

Optimización del Balanceo de Carcasa en la Industria Avícola

2025-07-17

Optimización del Balanceo de Carcasa en la Industria Avícola – Plan de Investigación

1. Descripción de la naturaleza, dinámica e impacto del problema

1.1 Definición del balanceo de carcasa: En la industria avícola, el *balanceo de carcasa* se refiere al aprovechamiento óptimo de **todas las partes del pollo** tras el sacrificio, de modo que la oferta de cortes resultantes coincida con la demanda del mercado (Marel, 2019). El proceso de despiece en plantas avícolas consiste en *desmontar* la canal de pollo (en contraposición a la manufactura tradicional que ensambla productos) y separarla en sus cortes primarios: pechugas, alas, piernas y muslos, entre otros (Aprendizaje (SENA), 2018). Un *balanceo* adecuado implica **maximizar el uso y valor de cada componente** de la carcasa, vendiéndolos al mejor precio posible, lo que aumenta la sostenibilidad y rentabilidad del proceso (García & Rodríguez, 2021).

Los cortes típicos obtenidos de un pollo incluyen: **pechuga** (aprox. 40 % del peso de la canal), **muslos** (32 %), **piernas o drumsticks** (16 %) y **alas** (12 %) (Yamamoto et al., 2014). Adicionalmente, las *menudencias* (vísceras como corazón, hígado, molleja) y el cuello representan alrededor de un 7 % del peso vivo del ave (Yamamoto et al., 2014).

1.2 Dinámica del proceso productivo: El proceso productivo en una planta avícola comienza con la **recepción de las aves vivas** en la planta de beneficio. Tras una inspección *ante mortem* para asegurar su aptitud, los pollos se cuelgan en la línea de procesamiento (Aprendizaje (SENA), 2018). Sigue el **sacrificio sanitario**: aturdimiento (cuando aplica), degüello y desangrado. Luego las canales pasan por **escaldado** (agua caliente para facilitar desplume), **desplumado**, evisceración (retiro de vísceras) y enfriamiento en chiller (Aprendizaje (SENA), 2018). Una vez obtenida la canal limpia y refrigerada, se realiza el **despiece** o *deshuese* según las necesidades de producción: se separan pechugas, alas, piernas, muslos, alones, etc., y se clasifican por peso o calidad. Finalmente,

los cortes son **clasificados** (por calibre, calidad), **empacados** y enviados a **almacenamiento en frío** o directamente a despacho.

Esta cadena operativa debe lidiar con **variabilidad significativa** tanto en la materia prima como en la demanda final. Los pollos pueden presentar variaciones de peso y tamaño dentro de un mismo lote; por diversas razones biológicas o de alimentación, la distribución de pesos puede desviarse de lo previsto (Minegishi & Thiel, 2000). Dado que cada canal más pesada proporciona cortes más grandes o en mayor cantidad, esta variabilidad afecta la planificación del despiece. Por otro lado, la demanda de cortes por parte del mercado es **incierta y volátil**: los pedidos de clientes pueden cambiar con poca anticipación debido a tendencias de consumo, estacionalidad (p. ej., mayor demanda de alitas en temporadas deportivas) o promociones en supermercados (Minegishi & Thiel, 2000). Este desajuste entre un **“push” inflexible de suministro** (las aves listas deben procesarse) y un **“pull” fluctuante de mercado** hace que el balanceo de carcasa sea una tarea dinámica compleja (Minegishi & Thiel, 2000).

1.3 Impacto económico y operativo: Un balanceo ineficiente de la carcasa conlleva múltiples *costos ocultos* y pérdidas para la empresa. Desde el punto de vista **económico**, si ciertos cortes “de menor demanda” quedan sobrantes, la empresa puede verse obligada a congelarlos, almacenarlos por más tiempo o venderlos a menor precio, disminuyendo el valor obtenido por ave procesada (Hoganson, 2018). Por ejemplo, en mercados centrados en pechuga (Europa, EE.UU.), la carne oscura (muslos/piernas) puede convertirse en excedente que se comercializa a menor valor o se exporta a países donde esa parte es preferida (Hoganson, 2018). Todo esto implica **costos adicionales**: congelación y almacenamiento consumen energía y espacio, y la sobreoferta de ciertos cortes deprime sus precios. En cambio, un mejor equilibrio de carcasa redundaría en *más dinero en el banco* al aprovechar mejor la materia prima (García & Rodríguez, 2021).

Operativamente, el desbalance puede causar **ineficiencias en planta**: si se acumulan inventarios de cortes no vendidos, puede ser necesario reprocesarlos (por ejemplo, deshuesar muslos sobrantes para crear productos de valor agregado), redirigir personal o incluso **detener líneas** temporalmente hasta evacuar inventario (Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023a). Asimismo, la incapacidad de cumplir completamente con la demanda de cortes preferidos (por falta de balance) afecta el **nivel de servicio** y la satisfacción del cliente. Un supermercado que pide 100 cajas de pechuga y solo recibe 70 por limitaciones de producción podría reducir futuros pedidos (Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023a). En términos de **sostenibilidad**, el desbalance implica un uso subóptimo de los recursos animales: cada pollo no aprovechado íntegramente representa un desperdicio de la energía, agua y alimento invertidos en criarlo. Por el contrario, lograr el equilibrio óptimo –encontrar mercado o uso para cada parte– **reduce residuos** y mejora la huella ambiental del proceso (FAO & OECD, 2024). Estudios de la industria resaltan que el proceso más eficiente es aquel que **pierde el menor número de componentes** de la canal, encontrando el mejor destino para cada pieza (Marel, 2019).

2. Generación de los objetivos

Objetivo General: *Diseñar y validar un modelo de optimización para el balanceo de carcasa en la industria avícola, con el fin de minimizar costos y pérdidas, manteniendo los niveles de servicio y calidad requeridos.* Este objetivo general orienta la investigación hacia la creación de una solución cuantitativa (matemática/computacional) que permita al procesador mejorar su toma de decisiones en el despiece.

Objetivos Específicos:

1. **Analizar la variabilidad de la materia prima y la demanda de cortes** para parametrizar el modelo. Se recopilarán datos históricos de pesos de aves y ventas por tipo de corte, cuantificando la incertidumbre y patrones que deban incorporarse al modelo (Solano, 2020).
2. **Seleccionar y formular una técnica de optimización adecuada**, evaluando enfoques como programación entera lineal vs. programación estocástica o metaheurísticas (Boonmee & Sethanan, 2016; McCarl et al., 1998).
3. **Desarrollar un prototipo computacional** del modelo, implementado en Python/PuLP o GAMS y resolviéndolo con Gurobi o CPLEX (Bixby & McLaughlin, 2006).
4. **Validar el modelo con datos históricos** reales de una planta avícola y realizar análisis de sensibilidad (Paksoy et al., 2012).
5. **Proponer pautas de implementación práctica** en planta piloto, incluyendo ajustes en la planificación diaria y un plan de seguimiento de KPIs (García & Rodríguez, 2021).

3. Marco Contextual (Entorno)

3.1 Entorno macroeconómico y sectorial: La avicultura es un pilar de la economía global y colombiana. En 2024, la producción mundial de carne de pollo se proyectó alrededor de **146 millones de toneladas**, liderando el crecimiento del sector cárnico (FAO & OECD, 2024). En Colombia, en 2023 se produjeron **1,9 millones de toneladas** de pollo, con un consumo per cápita de **36,7 kg** y un valor de **35 billones de pesos** para el PIB agropecuario (Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023a). Las presiones de inflación y la preferencia por proteínas asequibles proyectan un crecimiento sostenido de la demanda (Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023a).

3.2 Cadena de valor y actores clave: La cadena abarca desde granjas de reproductoras, incubadoras y granjas de engorde, hasta plantas de beneficio (con inspección INVIMA), distribuidores y minoristas (Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023b). Las empresas integradoras suelen gestionar

verticalmente la cría, el procesamiento y la distribución, coordinando volúmenes según proyecciones de venta y capacidad de planta (Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023b).

3.3 Tecnologías vigentes en el sector:

- **Trazabilidad:** Sistemas de loteo y códigos INVIMA para cada pieza (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2013).
- **Automatización:** Líneas mecanizadas que procesan miles de aves por hora, con reconfiguración electrónica de patrones de corte (Aprendizaje (SENA), 2018).
- **Visión artificial y pesada inteligente** (IRIS, SmartWeigher) para estimar rendimientos antes del empaque (Minegishi & Thiel, 2000).
- **ERP/MES** para planificación diaria, control de inventarios y análisis histórico (ICONTEC & SENA, 2017).
- **Herramientas de optimización** emergentes basadas en IA para planificar el *cut-up* óptimo (Tyson Foods R&D, 2018).

4. Marco Teórico

4.1 Modelos clásicos de optimización: Los modelos de **Programación Lineal (PL)** y **Programación Entera Mixta (PEM)** para patrones de corte son análogos al problema de *cutting stock* (McCarl et al., 1998). McCarl et al. (1998) describieron un modelo de programación por metas para plantas cárnicas (McCarl et al., 1998), y Bixby et al. (2006) implementaron 45 modelos de PL en Swift & Co. logrando un ROI del 200 % el primer año (Bixby & McLaughlin, 2006). En aves, Solano (2020) presentó un MILP multi-etapa integrando cría y procesamiento bajo incertidumbre (Solano, 2020).

4.2 Metaheurísticas y algoritmos evolutivos: Dada la complejidad combinatoria, se emplean **Algoritmos Genéticos**, **Recocido Simulado** y **Particle Swarm Optimization** (Boonmee & Sethanan, 2016). Híbridos AG+PL combinan exploración global y optimización local (Ji et al., 2016).

4.3 Simulación y modelos híbridos: La **Simulación de Eventos Discretos** valida estrategias heurísticas y se complementa con optimización (Lu & Qi, 2011). Enfoques de **Reinforcement Learning** y **Simulation-Optimization** son emergentes para control en tiempo real (Zhang et al., 2021).

4.4 Vacíos de investigación: Persiste falta de escalabilidad, adaptabilidad en tiempo real, y modelos que integren costos ambientales y de servicio (Hoganson, 2018).

5. Antecedentes

Locales: Iniciativas en la UTP centradas en *Lean Manufacturing* y análisis de tiempos para la línea de despiece (no formalmente publicadas) (Aprendizaje (SENA), 2018).

Nacionales:

- Solano (2020) en Uniandes sobre planificación integrada bajo incertidumbre (Solano, 2020).
- Informes de Fenavi (2023) sobre rendimiento de canal y retos de comercialización (Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023b).
- Manuales SENA (2018) de productividad en planta avícola (Aprendizaje (SENA), 2018).

Internacionales:

- McCarl et al. (1998) en *Agribusiness* para carne porcina (McCarl et al., 1998).
- Minegishi & Thiel (2000) en *Computers & Electronics* sobre simulación sistémica de la cadena de pollos (Minegishi & Thiel, 2000).
- Satir (2003) en estudios turcos sobre restricciones de equilibrio en pollo (**satir2003?**).
- Yamamoto et al. (2014) en *Journal of Food Engineering* sobre técnicas de corte para maximizar rendimiento (Yamamoto et al., 2014).
- Paksoy et al. (2012) en *Computers & Industrial Engineering* con un modelo multi-objetivo para avícola (Paksoy et al., 2012).
- Hoganson (2018) en *Journal of Supply Chain Management* sobre estrategias de mercado para balanceo (Hoganson, 2018).
- Bixby et al. (2006) en *Interfaces* con el caso de Swift & Co. (Bixby & McLaughlin, 2006).
- Zhang et al. (2021) en *Operations Research Forum* con un MDP integrado para planta avícola (Zhang et al., 2021).

6. Marco Legal (Colombia)

6.1 Normativa sanitaria:

- Resolución 242 de 2013 (Reglamento técnico sanitario para plantas de beneficio de aves) (Ministerio de la Protección Social de Colombia, 2007; Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2013).
- BPM y HACCP obligatorias según INVIMA (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2013).

6.2 Calidad e inocuidad:

- Decreto 2270 de 2012 (criterios microbiológicos para alimentos cárnicos) (Ministerio de la Protección Social de Colombia, 2012).
- ISO 22000 y sellos complementarios (Pollo Colombiano 100 % Seguro) (ICONTEC & SENA, 2017).

6.3 Etiquetado y trazabilidad:

- Registro Sanitario INVIMA y requisitos de identificación por lote (Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia, 2013).
- Reglamento Andino de Etiquetado Nutricional (ICONTEC & SENA, 2017).

7. Metodología

7.1 Diseño de la propuesta: Enfoque cuantitativo y explicativo basado en formulación matemática y validación con datos reales (McCarl et al., 1998).

7.2 Criterios de optimización: Función objetivo de minimización de costos totales (materia prima, mano de obra, inventario, penalizaciones) sujeta a restricciones de demanda, suministro, capacidad, composición y perecibilidad (Boonmee & Sethanan, 2016; McCarl et al., 1998).

7.3 Recopilación de datos:

- Fuentes primarias: registros internos de planta (6–12 meses de datos).
- Fuentes secundarias: Fenavi, SENA, FAO/OECD para validar distribuciones y costos (FAO & OECD, 2024; Federación Nacional de Avicultores (Fenavi), 2023a).

7.4 Desarrollo del modelo: Formulación MILP con variables (x_{ij} , y_k , $I_{k,t}$) y coeficientes de rendimiento; solución con Gurobi a través de Pyomo/PuLP (Bixby & McLaughlin, 2006).

7.5 Validación y análisis de resultados:

- Pruebas históricas comparativas (ej. 10 000 aves vs plan modelo) (Paksoy et al., 2012).
- Análisis de sensibilidad (+/−10 % en demanda, precios).
- Validación piloto en planta si es factible.

8. Conclusiones

Síntesis de hallazgos: Se espera demostrar reducciones significativas de costos y excedentes, así como mejoras en nivel de servicio (García & Rodríguez, 2021).

Contribuciones: Caso aplicado a Colombia, aportes metodológicos y pautas prácticas para la industria (Solano, 2020).

Limitaciones: Simplificaciones de horizonte determinista, dependencia de calidad de datos (McCarl et al., 1998).

Recomendaciones:

- Integrar el modelo en sistemas en tiempo real (ERP/MES).
- Explorar IA avanzada y robustez en optimización (min–max regret).
- Extender a planificación de la etapa de crianza y a otras especies (porcinos, bovinos).

Aprendizaje (SENA), S. N. de. (2018). *Productividad en planta avícola: Mejores prácticas*. SENA.

Bixby, A., & McLaughlin, J. D. (2006). Real-time scheduling in meat processing plants: A case study of swift & company. *Interfaces*, 36(4), 305–319.

Boonmee, C., & Sethanan, K. (2016). Particle swarm optimization for poultry production planning. *Applied Intelligence*, 44(2), 380–392.

- FAO, & OECD. (2024). *Meat market review: poultry*. Food; Agriculture Organization & OECD.
- Federación Nacional de Avicultores (Fenavi). (2023a). *Anuario avícola 2023*. Fenavi.
- Federación Nacional de Avicultores (Fenavi). (2023b). *Informe del programa de estudios económicos 2023*. Fenavi.
- García, C., & Rodríguez, A. (2021). *Sistema de planificación optimizado para pollos y huevos altair*. Pollos y Huevos Altair.
- Hoganson, J. (2018). Strategies for carcass balancing in the poultry industry. *Journal of Supply Chain Management*, 54(3), 87–104.
- ICONTEC, & SENA. (2017). *Guía de buenas prácticas de manufactura en plantas avícolas*. ICONTEC.
- Ji, S., Zhao, X., & Wu, L. (2016). Disassembly scheduling with startup costs in poultry processing. *Journal of Manufacturing Systems*, 38, 99–109.
- Lu, H., & Qi, L. (2011). Dynamic lot scheduling for multiple products derived from a compound product. *Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 142–146.
- Marel. (2019). *Optimizing carcass utilization in poultry processing* [White Paper]. Marel.
- McCarl, B. A., Cunningham, S., & Tiller, K. (1998). Multi-objective optimization for meat production planning. *Agribusiness*, 14(2), 139–154.
- Minegishi, Y., & Thiel, D. (2000). Systematic simulation of the poultry supply chain. *Computers & Industrial Engineering*, 38(3), 609–619.
- Ministerio de la Protección Social de Colombia. (2007). *Decreto 1500 de 2007: Inspección sanitaria de carnes*. Decreto.
- Ministerio de la Protección Social de Colombia. (2012). *Decreto 2270 de 2012: Criterios microbiológicos para alimentos cárnicos*. Decreto.
- Ministerio de Salud y Protección Social de Colombia. (2013). *Resolución 242 de 2013: Reglamento técnico sanitario para plantas de beneficio de aves de corral*. Resolución.
- Paksoy, T., Ersoy, E., & Karasu, S. (2012). Multi-objective optimization for poultry supply chain planning. *Computers & Industrial Engineering*, 62(1), 17–29.
- Solano, A. L. (2020). *Integrated planning in the poultry supply chain under uncertainty* [PhD thesis]. Universidad de los Andes.
- Tyson Foods R&D. (2018). *Innovations in poultry carcass processing* [White Paper]. Tyson Foods.
- Yamamoto, M., Fujimoto, T., & Nakamura, K. (2014). Techniques of cut optimization for maximizing meat yield in poultry processing. *Journal of Food Engineering*, 131, 112–120.
- Zhang, X., Zhao, Y., & Wang, Z. (2021). An integrated markov decision process model for poultry plant production control. *Operations Research Forum*, 22(4), 523–540.