Exergía que demanda el equipo para realizar su trabajo.

b₂ = Exergía utilizada por el equipo para realizar su trabajo.

b₃ = Exergía perdida sin transformarse en trabajo.

9.4.1. Balance exergético general del la granja “Laguna Colorada”

Con el balance de exergía para la granja se obtuvo la cantidad de kWh que desperdicia el proceso de la granja “Laguna Colorada” (ANEXO VII); el balance de exergía general para la granja se muestra en la Figura 9.8.

En la granja “Laguna Colorada”, un ciclo productivo (76 semanas) presentó una eficiencia exergética total del 53.3% (20,088 kWh); mientras que la pérdida de exergía equivale al 46.7% (17,612 kWh).

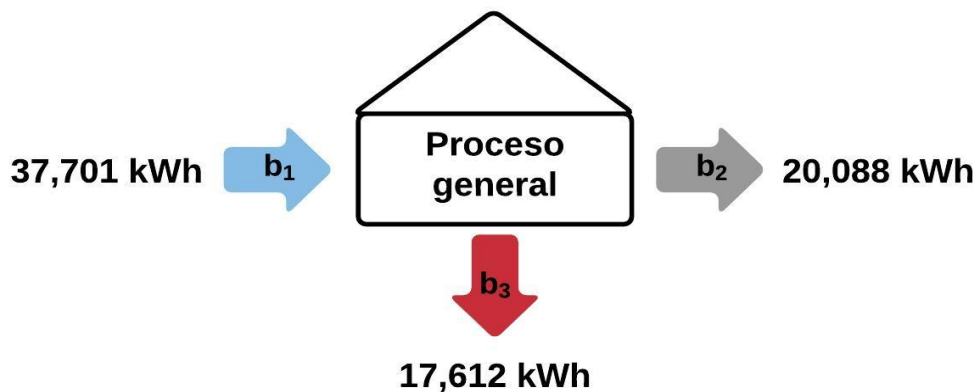


Figura 9.8. Balance exergético para el proceso de producción de huevo (76 semanas).

Existen procesos alimenticios metodológicamente comparables con este estudio (Tabla 9.7.), como son: el procesamiento de jugo de naranja, la producción de yogurt y la producción de azúcar. Sin embargo, la bibliografía carece mayormente de información sobre el análisis de exergía para procesos pecuarios.

Tabla 9.7. Porcentaje de pérdida exergética para procesos alimenticios.

Proceso	Exergía de entrada (kWh)	Exergía de salida (kWh)	Exergía perdida (kWh)	Pérdida exergética (%)	Referencia
Jugo de naranja	5,744.3	577.8	5,168.9	89.9	Waheed, <i>et al.</i> , 2008
Producción de azúcar	33.6	12.6	20.9	62.2	Taner y Sivrioglu, 2015
Producción de yogurt	44,437.5	23,384.3	21,053.2	47.3	Sorgüven y Özilgen, 2011
Producción de huevo	37,701	20,088	17,612	46.7	Éste trabajo

De los procesos alimenticios mostrados en la Tabla 9.7., el presente trabajo es el que menor pérdida exergética presenta (46.7%). El tipo de procesos mostrados impiden el comparativo directo entre ellos; pero resalta la diferencia en su demanda de exergía, donde no necesariamente una mayor demanda exergética en el proceso, significa presentar una pérdida de exergía alta. Respecto a éstos estudios realizados bajo la metodología del análisis exergético, la producción de huevo es el proceso más eficiente, comparable con la producción industrial de yogurt de fresa.

9.4.2. Análisis exergético por equipo que participa en el proceso de producción de huevo

Cada equipo que participa en el proceso de la granja se analizó exergéticamente (Figura 9.9.). El cálculo de la exergía física, química y el rendimiento exergético de los equipos se muestran en los anexos IV y VI. Los equipos con mayor pérdida exergética fueron el calentador (57%), los focos fluorescentes (24%) y el extractor (18%), respecto a la demanda total de exergía para el proceso; mientras que los equipos con mayor eficiencia exergética son: el motor para el llenado de alimentos, el carro automático de alimentos, y las bombas de agua, respectivamente (ANEXO IV y VI). A continuación se explican algunos de ellos.

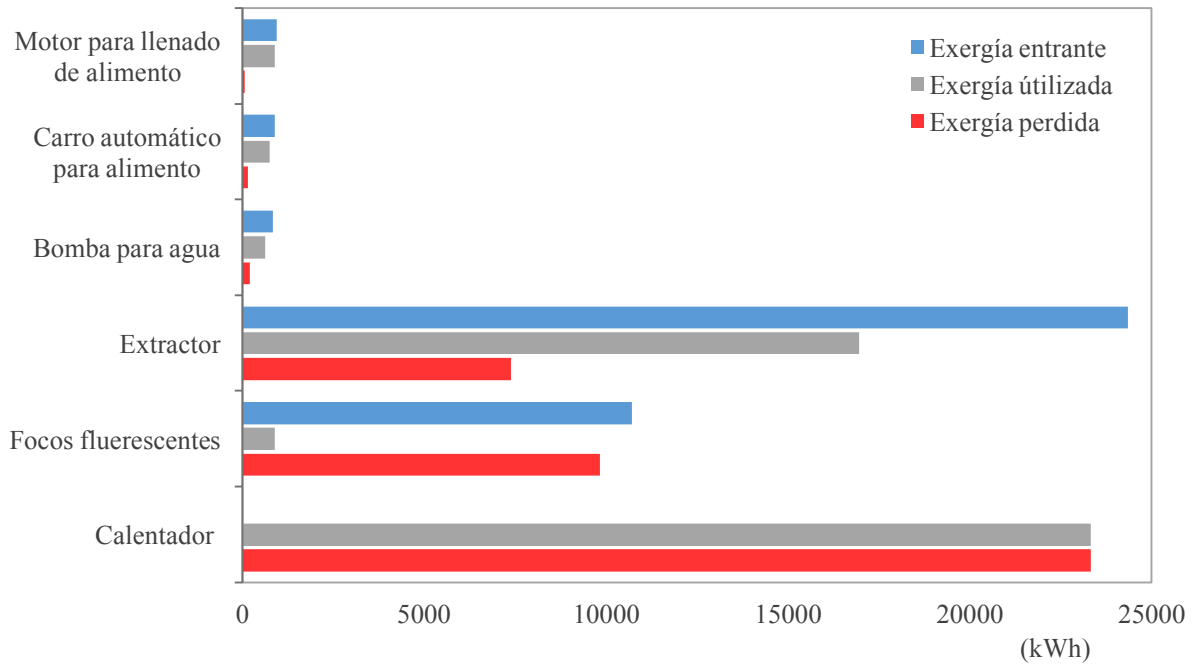


Figura 9.9. Análisis exergético para cada equipo en el proceso (76 semanas).

9.4.2.1. Calentador a gas L.P.

Para el calentador a gas se hizo un análisis de exergía química, por quemar gas L.P. para elevar la temperatura de la caseta (ANEXO VI). Se considera el flujo de calor que genera el equipo para determinar su eficiencia exergética (Figura 9.10.).

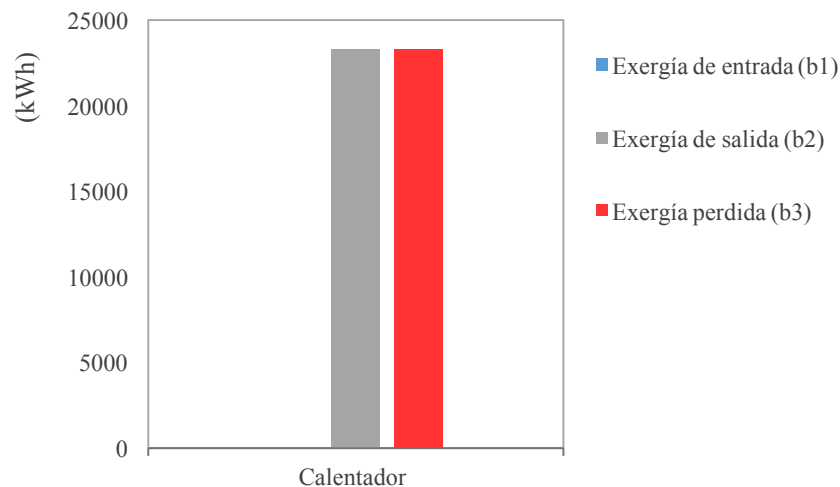


Figura 9.10. Pérdida de exergía para el calentador a gas.

Debido a que el balance exergético del calentador tuvo una pérdida del 100% ($b_2 = b_3$); mediante las ecuaciones (12) y (14) de la sección de metodología (8.4.2.) de éste trabajo, se calculó el flujo de calor y la exergía del flujo de calor del calentador (ANEXO VI), para así determinar la eficiencia del equipo (2.7%).

Los resultados muestran que el proceso de calentamiento del aire es altamente ineficiente; esto se debe a la diferencia de temperaturas entre la corriente de entrada (aire ambiente) y la corriente de salida (aire caliente) en el calentador a gas. El cálculo de exergía en equipos de generación de calor siempre resulta en una alta ineficiencia del equipo; ya que para el proceso de calentamiento, la exergía del calor es mucho más baja que su valor de energía. Esto ocurre particularmente si la corriente de entrada se encuentra a temperaturas próximas al ambiente de referencia (Waheed, *et al.*, 2008); como es el caso del calentador a gas que se analizó en este estudio.

9.4.2.2. Focos fluorescentes

La eficiencia exergética de los focos fluorescentes fue de 8.2%. El resultado obtenido no es el más bajo de los equipos analizados; pero si representa una alta ineficiencia para los focos. La falta de estudios que reporten exergía para éste tipo de luminarias, impide a hacer una comparativa directa para los resultados obtenidos en este trabajo. Mahlia, *et al.*, (2011), supusieron una eficiencia exergética del 70% para focos fluorescentes de 40 Watts; sin embargo, no existe un cálculo mediante balances exergéticos que fundamenten el porcentaje que reportan.

Por lo tanto, el análisis exergético presentado muestra un campo de estudio amplio para el sistema de iluminación en el sector avícola y principalmente para la producción de huevo; donde no se puede prescindir de la luz para las aves de postura.

En México han quedado en desuso las luminarias incandescentes desde el 1° de enero del 2014, derivado del Programa Luz Sustentable promovido por el FIDE (2011). Se discontinuó la venta y el uso de focos incandescentes de 100 Watts el diciembre del 2011, los focos de 75 Watts a partir de diciembre del 2012 y los focos de 60 y 40 Watts ya no se vendían para el diciembre del 2013; quedando prohibido el uso de luminarias incandescentes con una potencia mayor a 40 Watts.

A pesar de que en México ya no se usan focos incandescentes, en países como Colombia se siguen usando. Díaz (2007), reporta una eficiencia exergética para focos incandescentes de 60 Watts ($\eta = 12.7\%$). Si bien es una eficiencia mayor a los focos fluorescentes aquí analizados; el estudio de Díaz (2007), ha quedado obsoleto, al menos para México.

9.4.3. Balance exergético por etapa del proceso de la granja “Laguna Colorada”

El balance exergético para cada etapa del proceso de la granja “Laguna Colorada” se muestra en la Figura 9.11., para el periodo total de permanencia de las aves en cada una de éstas etapas.

La etapa de cría tiene mayor demanda de exergía debido al equipamiento de esta caseta (semi-tecnificada); sin embargo, la pérdida de exergía que presenta no es la más alta (39%). Esto puede deberse al tipo de construcción de la caseta; ya que aunque no es de ambiente controlado, si tiene mayor aislamiento de las condiciones ambientales que las casetas de desarrollo y postura.

Por otro lado, las etapas de desarrollo y postura, tienen una pérdida de exergía del 76% respecto a la exergía de entrada. Si bien, ambas casetas no presentan similitudes en la demanda de exergía; la relación en el desperdicio de exergía, puede deberse a las características en el tipo de construcción y el manejo de los procesos en éstas casetas.

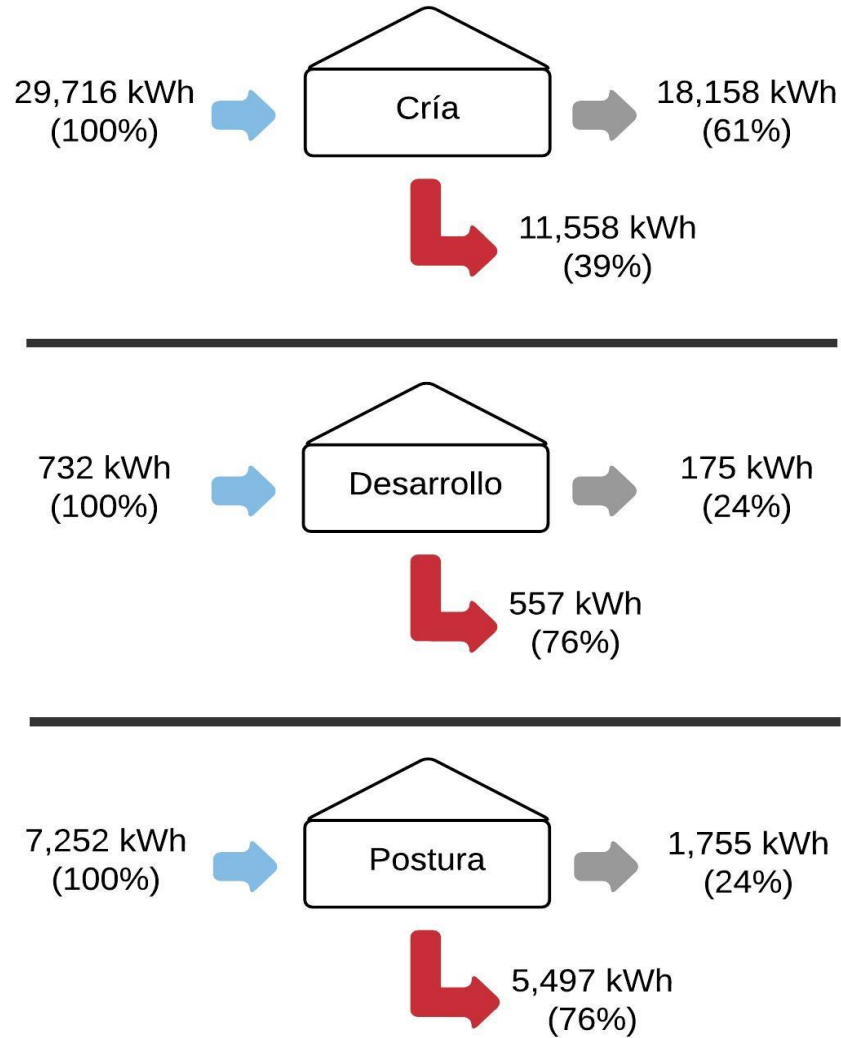
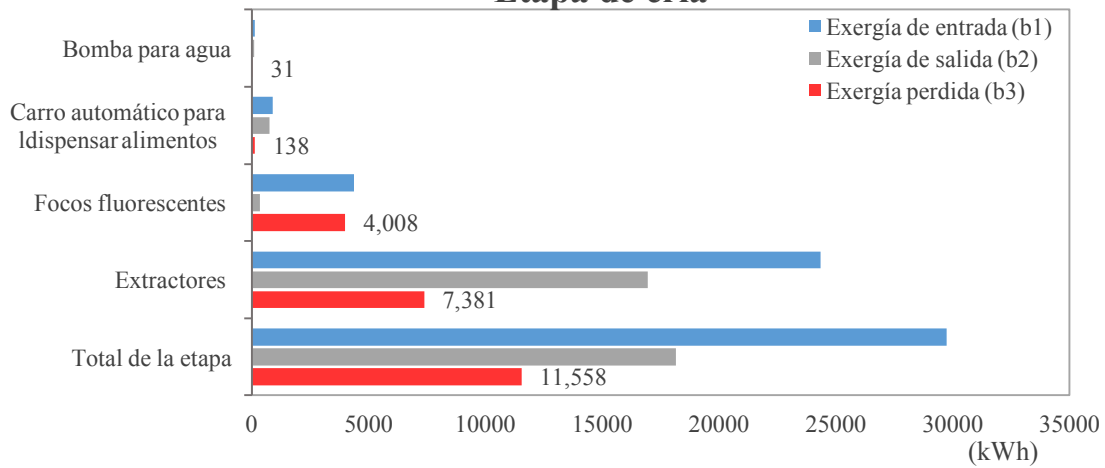


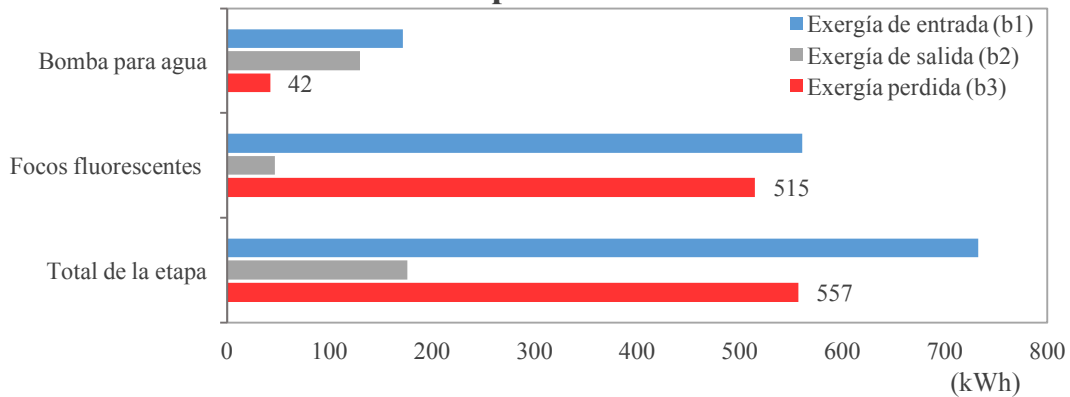
Figura 9.11. Balance exergético para cada etapa de la granja “Laguna Colorada”.

En cada etapa del proceso, también se analizaron exergéticamente los equipos identificados. El análisis se hizo de acuerdo al periodo de permanencia de las aves en cada etapa. La Figura 9.12. muestra el resultado del análisis de exergía total para cada etapa del proceso de producción de huevo en la granja estudiada.

Etapa de cría



Etapa de desarrollo



Etapa de postura

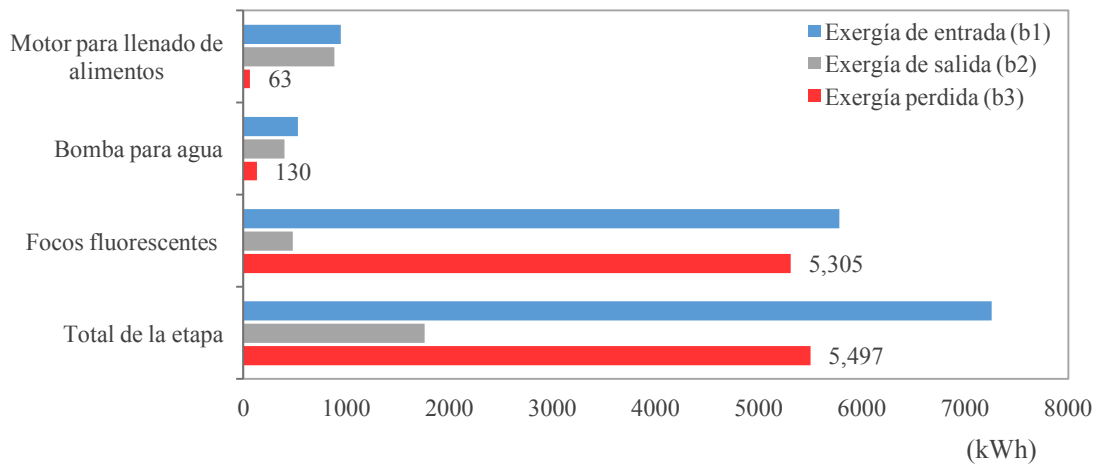


Figura 9.12. Análisis exergético para los equipos en cada etapa del proceso.
NOTA: Los gráficos no son comparables entre sí, prestar atención a la graduación de los ejes.

9.4.4. Reporte de resultados para el análisis exergético de la producción de huevo.

Los resultados obtenidos del análisis exergético tanto para el proceso general como para cada etapa de la producción de huevo, se reportan como lo indica la Tabla 9.8.

Tabla 9.8. Unidades de reporte para resultados.

Tipo de resultado	Descripción	Unidad
Por etapa	Resultados para cada etapa del proceso (cría, desarrollo y postura).	$\left(\frac{kWh}{\text{etapa fisiológica}}\right)$
Por cada 1,000 aves al día	Resultados del balance exergético por cada 1,000 aves al día.	$\left(\frac{Wh}{1,000 \text{ aves} \cdot \text{día}}\right)$
Por ton de huevo producido	Resultados de exergía por tonelada de huevo producido.	$\left(\frac{kWh}{\text{ton de huevo}}\right)$
Total del proceso	Resultados del balance exergético para un ciclo productivo de aves (76 semanas).	$\left(\frac{kWh}{\text{proceso}}\right)$

Los resultados del análisis exergético se muestran en la Tabla 9.9., donde cada una de las etapas presenta su balance de exergía total; además, el balance exergético por cada 1,000 aves al día y por ton de huevo que se produce, tanto en cada etapa como en para el total del proceso.

Cada etapa analizada indica el porcentaje de pérdida de exergía respecto al total de la pérdida exergética del proceso. La etapa de cría es la que mayor pérdida exergética representa a la producción de huevo en un ciclo productivo de aves (76 semanas), con un porcentaje de pérdida del 66% (11,558 kWh). La etapa de menor pérdida fue la etapa de desarrollo (3%).

Las diferencias en la pérdida exergética en las etapas de cría y desarrollo se encuentran en el equipamiento con el que cuenta cada una de ellas; mientras que la etapa de cría es semi-tecnificada, la etapa de desarrollo realiza la mayoría de sus labores manualmente.

Tabla. 9.9. Resultados del análisis exergético por etapa y por proceso

Tipo de resultado	Resultado			Unidad	Índice exergético
	Exergía de entrada (b_1)	Exergía útil (b_2)	Exergía perdida (b_3)		
Etapa de cría					
Por etapa	29,716	18,158	11,558	$\left(\frac{kWh}{\text{etapa fisiológica}}\right)$	
Por 1,000 aves al día	590	360	230	$\left(\frac{Wh}{1,000 \text{ aves} \cdot \text{día}}\right)$	1.5
Por ton de huevo	16	10	6	$\left(\frac{kWh}{\text{ton de huevo}}\right)$	
Porcentaje de pérdida*	-	-	66	%	
Etapa de desarrollo					
Por etapa	732	175	557	$\left(\frac{kWh}{\text{etapa fisiológica}}\right)$	
Por 1,000 aves al día	15	4	11	$\left(\frac{Wh}{1,000 \text{ aves} \cdot \text{día}}\right)$	0.3
Por ton de huevo	0.4	0.1	0.3	$\left(\frac{kWh}{\text{ton de huevo}}\right)$	
Porcentaje de pérdida*	-	-	3	%	
Etapa de postura					
Por etapa	7,252	1,755	5,497	$\left(\frac{kWh}{\text{etapa fisiológica}}\right)$	
Por 1,000 aves al día	145	35	110	$\left(\frac{Wh}{1,000 \text{ aves} \cdot \text{día}}\right)$	0.3
Por ton de huevo	4	1	3	$\left(\frac{kWh}{\text{ton de huevo}}\right)$	
Porcentaje de pérdida*	-	-	31	%	
Proceso general					
Por 1,000 aves al día	750	399	351	$\left(\frac{Wh}{1,000 \text{ aves} \cdot \text{día}}\right)$	
Por ton de huevo	20.4	11.1	9.3	$\left(\frac{kWh}{\text{ton de huevo}}\right)$	1.1
Total del proceso	37,701	20,088	17,612	$\left(\frac{kWh}{\text{proceso}}\right)$	

* Respecto a la pérdida exergética total del proceso.

La Tabla 9.9. muestra en su última columna el índice exergético resultante para cada etapa del proceso y para el proceso general. El índice exergético se define por la relación de la salida de exergía del sistema y la exergía perdida que presenta el sistema analizado. A este índice exergético se le considera un parámetro importante que muestra la relación de equilibrio entre el uso y pérdida de exergía que presenta un sistema (Dalkiran, *et al.*, 2016).

El índice exergético de la etapa de cría resultó ser más alto (1.5), incluso al del proceso total (1.1). Con base en los resultados del índice exergético, la etapa de cría presenta menor productividad que el proceso total; ya que cuanto mayor resulta el índice exergético, el sistema presenta más pérdida de exergía y se reduce la productividad energética, afectando directamente la producción, los costos y el ambiente (Açıkkalp y Caner, 2015).

Cada etapa del proceso de producción de huevo se analizó exergéticamente por cada 1,000 aves al día alojadas en la granja “Laguna Colorada”; la Figura 9.13 muestra el requerimiento, uso y pérdida de exergía que presentan 1,000 aves al día en cada etapa y en el proceso total.

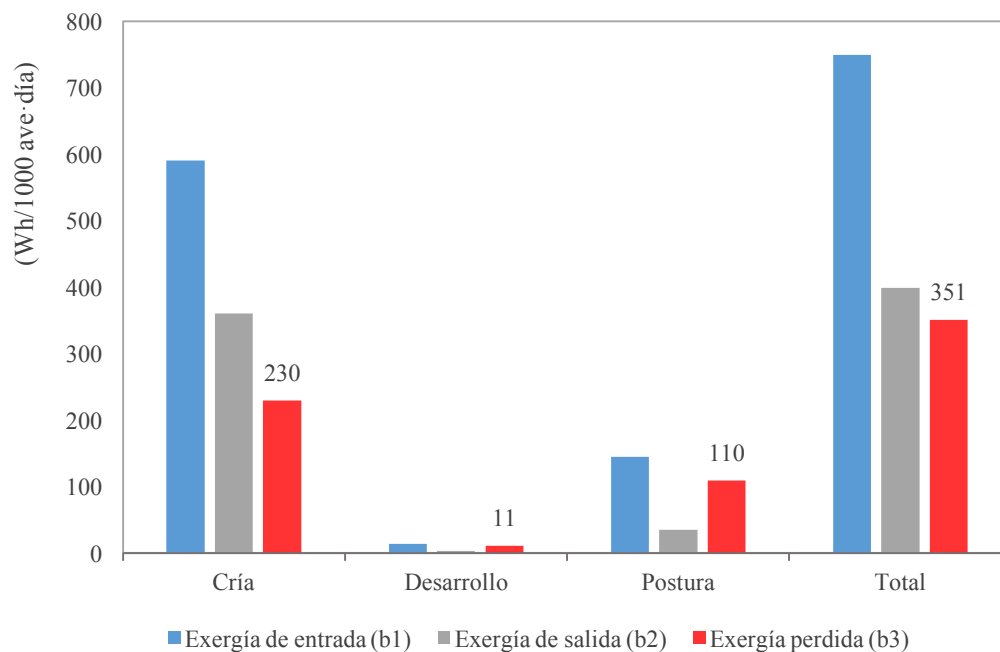


Figura 9.13. Demanda exergética para 1,000 aves al día en la producción de huevo.

La etapa de cría presentó mayor pérdida de exergía (230 Wh/1000 ave·día), sin tener en cuenta la pérdida exergética del calentador. Para el proceso total de 76 semanas, cada 1,000 aves pierden exergía en una tasa de 351 Wh/1,000 ave·día. La menor pérdida exergética la presenta la etapa de desarrollo (11 Wh/1,000 ave·día), como se ha visto a lo largo del análisis.

El análisis exergético para la producción de huevo en la granja “Laguna Colorada”, también se graficó para cada etapa, y así comparar la demanda, uso y pérdida de exergía en éste proceso (Figura 9.14.).

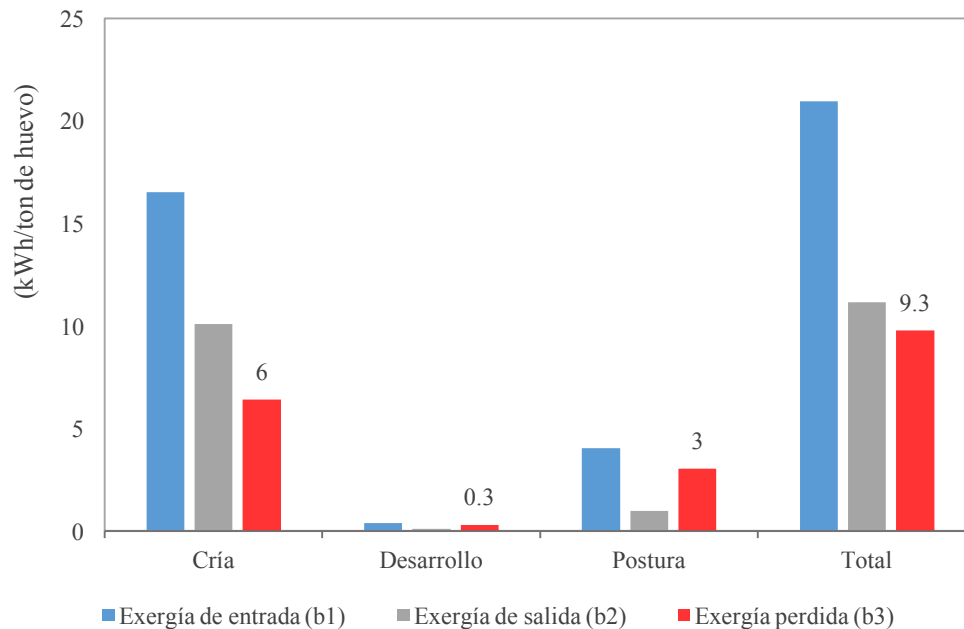


Figura 9.14. Demanda exergética por ton de huevo producida.

La demanda exergética para la producción de huevo en cada etapa del proceso, presenta el mismo comportamiento de las aves; teniendo la etapa de cría la mayor demanda y pérdida exergética (6 kWh/ton de huevo). La etapa de desarrollo fue la de menor pérdida exergética (0.3 kWh/ton de huevo). En tanto que, el proceso total para la producción de huevo pierde 9.3 kWh por cada tonelada de huevo producida.

Este estudio refleja la importancia del sector y el valor de la demanda de energía que presenta el sector avícola en sus procesos. A pesar de que la comparación directa de los resultados obtenidos en el presente trabajo no es posible, debido a la falta de reportes que apliquen el análisis exergético para la producción de huevo o para el sector avícola; los resultados obtenidos permiten contribuir con el manejo eficiente de la energía. Además, permitiría disminuir el número de emisiones de CO_2eq a la atmósfera, ya que se logra una mayor eficiencia de los recursos energéticos cuando se consideran bajo términos de exergía (Dincer, et al., 2005).

10

COMPARATIVO EXERGÉTICO DE UNA CASETA DE AMBIENTE NATURAL Y UNA CASETA DE AMBIENTE CONTROLADO

Se hizo un análisis exergético paralelo a este estudio para una caseta de ambiente controlado, con el objetivo de situar energéticamente la granja “Laguna Colorada”, respecto a los sistemas tecnificados. Las diferencias entre una caseta de postura de ambiente natural y una caseta de postura de ambiente controlado se muestran en la Tabla 10.1.

La capacidad de la caseta de ambiente controlado cuenta con 20,000 aves de postura más que la caseta de ambiente natural; lo que justifica la mayor demanda de energía en éste tipo de casetas. Además, la automatización de todas las actividades que se realizan en el proceso dentro de éste tipo de casetas, hace prescindir de personal y requerir más energía eléctrica. El equipamiento de éste tipo de caseta incluye: sistema de alimentación automático, bandas recolectoras de gallinaza, recolección automática de huevo y la extracción de aire.

Si bien son las mismas actividades las que se llevan a cabo en ambas casetas, la caseta de ambiente natural, realiza en su mayoría, sus actividades manualmente. De este modo, la caseta de ambiente natural, evita mayor requerimiento de energía eléctrica.

En cuanto a producción de huevo, la caseta de ambiente controlado tiene mayor productividad (16.5 ton/semana). Este resultado confirma en parte, la mayor demanda que presenta la caseta de ambiente controlado, y que se utiliza para incrementar 6.5 ton de huevo por semana la productividad, en comparación con la caseta de ambiente natural de la granja “Laguna Colorada”.

Tabla 10.1. Diferencias entre casetas de postura de ambiente natural y controlado.

Características	Caseta de ambiente natural	Caseta de ambiente controlado
Construcción	De cortina	Aislada de condiciones climatológicas
Grado de tecnificación	Manual	Automatizada
Capacidad de ponedoras en la caseta	30,000	50,000
Rendimiento (ton de huevo/semana)	10	16.5

Para el análisis exergético comparativo, se estudió una semana de producción de huevo en ambas casetas. Los resultados de los dos análisis se muestran en la Tabla 10.2.

Tabla 10.2. Comparativa exergética entre una caseta de ambiente natural y una caseta de ambiente controlado.

	Caseta de ambiente natural	Caseta de ambiente controlado
Exergía de entrada (kWh)	40	5,748
Exergía de salida (kWh)	10	5,332
Exergía perdida (kWh)	30	416
Eficiencia exergética de la caseta (%)	24	92
Productividad exergética (kWh/ton de huevo)	4	348

De la Tabla 10.2., los resultados indican que la caseta de ambiente natural en la granja “Laguna Colorada”, pierde 76% de la exergía que demanda; en tanto que, la caseta de ambiente controlado resultó ser más eficiente exergéticamente, con una pérdida de exergía del 8%. La menor pérdida en la caseta de ambiente controlado se debe al aislamiento de las condiciones ambientales, ya que se evitan pérdidas exergéticas al no tener interacción directa con el ambiente de referencia.

10.1. Exergía específica y productividad exergética

Las relación entre la exergía y la producción de huevo, se define mediante la exergía específica utilizada en cada proceso y su productividad exergética. La Figura 10.1. muestra la exergía específica utilizada y la productividad exergética; donde la primera fila corresponde a los datos de la caseta de ambiente natural y los de la segunda fila corresponden a la caseta de ambiente controlado.

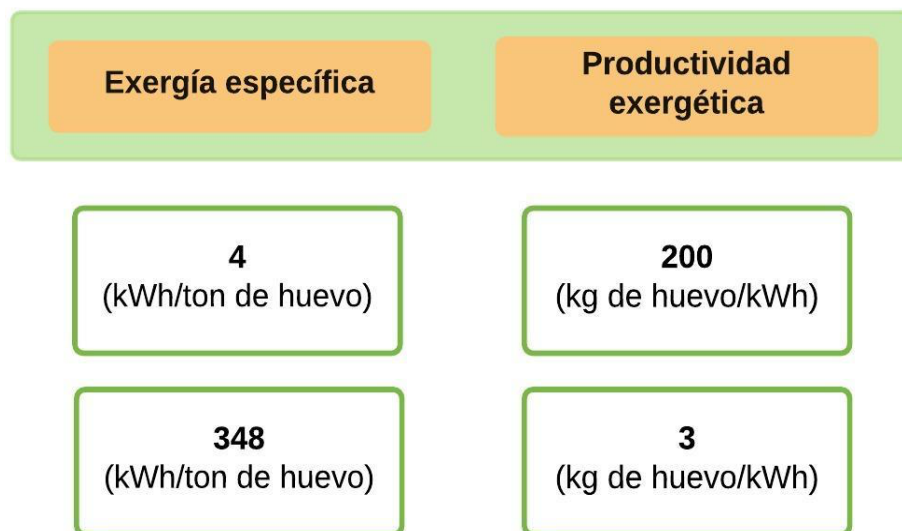


Figura 10.1. Exergía específica y productividad exergética para la caseta de ambiente natural y ambiente controlado.

La exergía específica muestra que la demanda de exergía de la caseta de ambiente controlado es mayor para producir una ton de huevo (348 kWh/ton de huevo) comparada con 4 kWh/ton de huevo que se requieren en la caseta de ambiente natural. Estos resultados se deben a las diferencias en el equipamiento de ambas casetas, por la mayor demanda de energía de los equipos en la caseta de ambiente controlado. Por otro lado, a pesar de que la caseta de ambiente controlado presenta mayor producción de huevo por semana (16.5 ton de huevo/semana); la productividad exergética indica que este tipo de casetas tiene menor producción de huevo por cada kWh consumido (0.003 ton de huevo/kWh), que la caseta de ambiente natural (0.2 ton de huevo/kWh).

Con base en la pérdida de exergía; la caseta de ambiente natural podría reducir su impacto al ambiente en un 76% (porcentaje de pérdida exergética), si la energía se utilizara eficientemente. Esto debido a que la caseta de ambiente natural demanda más energía de la necesaria para llevar a cabo su proceso. El análisis de exergía resulta una verdadera medida de imperfecciones y es una herramienta de apoyo para la evaluación de la sustentabilidad en los procesos (Bilgen, 2015).

11

ESTRATEGIAS DE AHORRO DE ENERGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE HUEVO

Del análisis exergético, se identificaron los equipos con mayor pérdida exergética, donde se pudiera conseguir mayor ahorro de energía. El objetivo fue ofrecer alternativas de ahorro energético para los equipos que presentaron mayor porcentaje de pérdida de exergía en el proceso total: el calentador a gas, los focos fluorescentes y el extractor de aire respectivamente (Figura 11.1.).

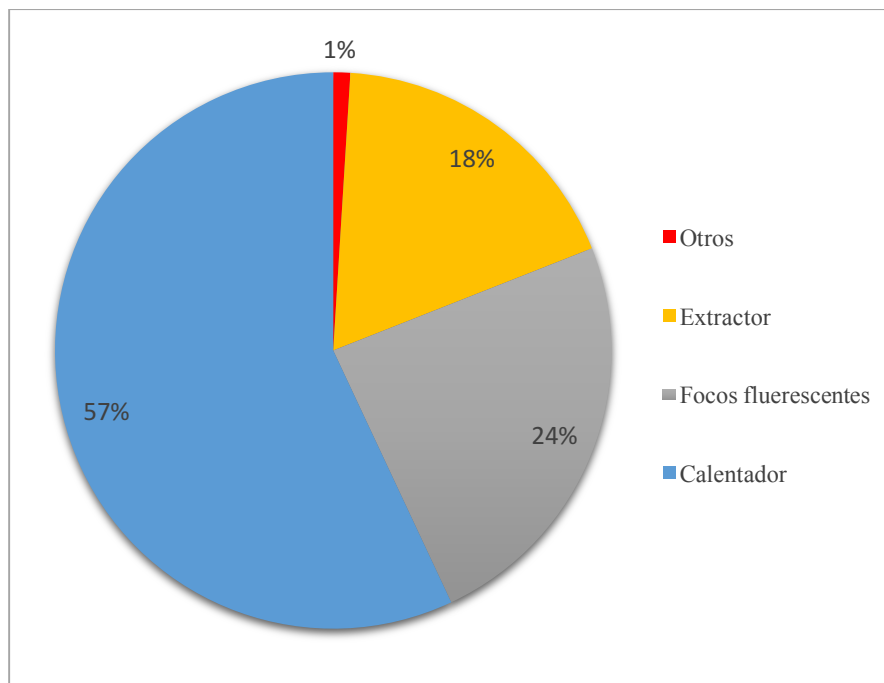


Figura 11.1. Porcentaje de pérdida exergética por equipo (76 semanas).

11.1. Sistema de calefacción

El calentador a gas resultó el menos eficiente exergéticamente ($\eta = 2.75 \%$). Esta eficiencia corresponde al flujo de calor; por lo que no se puede reducir la pérdida exergética del equipo, ya que la calefacción es indispensable para las pollitas en la etapa de cría.

A pesar de lo indispensable del calor para la cría de las pollitas, no se pueden eliminar las pérdidas exergéticas que resultan de una transferencia de calor (Szargut, 2005). Por lo que en éste caso, se pueden llevara cabo buenas prácticas para el ahorro de energía o incluso cambiar el combustible utilizado, para reducir el impacto negativo en el ambiente.

11.1.1. Aislamiento en las paredes de la caseta

La pérdida de calor en las casetas de producción avícola se da por los espacios abiertos en la paredes o cortinas de la caseta (Oviedo, 2009). Una grieta de 0.3 cm equivale a una pérdida de calor de 1m^2 de cortina o 0.7 metros de superficie abierta (Arroyo, 2014). Manteniendo aislada de corrientes de aire la caseta de cría de las pollitas, permitirá que se reduzca el consumo de gas L.P., ya que se evitarían las pérdidas por aberturas; alcanzando la temperatura óptima para las pollitas (25° a 30° C) en menor tiempo y utilizando menos recursos energéticos (Oviedo, 2009).

Para el caso de la granja “Laguna Colorada”, cerrar las cortinas de la caseta de cría al momento de encender los calentadores, reduciría el consumo de gas L.P. Además, mantener las cortinas cerradas, haría que el calor permanezca dentro de la caseta por periodos prolongados de tiempo; disminuyendo la continuidad del uso de los calentadores.

11.1.2. Sustitución de gas L.P.

Del reconocimiento realizado en la granja “Laguna Colorada” se identificó que la gallinaza es desechada al aire libre. Esto representa una oportunidad de generar su propia energía mediante la fermentación anaerobia de este residuo con un biorreactor que produzca biogás, donde su alimentación principal fuera la gallinaza desechada.

La gallinaza es considerada un residuo rentable para producir biogás. Castillo y Choy (2012), compararon la generación de biogás a partir de gallinaza y excreta porcina; obteniendo que la gallinaza genera 75m^3 de biogás por tonelada de excreta, en tanto que el estiércol porcino produce solo 15m^3 de biogás por tonelada.

Otra propuesta para la sustitución del gas L.P. es aprovechar la energía solar para la calefacción de la caseta de cría. Czarick y Fairchild (2008), proponen aprovechar la radiación del sol para la calefacción de las casetas por medio de las ganancias de calor en el techo, esparciéndolo con un intercambio de aire en dirección descendente hacia la caseta; sin embargo, aclaran que este sistema funcionaría en el caso de que el material de construcción del techo tenga un valor $R \leq 2 \text{ m}^2 \cdot \text{°C}/W$.

11.2. Sistema de iluminación

El sistema de iluminación tuvo una pérdida de exergía del 24% del total en el proceso. Para este resultado, se analizaron dos estrategias que permiten reducir la demanda de energía en el proceso, incrementar la eficiencia del sistema de iluminación y disminuir las emisiones de CO_2eq a la atmósfera que se derivan del uso de los focos fluorescentes.

11.2.1. Sustitución de focos fluorescentes

Para la reducción en la demanda de energía, se propone sustituir los focos fluorescentes actuales, por focos tipo LED. La Tabla 11.1. muestra el comparativo entre ambos tipos de luminarias, en caso de sustituirse, para el proceso general de la granja estudiada. La eficiencia exergética para los focos indica que los focos tipo LED de 3 Watts son 3.25 veces más eficientes que los focos fluorescentes utilizados actualmente en la granja “Laguna Colorada”; lo cual reduciría la demanda de energía para el proceso; pasando de demandar 6,296 kWh a demandar 5,245 kWh.

Tabla 11.1. Comparativo entre focos fluorescentes y focos LED par el proceso general de la granja “Laguna Colorada ”

Características*	Tipo de luminaria	
	Fluorescente	LED
Capacidad (Watts)	9	3
Eficiencia exergética del equipo (%)	8.2	26.7
Costo unitario del foco (MXP)	63 / foco	165 / foco
Cantidad de focos para el proceso	917	917
Costo de la inversión total para el proceso (MXP)	57,771	151,305
Demanda total de energía en el proceso (kWh)	6,296	2,098
Costo por kWh (MXP)**	0.7	0.7
Costo total de energía eléctrica para el proceso (MXP)	4,407	1,468
<i>Ahorro energético para el proceso (kWh)</i>		4,198
<i>Emisiones de CO₂eq evitadas (kg de CO₂eq/kWh)</i>		2,098

* Para un ciclo de 76 semanas.

** Estimación a mayo del 2016.

Los focos LED deberían ser de 3 Watts de potencia debido al requerimiento de luz para las gallinas ponedoras. Este tipo de luminarias compensan el flujo luminoso que ofrecen las lámparas fluorescentes de 9 Watts (65 lúmenes), de este modo no se verá afectada la productividad de las ponedoras por el cambio del tipo de luminarias.

El costo de inversión total de la Tabla 11.1. muestra que para cambiar a los focos LED se necesita de \$93,534.0 pesos mexicanos adicionales al costo de las actuales luminarias fluorescentes. Sin embargo, esta inversión puede hacerse paulatinamente, sustituyendo los focos LED solo cuando la vida útil del foco fluorescente actual haya terminado.

Los focos LED de 3 Watts reducirían la demanda de energía total del proceso de la granja en un 28.5% (4,198 kWh). Además, ambientalmente, este cambio de luminarias evitaría la emisión de 2,098 kg de CO₂eq a la atmósfera que se derivan del sistema actual de iluminación en el proceso total de la granja (76 semanas).

11.2.2. Paneles fotovoltaicos

Se propone la implementación de paneles fotovoltaicos que proporcionen la demanda total de energía para la iluminación en el proceso. La Tabla 11.2. muestra el análisis hecho para el requerimiento energético en cada etapa del proceso y para el total del proceso, así como el número de paneles que compensarían la demanda de energía eléctrica total para la iluminación.

De acuerdo con la Tabla 11.2., para el proceso total de la granja se invertirían 79,344 MXP para sustituir la alimentación eléctrica. Sin embargo, la conformación de las casetas dentro de la granja no permite que los paneles se coloquen de manera tal que cumplan el objetivo de cubrir el requerimiento total de energía; lo cual impide llevar a cabo esta posibilidad.

Se analizó entonces la posibilidad de tener paneles fotovoltaicos en cada etapa del proceso de la granja “Laguna Colorada”. El mejor costo/beneficio para el ahorro de energía en el sistema de iluminación lo tiene la etapa de postura; debido a que es la etapa con mayor requerimiento de energía y el mayor tiempo de uso de luminarias (Tabla 11.2.). Además, la instalación de las tres casetas de postura en la granja “Laguna Colorada” es continua, lo que favorece la colocación de los paneles fotovoltaicos que provean de energía eléctrica para las tres casetas de la etapa de postura.

Tabla 11.2. Sistema fotovoltaico para la iluminación de la granja “Laguna Colorada”

Etapa / periodo (semanas)	Requerimiento total de energía por iluminación (kWh)	Número de paneles *	Costo total (MXP) **
Total del proceso / 76	6,296	8	79,344
Cría / 6	581	8	79,344
Desarrollo / 10	272	4	39,672
Postura / 60	5,443	8	79,344

* *Cotización de paneles fotovoltaicos (Econotecnia, 2016).*

** *Valor de cambio del dólar: 1 = 18.78 MXP (Banxico, mayo 2016).*

De colocar los paneles fotovoltaicos en la etapa de postura, además de reducir costos en la productividad, se estarían ahorrando 5,443 kWh de energía eléctrica por iluminación en un ciclo productivo. Además, la instalación de paneles fotovoltaicos en la etapa de postura evitaría por iluminación 2,721 kg de CO₂eq, para el proceso general de la granja.

11.3. Sistema de extracción de aire.

La eficiencia exergética de los extractores fue de $\eta = 69.6 \%$; la deficiencia del equipo puede deberse al tipo de construcción de la caseta, la distribución de los equipos dentro de la caseta o a deficiencias internas del equipo (Casey *et al.*, 2008). Por lo tanto, se propone un plan de mantenimiento en los equipos extractores de aire, que permitan incrementar su eficiencia y reducir la demanda de energía eléctrica.

11.3.1. Mantenimiento del equipo

El continuo mantenimiento de los equipos de extracción de aire, reduciría de forma sustancial el uso de la energía, hasta en un 15% (Worley *et al.*, 2005); evitando las fricciones entre las aspas y el rozamiento propio del equipo, además de incrementar la vida útil del sistema de extracción de aire. Para conseguir ahorrar energía en los extractores, Worley *et al.*, (2005) propone un programa de mantenimiento para los equipos de extracción de aire (Tabla 11.3.).

Tabla 11.3. Mantenimiento para sistemas de extracción de aire (Worley *et al.*, 2005).

Tipo	Operación	Periodicidad
Conductos	Limpieza	1 año
	Comprobación de la estanqueidad aparente	5 años
Aberturas	Limpieza	1 año
Aspiradores híbridos mecánicos y extractores	Limpieza	1 año
	Revisión del estado de funcionalidad	5 años
Filtros	Revisión del estado	6 meses
	Limpieza o sustitución	1 año
Sistemas de control	Revisión del estado de sus automatismos	2 años

De seguir el plan de mantenimiento para los extractores, el requerimiento de energía eléctrica que presentaron los extractores pasaría de 3,008 kWh a solo demandar 2,557 kWh para un ciclo productivo de 76 semanas. Además, las emisiones a la atmósfera que se estarían evitando por reducir el requerimiento de energía en éstos equipos serían de 225.5 kg de CO₂eq para el proceso general.

Los extractores de aire para la etapa de cría en la granja “Laguna Colorada” trabajan mientras que las cortinas de la caseta se encuentran levantadas. Por lo que la demanda de energía puede reducirse si se trabaja mientras que las cortinas se encuentran cerradas.

Szargut (2005), propone colocar los sistemas de extracción de aire en el sitio más caliente del proceso, o las casetas de pollitas en este caso. La finalidad es evitar las pérdidas de exergía; ya que colocándolos de este modo, facilita el trabajo de los equipos para extraer el aire caliente, haciéndolo en menor tiempo, lo cual reduce la demanda de energía eléctrica.

11.4. Estimación del ahorro energético total para la granja “Laguna Colorada”

Con las estrategias de mejora para disminuir la demanda de energía en el proceso de la granja “Laguna Colorada”; se encuentran dos opciones aplicables al proceso de la granja analizada. La estrategia para el proceso general indicada con el inciso A) se muestra en la Tabla 11.4.; donde se describe el costos de inversión, en caso de implementar esta estrategia, así como el ahorro de energía que tendría el proceso general

Cambiando los focos fluorescentes por focos LED y dándole mantenimiento a los extractores de aire, el proceso de la granja “Laguna Colorada” lograría reducir 4,649 kWh por cada ciclo productivo; lo que equivale a evitar 2,124 kg de CO₂eq. Sin embargo, para conseguir el ahorro de energía propuesto en la estrategia A), se requiere de una inversión de 93,534 MXP; lo cual indica que por cada kWh que se ahorra el proceso con esta estrategia, le costaría 20 MXP.

Tabla 11.4. Estrategia general A) para el ahorro de energía.

	Mejora	Costo (MXP)	Demanda energética actual (kWh)	Ahorro energético (kWh)	Emisiones evitadas (CO ₂ eq)
Estrategia general A)	Focos LED	93,534.0	6,296	4,198	2,098
	Mantenimiento de extractores	0.0	3,008	451	226

Por otro lado, la estrategia B) contempla la instalación de paneles fotovoltaicos; capaces de generar energía eléctrica para el sistema de iluminación en la etapa de postura y el mantenimiento de los extractores de aire (Tabla 11.5).

Con la estrategia general B), el proceso de la granja “Laguna Colorada” estaría ahorrando 5,894 kWh en cada ciclo productivo; esto equivale a mitigar 2,947 kg de CO₂eq por cada ciclo productivo del proceso. El costo de implementar esta estrategia sería de 79,344 MXP; que está por debajo del costo de implementación de la estrategia general A); teniendo una relación de 13.5 MXP por cada kWh que se ahorraría con la estrategia general B).

Tabla 11.5. Estrategia general B) para el ahorro de energía.

	Mejora	Costo (MXP)	Demanda energética actual (kWh)	Ahorro energético (kWh)	Emisiones evitadas (CO ₂ eq)
Estrategia general B)	Paneles fotovoltaicos*	79,344.0	5,443	5,443	2,721
	Mantenimiento de extractores	0.0	3,008	451	226

* Para la demanda energética por iluminación en la etapa de postura

La estrategia B) podría conseguir aún mayor ahorro de energía, si los paneles fotovoltaicos a instalar en la etapa de postura contemplaran, además del sistema de iluminación, la demás maquinaria del proceso, ya que toda requiere de energía eléctrica. Para ello, se ocuparían 6 paneles fotovoltaicos adicionales; lo que elevaría el costo de implementación 59,391 MXP más, pero el ahorro de energía sería el total de la demanda energética en la etapa de postura, 10,074 kWh (Tabla 11.6.).

Tabla 11.6. Estrategia general C) para el ahorro de energía.

	Mejora	Costo (MXP)	Demanda energética actual (kWh)	Ahorro energético (kWh)	Emisiones evitadas (CO₂eq)
Estrategia general C)	Paneles fotovoltaicos*	138,735	10,074	10,074	5,036
	Mantenimiento de extractores	0.0	3,008	451	226

* Para la demanda energética total de la etapa de postura

De conseguir el ahorro total de energía para la etapa de postura y reducir la demanda energética del sistema de extracción de aire; el proceso de la granja “Laguna Colorada” ahorraría un total de 10,525 kWh; lo que le costaría invertir 138,735 MXP. Si se lograra invertir en la implementación de esta estrategia, el proceso de la granja evitaría una emisión de 5,262 kg de CO₂eq por cada ciclo productivo de gallinas ponedoras.

La estrategia general C) resulta ser la mejor opción para el proceso de la granja analizada; ya que presenta menor costo por cada kWh que se ahorraría con la implementación de esta estrategia (13 MXP por kWh ahorrado). El ahorro de energía total que tendría la granja “Laguna Colorada” con la implementación de la estrategia C), sería del 71.7% de la demanda total de energía que requiere el proceso.

Esta reducción de energía se refleja tanto para cada 1,000 aves al día, como por ton de huevo producido en la granja que se analizó. La Figura 11.2. muestra la demanda actual de energía por cada 1,000 aves y por tonelada de huevo; comparado con la demanda de energía que presentaría el proceso en ambos casos, de aplicarse la estrategia de mejora C).

El ahorro de energía en ambos casos (1,000 aves al día y por ton de huevo), se reduce en la misma proporción al porcentaje de ahorro energético total conseguido (71.7%); en tanto que la demanda de energía eléctrica resultaría 3.5 veces menor en los dos casos (a) y b)), de conseguir el ahorro de energía eléctrica propuesto.

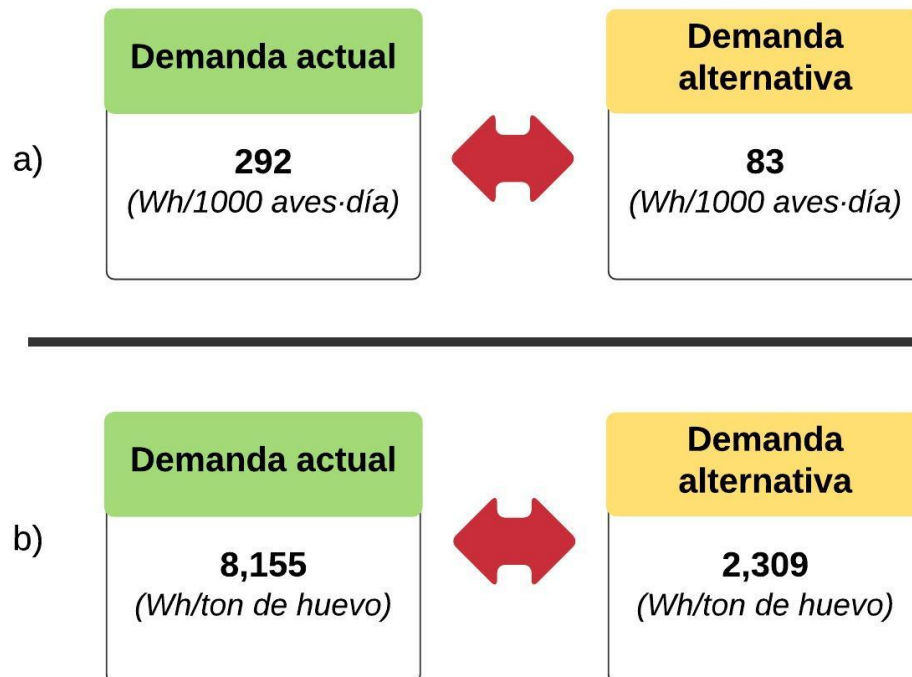


Figura 11.2. Diferencia entre el uso actual de energía eléctrica y el posible ahorro de energía para cada 1,000 aves al día a) y por ton de huevo producido b).

Conseguir ahorrar energía para el proceso, resulta costoso; pero con el análisis de exergía, se logra aprovechar al máximo los recursos energéticos con los que se cuenta, incrementando la rentabilidad energética del proceso general. Aplicar las alternativas de ahorro propuestas para la granja “Laguna Colorada” presentaría múltiples beneficios como, la disminución en el requerimiento de energía, el incremento en la eficiencia de la energía útil (exergía), la disminución en los costos del producto final y contribuiría a mitigar el impacto al ambiente que representa la industria avícola mexicana.

12

CONCLUSIONES

- La producción de huevo en México representa una oportunidad para el ahorro energía eléctrica, ya que demanda más energía de la necesaria para llevar a cabo el proceso; por lo que es recomendable analizar de manera exergética la producción de huevo en diferentes condiciones ambientales y de procesamiento.
- La reducción en la demanda de energía eléctrica es parte fundamental para la disminución de emisiones de CO₂eq; por lo que este estudio permitió identificar los equipos deficientes exergéticamente y que representan una oportunidad para el ahorro de energía en el proceso de producción de huevo, contribuyendo a mitigar el impacto negativo al ambiente.
- A pesar del uso generalizado del análisis energético para procesos productivos; un análisis de exergía complementa el estudio de los recursos energéticos, como se mostró en el presente trabajo. Lo cuál permitió determinar el desperdicio energético y revela las oportunidades de ahorro de energía dentro del proceso de producción de huevo. El análisis exergético debe ir siempre en conjunto del análisis de energía, ya que es indispensable para conseguir un uso eficiente de los recursos disponibles.

13

TRABAJOS FUTUROS

- Se recomienda continuar estudiando el proceso de producción de huevo desde el punto de vista energético y termodinámico para otras épocas del año; considerando las temperaturas de invierno, donde se esperaría una mayor demanda de energía en los sistemas de calefacción e iluminación.
- Es recomendable realizar estudios de Análisis de Ciclo de Vida para la producción de huevo en México. Esta metodología incluye además de la energía, el cultivo y procesamiento de los piensos, el transporte, manejo de estiércol, entre otros indicadores que participan en el proceso; útil para determinar el impacto negativo en el ambiente que tiene la producción de huevo.
- Para estudios posteriores en el sector avícola nacional, se recomienda hacer uso del análisis exergético. Partiendo de esta metodología, se puede lograr a una valoración más acertada de los procesos en términos de energía, reducir la demanda innecesaria de recursos energéticos y contribuir con la mitigación del impacto ambiental.

14

CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

14.1. Objetivo general

Determinar el perfil de consumo de energía utilizado para la producción de huevo para plato en granjas del sector avícola mexicano de clima templado sub húmedo, con ello cuantificar las emisiones de GEI asociadas medidas en CO₂eq y hacer un estimado del ahorro de energía mediante un análisis de exergía para el perfil del consumo energético.

CUMPLIDO

14.2. Objetivos específicos

- Conocer el consumo de energía que se genera en una granja avícola para la producción de huevo.
✓ CUMPLIDO

- Perfilar los consumos e insumos energéticos de la granja que permitan hacer estimaciones.
✓ CUMPLIDO

- Cuantificar las emisiones registradas en la granja y expresarlas en medidas de CO₂ equivalente.
✓ CUMPLIDO

- Analizar la pérdida de exergía del proceso de producción de huevo para establecer propuestas de ahorro energético.
✓ CUMPLIDO

15

VALIDACIÓN DE HIPÓTESIS

La contribución al INEGEI por parte de los procesos de producción de huevo para plato en el país está subestimada. Esta subestimación se asocia a deficiencias en el conocimiento de la relación entre huevo producido y energía utilizada. Debe cuantificarse el uso de energía (eléctrica, gas, etc.) para evidenciar el consumo real del proceso y la participación que tiene la producción de huevo en la emisión de GEI, que hasta ahora sólo contempla la fermentación entérica y el manejo de estiércol.

(VÁLIDA)

Los resultados obtenidos permiten validar la hipótesis, ya que se encontró que para la producción de huevo en México presenta una elevada demanda de energía (eléctrica y gas L.P.) en su proceso productivo (14,681 kWh/76 semanas). La estimación de las emisiones derivadas de este consumo energético (7,328 kg de CO₂eq), se están omitiendo en los inventarios de GEI nacionales.

- Açıkkalp E. y Caner N. (2015).** *Application of exergetic sustainability index to a nano-scale irreversible Brayton cycle operating with ideal Bose and Fermi gases.* Physics letters A. No. 379, pp. 1990 – 1997. ISSN: 0375-9601
- Arroyo P. A. (2014).** *Análisis del requerimiento energético de una granja avícola del municipio de Taretan: Una oportunidad para la producción de GEI.* Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, México.
- Barros V. (2006).** *Cambio Climático Global ¿Cuántas catástrofes antes de actuar?* Libros del Zorzal, Buenos Aires, 174 p.
- Bilgen S. Y Sarikaya I. (2015).** *Exergy for environment, ecology and sustainable development.* Renewable and sustainable energy reviews. No. 51, pp. 1115 – 1131. ISSN: 1364-0321
- Blázquez D. y Del Olmo M. (2007).** Manual de eficiencia energética para pymes: avicultura (granjas avícolas).
- Briganó M. (2015).** Reducción de costos energéticos en granjas de pollo. Expo Internacional de Producción y Procesamiento, IPPE, Atlanta EUA.
- Cambio climático 2001:** Tercer informe de evaluación del grupo Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático.
- Cárdenas M. J. (2010).** México ante el cambio climático: evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación.
- Casey K. D., R.S. Gates, E. F. Wheeler, H. Xin, Y. Liang, A. J. Pescatore y M. J. Ford. (2008).** *On-Farm Ventilation Fan Performance Evaluations and Implications.* The Journal of Applied Poultry Research, vol. 17, ed. 2, pp 283-295.
- Castillo G. C. Y Choy C. R. (2012).** *Desarrollo de un modelo de aprovechamiento de la gallinaza para la generación de recursos secundarios proveniente de la granja avícola San Gregorio.* Guzlop editoras, 1th ed., Lima, Perú. ISSN: 428 4071 - 999 921 348
- CEPAL (2009).** Metodologías de cálculo de la huella de carbono y sus potenciales implicaciones para América Latina.
- CFE (2015).** Comisión Federal de Electricidad. *Factor de Potencia.* Sitio Web: <http://www.cfe.gob.mx/Industria/AhorroEnergia/Lists/Ahorro%20de%20energia/Attachments/3/Factordepotencia1.pdf> consultada en octubre del 2015.
- Comité Nacional Sistema Producto Aves (2014).** Sitio web: <http://sistemaproductoaves.org.mx/index.html>, consultado en Enero del 2014.

- CONUEE (2009).** Metodologías para la Cuantificación de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero y de Consumos Energéticos Evitados por el Aprovechamiento Sustentable de la Energía.
- Czarick M. y Fairchild B. D. (2008).** *Poultry production in hot climates. Chapter 5: Poultry housing for hot climates.* Pp. 101-108. Estados Unidos. Cabi publicaciones. ISBN: 9781845932589
- Dalkiran A., Açikkalp E. Y Caner N. (2016).** *Analysis of a quantum irreversible Otto cycle with exergetic sustainable index.* Physica A. No. 453, pp. 316 – 326. ISSN: 0378-4371
- Díaz D. C. A. (2007).** *Análisis exergético de circuitos eléctricos de la sede administrativa UIS Bucarica.* Escuela de Ingenierías Eléctricas, Electrónicas y Telecomunicaciones. Universidad Industrial de Santander. Bucaramanga, Colombia.
- Dincer I., Hussain M. M. y Al-Zaharnah I. (2005).** *Energy and exergy utilization in agricultural sector of Saudi Arabia.* Energy Police. 33, pp 1461-1467.
- Domenech J. L. (2011).** La huella de carbono concepto, utilidad y aplicación. Grupo Inter-Universitario de Huella de Carbono.
- Econotecnia (2016).** Calculadora solar. ¿Cuántos paneles solares necesito?. Consultado en mayo del 2016. Disponible en: <http://www.econotecnia.com/cuantos-paneles-solares-necesito.html>
- El sitio Avícola (2013).** Consultado en Enero del 2015, del sitio web: <http://www.elsitioavicola.com/articles/2478/mas-produccion-de-huevo-con-menos-impacto-ambiental>
- EPA (2013),** Climate Change; Causes of Climate Change. Sitio de Internet: <http://www.epa.gov/climatechange/science/causes.html#ref1>, consultada en Febrero 2013.
- Eshel G. y Martin P. (2006).** Vegan diets healthier for planet, people than meat diets. The University of Chicago News Office.
- FAO (2012),** El Estado de la Inseguridad Alimentaria en el Mundo. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Roma, 72 p.
- FAO (2013).** Greenhouse gas emissions from pig and chicken supply chains, a global life cycle assessment”.
- FIDE (2011).** **Fideicomiso para el ahorro de energía eléctrica.** *Programa luz sustentable*, consultado en mayo del 2011. Disponible en: http://www.fide.org.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=120&Itemid=218
- García H. P. (2009).** II congreso de estudiantes universitarios de ciencia, tecnología e ingeniería agrónoma. Madrid, 217 p.
- Hansen J. (2007).** El calentamiento global.
- IEA (2009).** International Energy Agency. World Energy Outlook, p. 168.
- INE-PNUD (2008).** Instituto Nacional de Ecología – Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- INECC (2012).** *Adaptación al Cambio Climático en México: Visión Elementos y Criterios para la Toma de Decisiones.* INE, México, D.F., 182 p.
- INEGEI 1990-2010 (2010).** México Quinta comunicación nacional ante la CMNUC. Instituto Nacional de Ecología.

- INEGI 2008-2010 (2010).** Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales; Instituto Nacional de Ecología.
- IPCC (2001).** Cambio climático 2001: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC (2013).** Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 p.
- Kanaly R. A., Manzanero L. I. O., Foley G., Panneerselvam S. y Marcer D. (2010).** Energy Flow, Environment and Ethical Implications for Meat Production. UNESCO, 76 p.
- López G. (2013).** El uso eficiente de la energía en ponedoras. En: Asociación de Especialistas en Ciencias Avícolas del Centro de México. Memorias de la 6ª reunión, Querétaro.
- López R. (2014).** Situaciones que provocan la baja de producción. Los avicultores y su entorno. Vol. 81.
- Mahlia T. M. I., Taufiq B. N. y Saidur R. (2011).** *Exergy analysis for day lighting and space cooling systems for a room space in a tropical climate.* Energy and buildings. No. 43, pp. 1676 – 1684. ISSN: 0378-7788
- Meléndez J. R. y Juárez, T. (2014).** Antecedentes de la avicultura en México. Dpto. de Economía, Administración y Desarrollo Rural. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia Universidad Nacional Autónoma de México. Disponible en: <http://bmeditores.mx/antecedentes-de-la-avicultura-en-mexico/>, consultado en Enero del 2014.
- Miguel J. L. (2011).** Huella de carbono. Cálculo de emisiones (PAS 2050), BSI España, Barcelona, 29 p.
- Moreno R. S., Meza P. C. y Aguilar A. R. (2012).** Eficiencia en el uso de la energía en invernaderos mexicanos. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, no. 4, pp. 736 – 742. ISSN: 2007-0934
- OMM (2013).** Organización Meteorológica Mundial: La concentración de gases de efecto invernadero en la atmosfera.
- Oviedo-Rondon E. (2009).** *Ahorro energético en granjas avícolas*, XLVII Symposium científico de avicultura, Universidad Estatal de Carolina del Norte. Raleigh, Carolina del Norte, Estados Unidos.
- Pelletier N., Ibarburu M. y Xin H. (2013).** *A carbon footprint analysis of egg production and processing supply chains in the Midwestern United States.* Journal of Cleaner Production. 54, 108–114.
- PGEIM (2013).** Programa GEI México.
- Pimentel D. y Pimentel M. (2003).** Sustainability of meat-based and plant-based diets and the environment. American Journal of Clinical Nutrition, Vol. 78, pp. 660.
- Real Escuela de Avicultura (2014).** Consultado en Enero del 2015 del sitio web: <http://www.avicultura.com/2012/04/03/espana-reduce-emisiones-de-gases-efecto-invernadero-por-huevo-producido/>
- Rodríguez D. L. D., B. E. López y G. Y. C. Valdés. (2011).** *Evaluación de Indicadores Agregados Ambientales en la Producción de Huevo.* Observatorio Iberoamericano del Desarrollo Local y la Economía Social. Año 5. No. 10. Universidad de Málaga, España.

- SAGARPA (2009).** Manual de Buenas Prácticas Pecuarias Producción de Huevo para Plato. Primera edición, 2009.
- SEMARNAT (2010).** Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero. Secretaría del Medio Ambiente y de Recursos Naturales, Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático.
- SEN (2013).** (Sistema Eléctrico Nacional). *Factores de emisión para el uso de electricidad en México.* Consultado en noviembre de 2015, disponible en: <http://www.geimexico.org/factor.html>
- SENER (2012).** Secretaría de Energía. Balance Nacional de Energía 2012.
- Sorgüven E. y Özilgen M. (2012).** *Energy utilization, carbon dioxide emission, and exergy loss in flavored yogurt production process.* Energy. No. 40, pp. 214 – 225. ISSN: 0360-5442
- Szargut J. (2005).** *Exergy Method Technical and ecological applications.* Chapter 4: Practical rules for improving thermodynamic imperfection. Pp. 75-90 Ed. Wit Press. ISBN: 1-85312-753-1
- Taner T. y Sivrioglu M. (2015).** *Energy-exergy analysis and optimisation of a model sugar factory in Turkey.* Energy. No. 93, pp. 641 – 654. ISSN: 0360-5442
- UNA (2013).** Unión Nacional de Avicultores. Sitio web: <http://una.org.mx/2013/aviculturamexicana.html>, consultada en Enero del 2014.
- Vaca L. A. (2008).** *Producción Avícola.* EUNED, Costa Rica, 261 p.
- Valmison P. S. J., S. R. Soarez y R. A. F. de Alvarenga. (2008).** *Brazilian poultry: a study of production and supply chains for the accomplishment of a LCA study.* 6^a Conferencia Internacional sobre la Evaluación del Ciclo de Vida en el Sector Agroalimentario. Zurich, Suiza.
- Waheed M. A., Jekayinfa S. O., Ojediran J. O. Y Imeokparia O. E. (2008).** *Energetic analysis of fruit juice processing operations in Nigeria.* Energy. No. 33, pp. 35 – 45. ISSN: 0360-5442
- Wiedemann S.G. y McGahan E. J. (2011).** Environmental Assessment of an Egg Production Supply Chain using Life Cycle Assessment. AECL, Australia, 69p.
- Worley J. M., M. M. Czarick, Fairchild B. F., Outlaw J. L., Collins K. J. y Duffield J. A. (2005).** *Trends US poultry housing for energy conservation. Agriculture as a Producer and Consumer of Energy.* Pp. 243-253. Reino Unido. Cabi publicaciones. ISBN: 0-85199-018-5
- Zakomura N. K., R. Silvia., H. P. Couto, C. Coon y C. R. Pacheco. (2003).** *Modeling metabolizable energy utilization in broiler breeder pullets.* Poultry science. Vol. 8, no. 3, pp. 419-427. Doi: 10.1093/ps/82.3.419

ANEXO I

Encuesta

ENCUESTA PARA LA PRODUCCIÓN DE HUEVO

Nombre de la granja: _____	
Localización: _____	
Fecha: _____ - _____ - _____	Nº de encuesta: _____

I. PRODUCTIVIDAD DE LAS AVES	
	Respuestas
Número de ponedoras por parvada (ciclo productivo)	
Número de semanas que dura la parvada productiva	
Producción de huevo por parvada o ciclo productivo (kg)	
Cama de aserrín (o equivalente) que se usa para la limpieza. ¿Cuánto se requiere por parvada o ciclo?	
¿Cuánto se genera/desecha de gallinaza? ¿Qué se hace con ella?	
Mortalidad (porcentaje o número) estimado por parvada	
Comentarios:	

II. INFRAESTRUCTURA	
IIa. De la caseta	
	Respuestas
Tipo de construcción de la caseta (techado, cortina, etc.)	
Dimensiones de las casetas (tamaño)	
Capacidad de gallinas ponedoras por caseta	
Comentarios:	

Ilb. Iluminación					
Número de lámparas por caseta	Tipo de lámpara	Marca comercial	Watts consumidos/lámpara	Horas de uso/semana/lámpara	Edad del ave (semanas)
Comentarios:					

Ilc. Ventilación					
Equipo utilizado	Cantidad de equipos por caseta	Marca	Watts consumidos/equipo	Horas de uso/semana/equipo	Edad del ave (semanas)
Comentarios:					

Ild. Extracción					
Equipo utilizado	Cantidad de equipos por caseta	Marca	Watts consumidos/equipo	Horas de uso/semana/equipo	Edad del ave (semanas)
Comentarios:					

Ile. Calefacción					
Equipo utilizado (marca)	Cantidad de equipos por caseta	Tipo de combustible (gas, eléctrico, etc.)	Watts consumidos /equipo	Horas de uso/semana /equipo	Edad del ave (semanas)
Comentarios:					

IIf. Alimentación				
¿Se realiza manual o automáticamente?				
¿Cantidad de alimento suministrado en kg/ciclo productivo?				
Tipo de equipo utilizado (marca)	Número de equipos por caseta	Watts consumidos /equipo	Horas de uso/semana /equipo	Edad del ave (semanas)
Comentarios:				

IIfg. Consumo de agua					
¿Se dispensa automáticamente?					
¿Cuánta agua se dispensa? (día, semana, ciclo, etc.)					
Tipo de bomba utilizada (marca)	Capacidad (hp)	Watts consumidos /bomba	Numero de bombas /caseta	Frecuencia de uso	Edad del ave (semanas)

III. EMBALAJE DE HUEVO	
	Respuestas
Manual o automático	
De ser automático: ¿Qué equipo se utiliza?	
Consumo del equipo (Watts)	
Frecuencia de uso:	
Comentarios:	
IV. OTROS	
<p>¿Utiliza algún tipo de combustible fósil? ¿Para qué? (Anotar cantidades)</p> <p> <input type="checkbox"/> Gas L.P. <input type="checkbox"/> Diésel <input type="checkbox"/> Gas natural <input type="checkbox"/> Combustóleo <input type="checkbox"/> Otro (especificar) </p> <p>Comentarios:</p>	

ANEXO III

Factores de emisión para el cálculo de GEI por quemado de combustibles

Tabla II.1. Factores de emisión propuestos para el cálculo de emisiones de GEI
(IPCC, 2013).

Combustible	CO₂ (kg CO₂/TJ)	CH₄ (kg CH₄/TJ)	N₂O (kg N₂O /TJ)
Carbón	94600	1	1.5
Diésel	74100	3	0.6
Combustóleo	77400	3	0.6
Gas Natural	56100	1	0.1
Gas L.P.	63100	1	0.1

ANEXO III

Cálculo de la demanda energética

→ **Estimación de la demanda energética para los equipos:**

$$\begin{aligned}
 & \text{No. de equipos} * \text{Potencia (kW)} * \text{Periodo de uso} \left(\frac{h}{\text{semana}} \right) \\
 & = \text{Demanda energética en una semana (kWh)}
 \end{aligned}$$

→ **Estimación de la demanda energética para el periodo de cada etapa y para el proceso:**

$$\begin{aligned}
 & \text{Demanda energética en una semana (kWh)} * \text{Periodo de la etapa (semanas)} \\
 & = \text{Energía de la etapa (kWh)}
 \end{aligned}$$

$$\text{Energía del proceso} = \sum \text{Energía de las etapas (kWh)}$$

→ **Estimación de la demanda energética para 1000 aves al día**

$$\begin{aligned}
 & \text{Energía total de la etapa} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{semana}} \right) * \text{No. de días de la etapa} \left(\frac{\text{semana}}{7 \text{ días}} \right) \\
 & = \text{Energía} \left(\frac{\text{kWh}}{\text{día}} \right)
 \end{aligned}$$

$$\text{Energía} \frac{\text{kWh}}{\text{día}} \div \text{No. aves en la etapa} = \text{Energía} \frac{\text{kWh}}{\text{ave} \cdot \text{día}}$$

$$\text{Energía} \frac{\text{kWh}}{\text{ave} \cdot \text{día}} * 1000 \text{ aves} = \text{Tasa} \left(\frac{\text{kWh}}{1000 \text{ ave} \cdot \text{día}} \right)$$

Tabla III.1. Resultados del cálculo para la demanda energética en cada etapa del proceso de producción de huevo de la granja “Laguna Colorada”.

Equipo	Número de equipos	Potencia del equipo (kW)	Horas de uso (h/semana)	Total del periodo (kWh)	Tasa $\frac{Wh}{1000 \text{ ave} \cdot \text{día}}$
Etapa de cría (Periodo: 6 semanas)					
Carro automático para dispensar alimento	4	0.373	7	63	1.2
Bomba para dispensar agua	1	2.984	6	107	2.1
Focos fluorescentes	125	0.009	86	581	11.6
Extractores de aire	14	1.119	32	3,008	59.6
Calentador	8	0.066	12	38	0.7
Total de la etapa de cría				3,797	75.2
Etapa de desarrollo (Periodo: 10 semanas)					
Bomba para dispensar agua	1	2.984	6	179	10.7
Focos fluorescentes	144	0.009	7	91	5.4
Total de una caseta				270	16.1
Total de la etapa de desarrollo				810	16.1
Etapa de postura (Periodo: 60 semanas)					
Motor para llenado de carro de alimentos	1	1.119	7	470	28.1
Bomba para agua	1	2.984	6	1,074	64.3
Focos fluorescentes	120	0.009	28	1,814	108.6
Total de una caseta				3,358	201
Total de la etapa de postura				10,74	201
Total del proceso				14,681	292

ANEXO IV

Cálculo de la exergía física (equipos con consumo de energía eléctrica)

→ **Requerimientos para el cálculo de la exergía física**

Tabla IV.1. Requerimientos para el cálculo de la exergía física de los focos fluorescentes en la etapa de postura de las aves.

Potencia	Tiempo de uso	Eficiencia energética (Fb)	Factor de potencia de energía eléctrica	Voltaje de la corriente eléctrica	Intensidad de la corriente eléctrica	Temperatura ambiental y de caseta
kW	h/semana	%	%	Volts	Amperes	°C
0.009	28	7.4	90	115	0.078	$T_0 = 23.1$ $T = 21.92$

→ **Ejemplo del cálculo de la exergía física aplicado a los focos fluorescentes**

1° Cálculo de la potencia aparente del equipo:

$$S_1 = V * I$$

$$S_1 = 115(V) * 0.078(A)$$

$$S_1 = 9 W$$

2° Cálculo de la potencia activa del equipo:

$$P_1 = S_1 * FP$$

$$P_1 = 9(W) * 0.9$$

$$P_1 = 8.1 W$$

3° Cálculo del flujo de exergía a la entrada (flujo 1) a los focos fluorescentes

$$b_1 = \int_{T_0}^{T_f} P_1 dt$$

$$b_1 = P_1 * \int \Delta T * dt$$

$$b_1 = 8.1(W) * 1.18(^{\circ}C) * 28 \left(\frac{h}{semanas} \right)$$

$$b_1 = 267.24 \frac{Wh}{semana}$$

$$b_1 = 267.24 \left(\frac{Wh}{semana} \right) * 60 (semanas) = 16,034 \frac{Wh}{ciclo \cdot foco}$$

$$16,034 \left(\frac{Wh}{ciclo \cdot foco} \right) * 120(focos) = 1'924,080 \frac{Wh}{ciclo}$$

$$1'924,080 \frac{Wh}{ciclo} * \left(\frac{1 kWh}{1000 Wh} \right) = 1,924.08 \frac{kWh}{ciclo}$$

4° Cálculo de P_2 :

$$P_2 = P_1 * Fb$$

$$P_2 = 8.1 (W) * 0.074$$

$$P_2 = 0.6 W$$

5° Cálculo de la exergía a la salida (flujo 2) de los focos fluorescentes

$$b_2 = \int_{T_0}^{T_f} P_2 dt$$

$$b_2 = P_2 * \int \Delta T * dt$$

$$b_2 = 0.6(W) * 1.18(^{\circ}C) * 28 \left(\frac{h}{semanas} \right)$$

$$b_2 = 22.02 \frac{Wh}{semana}$$

$$b_2 = 22.02 \left(\frac{Wh}{semana} \right) * 60 (semanas) = 1,321.2 \frac{Wh}{ciclo \cdot foco}$$

$$1,321.2 \left(\frac{Wh}{ciclo \cdot foco} \right) * 120 (focos) = 158,544 \frac{Wh}{ciclo}$$

$$158,544 \frac{Wh}{ciclo} * \left(\frac{1 kWh}{1000 Wh} \right) = 158.5 \frac{kWh}{ciclo}$$

6° Cálculo de la pérdida exergética

$$b_3 = b_1 - b_2$$

$$b_3 = 1,924.08 \left(\frac{kWh}{ciclo} \right) - 158.5 \left(\frac{kWh}{ciclo} \right)$$

$$b_3 = 1765.6 \left(\frac{kWh}{ciclo} \right)$$

7° Cálculo del rendimiento exergético:

$$\eta = \frac{b_2}{b_1} * 100 = 8.23\%$$

$$\eta = \frac{158.5 \left(\frac{kWh}{ciclo} \right)}{1,924.08 \left(\frac{kWh}{ciclo} \right)} * 100$$

$$\eta = 8.2 \%$$

ANEXO V

Cálculo de entalpías para las condiciones de la casetta de cría

Tabla V.1. Propiedades de gas ideal para el aire (Moran & Shapiro, 2004).

T (K)	<i>h</i> (kJ/kg)	<i>u</i> (kJ/kg)	<i>s</i>^o (kJ/kg·K)
290	290.16	206.91	1.66802
295	295.17	210.49	1.68515
300	300.19	214.07	1.70203
305	305.22	217.67	1.71865
310	310.24	221.25	1.73498

Tabla V.2. Temperaturas para la caseta de cría.

	°C	K
T₀	23.1	296.1
T	31.46	304.46

→ Interpolación de los valores de entalpías a las temperaturas de la caseta de cría.

$$\frac{h_1 - 295.17}{296.1 - 295} = \frac{300.19 - 295.17}{300 - 295}$$

$$h_1 = 296.27 \frac{kJ}{kg} = 2051.37 \frac{cal}{mol}$$

$$\frac{h_2 - 300.14}{304.46 - 300} = \frac{305.22 - 300.14}{305 - 300}$$

$$h_2 = 304.72 \frac{kJ}{kg} = 2109.88 \frac{cal}{mol}$$

ANEXO VI

Cálculo de la exergía química

→ **Requerimientos para el cálculo de la exergía química**

Tabla VI.1. Requerimientos para el cálculo de la exergía química del calentador a gas L.P. en la etapa de cría de las aves.

No. de equipos	Tiempo de uso	Densidad del aire	Velocidad del aire	Área por el paso del aire	Temperatura ambiental y de caseta	Entalpías ambiental y de caseta
	h/semana	kg/m ³	km/h	m ²	°C	cal/mol
8	12	1.205	11	47.39	T ₀ = 23.1 T = 31.46	h ₁ = 2,051.37 h ₂ = 2109.88

→ **Ejemplo del cálculo de la exergía química para el calentados a gas L.P.**

1° Cálculo del flujo de másico de entrada al calentador

$$\dot{m} = \rho * V * A$$

$$\dot{m} = 1.205 \left(\frac{kg}{m^3} \right) * 11,000 \left(\frac{m}{h} \right) * 47.39(m^2)$$

$$\dot{m} = 628,239.28 \frac{kg}{h}$$

$$\frac{628,239.28 \left(\frac{kg}{h} \right)}{0.02897 \left(\frac{mol \text{ de aire}}{kg} \right)} = 21'685,857.1 \frac{mol}{h}$$

$$21'685,857.1 \left(\frac{mol}{h} \right) * 12 \left(\frac{h}{semana} \right)$$

$$\dot{m} = 260'230,285.1 \frac{mol}{h} \cdot semana$$

2° Cálculo del flujo de calor

$$\dot{m}_1 h_1 + Q = \dot{m}_2 h_2$$

- Considerando $\dot{m}_1 = \dot{m}_2$:

$$Q = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

$$Q = 260'230,285.1 \left(\frac{\text{mol}}{\text{h}} \right) * \left(2109.88 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right) - 2051.37 \left(\frac{\text{cal}}{\text{mol}} \right) \right)$$

$$Q = 15226074031 \frac{\text{cal}}{\text{h}}$$

$$\frac{15'226,074,031 \left(\frac{\text{cal}}{\text{h}} \right)}{860,420.65 \left(\frac{\text{cal}}{\text{h}} \right)} = 17,696.08 \text{ kWh}$$

$$Q_{\text{Total}} = 17,696.08 \text{ (kWh)} * 8 \text{ calentadores} * 6 \text{ (semanas)} = 849,411.8 \frac{\text{kWh}}{\text{ciclo}}$$

3° Cálculo de la exergía del flujo de calor para los calentadores a gas L.P.

$$b_Q = Q * \left(1 - \frac{T_0}{T} \right)$$

- Con la suposición de $b_1 = 0$:

$$b_2 = b_Q$$

$$b_{Q_{\text{Total}}} = 849,411.8 \left(\frac{\text{kWh}}{\text{ciclo}} \right) * \left(1 - \frac{296.25}{304.61} \right)$$

$$b_{Q_{\text{Total}}} = 23,323.5 \text{ kWh}$$

4° Cálculo del rendimiento exergético de los calentadores

$$\eta = \frac{b_Q}{Q} * 100$$

$$\eta = \frac{23,323.5 \text{ (kWh)}}{849,411.8 \text{ (kWh)}} * 100$$

$$\eta = 2.75 \%$$

ANEXO VIII

Balance general de exergía para la granja

→ Cálculo de la eficiencia exergética total de la granja

1° Cálculo de la exergía de entrada (b_1) en la granja:

$$\sum b_1 = 37,701 \text{ kWh}$$

2° Cálculo de la exergía de salida (b_2) en la granja:

$$\sum b_2 = 20,088 \text{ kWh}$$

3° Cálculo de la eficiencia exergética del proceso:

$$\eta = \frac{b_{2\text{total}}}{b_{1\text{total}}} * 100$$

$$\eta = \frac{20,088 \text{ kWh}}{37,701 \text{ kWh}} * 100$$

$$\eta = 53.28 \%$$

Tabla VII.1. Exergía para la granja “Laguna Colorada” por cada equipo en un ciclo productivo de 76 semanas.

Equipo	Exergía de entrada			Exergía de salida			Exergía perdida			Eficiencia del equipo (%)
	(b ₁)			(b ₂)			(b ₃)			
	(kWh)	$\left(\frac{Wh}{1000 \text{ ave} \cdot \text{día}}\right)$	$\left(\frac{kWh}{\text{ton de huevo}}\right)$	(kWh)	$\left(\frac{Wh}{1000 \text{ ave} \cdot \text{día}}\right)$	$\left(\frac{Wh}{\text{kg de huevo}}\right)$	(kWh)	$\left(\frac{Wh}{1000 \text{ ave} \cdot \text{día}}\right)$	$\left(\frac{Wh}{\text{kg de huevo}}\right)$	
Carro dispensador de alimento (automático)	890	17.6	0.49	751	14.9	0.41	138	2.8	0.07	84.4
Motor para el llenado del carro de alimento	942	18.8	0.52	879	17.5	0.48	63	1.3	0.03	93.3
Bomba para dispensar agua	826	16.5	0.45	624	12.5	0.35	202	4.0	0.11	75.5
Focos (fluorescentes)	10709	213.7	5.95	881	17.6	0.48	9828	196.2	5.46	8.2
Extractor de aire	24334	428.7	13.52	16953	336.3	9.42	7381	146.4	4.10	69.6
Calentador	0	0	0	23324	462.7	12.95	23324	462.7	12.95	2.7
Total de la granja	37701	749.4	20.9	20088	398.8	11.2	17612	350.6	9.8	53.3

