

ARTÍCULO TÉCNICO-CIENTÍFICO

Pasteurización del huevo dentro de su cáscara

De la ingeniería térmica clásica a las plataformas multibarrera y el control digital de precisión

Análisis académico, técnico, científico, regulatorio e industrial de una tecnología destinada a conciliar seguridad microbiológica, funcionalidad gastronómica y viabilidad comercial

José M. López, BSc, MD, PhD

Resumen

La pasteurización del huevo íntegro dentro de su propia cáscara representa una de las expresiones más exigentes de la ingeniería térmica aplicada a alimentos de origen animal. La dificultad no reside en demostrar que *Salmonella* puede ser inactivada por calor, sino en conseguir una reducción microbiológica validada en el compartimento interno del huevo sin atravesar la estrecha frontera de desnaturalización que modifica de manera irreversible la albúmina, la membrana vitelina y el comportamiento culinario de la yema. El problema se agrava porque el huevo no es una unidad geométrica ni composicional uniforme: masa, temperatura inicial, edad post-puesta, cámara de aire, proporción yema-albúmina, viscosidad, posición de la yema, integridad de cáscara, cutícula y condiciones hidrodinámicas alteran la transferencia de calor. Este artículo revisa la base microbiológica, fisicoquímica y de ingeniería de la pasteurización en cáscara; distingue los elementos tecnológicamente demostrados de aquellos que son plausibles, posibles pero no necesarios, o científicamente insuficientes; analiza la radiofrecuencia, las intervenciones de superficie, los sistemas multibarrera, el modelado del punto frío y la incorporación prudente de espectroscopia NIR, gemelos digitales y aprendizaje automático; y examina los retos de validación, regulación y comercialización en la Unión Europea y, particularmente, en el contexto español. La tesis central es que la ventaja competitiva de esta categoría no puede descansar en un baño térmico genérico ni en un desinfectante de cáscara, sino en la integración de clasificación de materia prima, historia térmica completa, validación frente a *Salmonella Enteritidis*, control de recontaminación, preservación funcional, trazabilidad y conocimiento transferible de proceso. La pasteurización en cáscara no debe presentarse como esterilización ni como riesgo microbiológico cero; sí puede, correctamente diseñada y validada, constituir una plataforma de alto valor para restauración, industria del huevo y gastronomía de precisión.

Palabras clave: huevo en cáscara; pasteurización; *Salmonella Enteritidis*; letalidad térmica; punto frío; albúmina; radiofrecuencia; tecnología de barreras; gemelo digital; HORECA; regulación alimentaria.

1. Introducción: una tecnología antigua que vuelve a ser estratégicamente nueva

La idea de pasteurizar un huevo sin romper su cáscara no es una invención reciente. Los trabajos publicados en la década de 1990 ya demostraron que podía alcanzarse una reducción intensa de *Salmonella Enteritidis* mediante tratamientos térmicos cuidadosamente controlados, conservando en determinadas condiciones una parte sustancial de la calidad visual y funcional del huevo [14-16]. La existencia de patentes tempranas y de varias líneas académicas confirma que el principio científico pertenece desde hace décadas al estado de la técnica. Sin embargo, confundir antigüedad conceptual con madurez industrial sería un error. El huevo en cáscara sigue siendo una matriz extraordinariamente incómoda para el procesador, pues contiene fases con distinta composición, reología y sensibilidad térmica; posee una geometría biológica variable; y exige que el tratamiento sea suficientemente severo en el lugar donde el microorganismo está mejor protegido, pero suficientemente suave en cualquier otra zona para que la clara no se vuelva opaca, viscosa o parcialmente coagulada.

La renovada atención industrial hacia esta tecnología se explica por la convergencia de cuatro fuerzas. La primera es microbiológica: *Salmonella Enteritidis* mantiene una relación epidemiológica singular con el huevo, precisamente porque puede producirse contaminación interna antes de la formación de la cáscara. La segunda es gastronómica: una parte significativa de la cocina contemporánea sigue valorando yemas fluidas, tortillas poco cuajadas, salsas, espumas, postres y preparaciones en las que el tratamiento térmico final es mínimo o inexistente. La tercera es regulatoria y operativa: los servicios de restauración necesitan sistemas de control más reproducibles que confiar exclusivamente en la habilidad del cocinero para demostrar una combinación tiempo-temperatura en el centro de cada unidad. La cuarta es comercial: el huevo líquido pasteurizado resuelve una parte del riesgo, pero no conserva la unidad anatómica clara-yema ni la experiencia de uso del huevo con cáscara.

Por ello, el interés actual de la pasteurización en cáscara no está en presentar como novedad lo que la ciencia ya describió, sino en industrializarlo con una precisión que hace treinta años era más difícil: sensores de respuesta rápida, adquisición de datos, dinámica de fluidos computacional, espectroscopia no destructiva, control estadístico de proceso y modelos híbridos físico-digitales permiten caracterizar mejor la variabilidad y diseñar procesos menos empíricos [31-34]. El salto potencial es el paso desde una receta térmica fija a una plataforma de proceso basada en clases térmicas de materia prima, límites conservadores del punto frío y validación microbiológica específica.

La cuestión, por tanto, debe formularse correctamente. No se trata de preguntar si un huevo puede pasteurizarse dentro de la cáscara. La respuesta científica es afirmativa. La pregunta industrial es si puede hacerse de forma continua o semicontinua, repetible, económicamente defendible, jurídicamente bien clasificada y con una pérdida funcional lo bastante pequeña como para que el mercado pague por ella. Esa reformulación cambia todo el proyecto de desarrollo.

2. *Salmonella Enteritidis* y la doble geografía microbiológica del huevo

El huevo presenta dos geografías microbiológicas que no deben confundirse: la superficie de la cáscara y el contenido interno. La contaminación externa es más frecuente y puede proceder de deposición fecal, polvo, superficies de puesta, transporte o manipulación. La contaminación interna es menos frecuente, pero reviste una relevancia epidemiológica desproporcionada porque *Salmonella Enteritidis* puede colonizar el ovario y el oviducto e incorporarse a la albúmina o alcanzar posteriormente la yema antes de que la cáscara se haya formado completamente [1,2]. El Comité Científico de AESAN ha calificado la contaminación interna como un fenómeno de baja frecuencia, pero alta relevancia epidemiológica, y ha subrayado que la refrigeración limita el crecimiento, pero no elimina por sí misma la supervivencia del patógeno [1].

Esta distinción tiene una consecuencia metodológica decisiva: la desinfección de la cáscara no equivale a pasteurización del huevo. Un tratamiento superficial puede reducir de forma intensa la carga externa y disminuir la probabilidad de transferencia durante el cascado, pero no demuestra inactivación en yema o albúmina. Del mismo modo, una pasteurización interna correctamente validada no autoriza a ignorar la recontaminación posterior de la cáscara. La seguridad del sistema debe analizarse por compartimentos y rutas de exposición: peligro interno, peligro superficial y ambiente postproceso.

El riesgo del huevo se agrava en operaciones de *pooling*, es decir, cuando muchas unidades se cascan y mezclan en un único recipiente. Una unidad internamente contaminada puede distribuir el microorganismo por una gran masa y multiplicar el número de raciones expuestas. Esta lógica es conocida desde las evaluaciones de riesgo FAO/OMS y EFSA, que han mostrado el peso de las condiciones de almacenamiento, el tiempo y la temperatura en la probabilidad final de enfermedad [11,12]. La pasteurización en cáscara tiene aquí una ventaja conceptual: aplica una intervención antes del cascado y mantiene la individualidad del huevo. Pero esa ventaja sólo existe si el proceso se ha validado en el compartimento interno y si la cadena posterior evita la recontaminación.

Por esta razón, el microorganismo de referencia para el diseño debe seguir siendo *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis*. Otros serotipos y microorganismos pueden tener interés en el plan de higiene, la vida útil o los criterios de proceso, pero el nexo biológico entre *S. Enteritidis* y la contaminación interna del huevo justifica que sea el principal patógeno de desafío. En Estados Unidos, la definición reglamentaria de huevo con cáscara «tratado» exige una tecnología o proceso capaz de alcanzar al menos 5 log de destrucción de *S. Enteritidis* [10]. Ese valor constituye un *benchmark* técnico fuerte y ampliamente utilizado en la literatura, aunque no deba exportarse de forma simplista como si fuera un mínimo jurídico universal de la Unión Europea.

3. El problema físico: pasteurizar un sistema biológico heterogéneo

Desde la perspectiva de ingeniería, un huevo es un objeto de transferencia de calor transitoria con dominios internos de propiedades diferentes. La cáscara y sus membranas delimitan una fase acuosa proteica, la albúmina, que a su vez rodea una yema más rica en lípidos y sólidos. La albúmina no es reológicamente uniforme, esto es, en ella coexisten fracciones densas y fluidas; la cámara de aire cambia con la edad; y la yema no necesariamente permanece en una posición perfectamente central durante el tratamiento. Un modelo que considere el huevo como una esfera homogénea con una única conductividad térmica es útil, como mucho, para una comprobación preliminar de orden de magnitud. No es suficiente para validar un proceso de seguridad.

La trayectoria térmica relevante puede expresarse como $T(x,y,z,t)$: la temperatura depende de la posición y del tiempo. El objetivo no es que el agua o el aire del equipo alcancen una consigna, sino que la región internamente más desfavorable acumule una letalidad suficiente. Los modelos recientes de dinámica de fluidos computacional han situado el punto crítico cerca del centro de la yema bajo determinadas geometrías y condiciones de proceso, y han mostrado la enorme sensibilidad del tiempo necesario a la temperatura del medio [31]. En un estudio de 2025 sobre huevos grandes de 63-72 g, un modelo CFD estimó, para su criterio de reducción de 5 log y sus supuestos, tiempos de calentamiento de aproximadamente 55,1, 37,2, 29,1 y 24,5 minutos a medios de 54, 56, 58 y 60 °C, respectivamente [31]. Estos valores no son recetas transferibles; son una demostración cuantitativa de la no linealidad del problema.

La masa exacta importa. También la temperatura inicial. Un huevo de 55 g a 20 °C y otro de 72 g a 5 °C no pueden considerarse equivalentes porque ambos entren en una categoría comercial de huevo de mesa. La edad post-puesta modifica la cámara de aire y la estructura de la albúmina; la conversión progresiva de ovalbúmina en S-ovalbúmina cambia la estabilidad térmica de la fracción proteica [20]. La viscosidad interna influye en la convección natural. La orientación y el movimiento pueden modificar la posición de la yema y los patrones de transferencia. A escala industrial, la densidad de carga, la geometría de las bandejas, la velocidad del fluido y la uniformidad espacial del medio añaden nuevas fuentes de dispersión.

Por ello, uno de los elementos más probables de cualquier sistema industrial serio es una clasificación previa más estricta que la mera talla comercial. En la práctica, resulta razonable esperar controles de integridad, peso o subclase de masa, temperatura inicial y trazabilidad temporal. También es probable un acondicionamiento de entrada que reduzca la dispersión de T_0 . No es necesario que el fabricante mida individualmente la cámara de aire o la viscosidad de cada huevo; sí necesita demostrar que la variabilidad real de materia prima queda cubierta por las clases y márgenes empleados en la validación.

La letalidad térmica acumulada suele representarse mediante una integral de equivalencia respecto a una temperatura de referencia. En forma general:

$$F_{ref} = \int 10^{[(T(t) - T_{ref})/z]} dt$$

donde F_{ref} es la letalidad equivalente a la temperatura de referencia, $T(t)$ es la historia térmica local y z expresa el incremento de temperatura necesario para modificar en un factor de diez el tiempo de reducción decimal. La aparente sencillez de la ecuación puede inducir a error. T_{ref} y z no son constantes universales de «Salmonella en huevo»: dependen de la cepa, la matriz, la localización, el estado fisiológico y el perfil térmico. La integración tampoco corrige un modelo mal especificado del punto frío. En consecuencia, la cinética publicada debe servir para diseñar y acotar experimentos, no para reemplazar los datos del proceso real.

Un aspecto particularmente importante es que la rampa de calentamiento no es una etapa microbiológicamente neutra. Xu y colaboradores demostraron que un calentamiento más lento durante la fase de subida podía inducir respuestas de estrés en *S. Enteritidis* y aumentar su resistencia a un calentamiento letal posterior; en su trabajo, velocidades aproximadas de 2,4 frente a 3,5 °C/min generaron comportamientos microbiológicos diferentes [22]. La conclusión de ingeniería es profunda: no basta con especificar «mantener a X grados durante Y minutos». El come-up rate, la historia previa y las eventuales paradas o sobrecargas son parámetros críticos de proceso.

El enfriamiento también forma parte de la historia térmica. Un huevo sale del medio caliente con una reserva energética interna considerable; la yema puede continuar recibiendo calor de regiones adyacentes mientras la superficie ya se enfría. El modelo CFD de *Sampanis et al.* estimó que el periodo de enfriamiento contribuía de forma apreciable a la destrucción microbiana total en algunas condiciones [31]. Desde el punto de vista de calidad, sin embargo, la misma inercia puede continuar la desnaturalización de proteínas. Por ello, el *quench* no es una operación logística posterior: es una fase del proceso que debe modelizarse, registrarse y validarse.

4. La frontera proteica: inactivar al patógeno sin cocinar el huevo

La pasteurización en cáscara se desarrolla en una franja térmica incómodamente próxima a las transiciones de varias proteínas del huevo. La clara contiene ovalbúmina, ovotransferrina, ovomucoide, ovomucina, lisozima y otras proteínas con distinta estabilidad. La yema, por su parte, presenta lipoproteínas y estructuras coloidales cuya respuesta al calor determina viscosidad, emulsificación y textura. La desnaturalización no es un interruptor binario. Puede comenzar con cambios conformacionales que todavía no producen un gel visible, continuar con agregación y finalmente formar redes macroscópicas. Un huevo aparentemente «crudo» puede haber sufrido una pérdida funcional importante.

La calorimetría diferencial de barrido ha mostrado que la señal térmica de la clara resulta de la superposición de transiciones asociadas a distintas proteínas, y que el envejecimiento modifica el perfil por cambios como la formación de S-ovalbúmina [20]. La ovotransferrina es comparativamente termolábil y sus interacciones con otras proteínas condicionan la coagulación en el entorno térmico de interés industrial [21]. Esta complejidad explica por qué dos procesos capaces de conseguir una letalidad microbiológica equivalente pueden producir huevos culinariamente distintos.

Los primeros estudios de pasteurización en cáscara demostraron que era posible alcanzar reducciones muy elevadas de *S. Enteritidis* bajo condiciones seleccionadas sin alteraciones visuales o funcionales significativas [14,15]. Sin embargo, la literatura posterior también ha documentado cambios en unidades *Haugh*, turbidez, viscosidad y comportamiento de la albúmina dependiendo de la severidad y duración del tratamiento [18,19,25,30]. Debe diferenciarse, además, la calidad nutricional de la proteína de la funcionalidad tecnológica: *Hank et al.* observaron que un tratamiento térmico prolongado estudiado no afectaba significativamente determinados indicadores de calidad proteica del albumen [18], pero esa conclusión no implica que la espuma, el batido, la turbidez o la percepción gastronómica sean idénticos.

Un programa industrial serio necesita un panel de atributos críticos de calidad, no una inspección visual. Las unidades *Haugh* y la altura de albúmina siguen siendo indicadores clásicos de calidad interna; el índice de yema y la fuerza de la membrana vitelina son relevantes para un huevo frito o para la separación manual; la turbidez puede detectar agregación proteica subvisible; la viscosidad y la reometría informan sobre cambios funcionales; la DSC permite observar la entalpía residual de transiciones; y las pruebas de espumado son esenciales para repostería y aplicaciones aireadas. A ello deben añadirse ensayos culinarios estandarizados, porque la relación entre un parámetro instrumental y el rendimiento en sartén no es perfecta.

La mejor ventana de proceso no será, por tanto, la que maximice la letalidad, sino la que cumpla una restricción microbiológica dura y, dentro de ese espacio seguro, minimice el daño funcional y el coste. Esta forma de plantear la optimización es importante: la calidad es una función objetivo; la seguridad es una restricción. No debe aceptarse un proceso microbiológicamente insuficiente porque produzca una albúmina excelente, ni incrementar la severidad sin límite cuando ya existe un margen de seguridad validado y el daño funcional crece rápidamente.

5. Arquitectura industrial probable: qué cabe esperar de un sistema técnicamente serio

Aunque cada instalación puede emplear equipos y conocimientos propios, existe una arquitectura industrial que resulta altamente probable por la lógica del problema. El proceso comienza con cualificación de materia prima y trazabilidad. Los huevos fisurados, rotos o con defectos relevantes deben ser detectados y separados; la inspección puede ser óptica, mediante *candling*, técnicas acústicas o combinaciones de visión y respuesta mecánica. A continuación, una clasificación de masa más estrecha y el control de temperatura inicial reducen la dispersión térmica. Es igualmente plausible que se definan límites de edad post-puesta o condiciones de almacenamiento previo, no porque cada huevo deba ser idéntico, sino porque la validación necesita un dominio de entrada conocido.

La fase de calentamiento más probable, por madurez y sencillez, sigue siendo un medio térmico de elevada capacidad de transferencia: inmersión en agua caliente, agua circulante o *spray* térmico. El aire húmedo puede emplearse, pero normalmente presenta coeficientes de transferencia inferiores y tiempos más largos. Es plausible una secuencia multietapa con precalentamiento, rampa controlada y fase de mantenimiento; también es plausible reorientar o mover las unidades para reducir gradientes. Lo que no puede afirmarse sin evidencia es que un sistema comercial concreto utilice radiofrecuencia, microondas, calentamiento óhmico o cualquier fuente electromagnética sólo porque el producto final parezca poco afectado.

El control del medio térmico debe combinar temperatura, tiempo y una variable representativa de circulación. La consigna del tanque no demuestra por sí sola la temperatura del huevo. Un proceso validado necesita estudios de distribución térmica, huevos instrumentados en posiciones críticas y un modelo conservador que cubra los extremos de masa, T_0 y carga. No es realista colocar una sonda en cada huevo de producción; la industrialización exige demostrar que un conjunto de parámetros externos y de clasificación predice, con un margen seguro, el comportamiento de la unidad más fría o la más lenta de la clase validada.

Tras la acumulación de letalidad, el enfriamiento rápido es prácticamente inevitable si se pretende conservar la funcionalidad. Un sistema de *quench* mediante agua fría o un circuito equivalente debe dimensionarse para la carga máxima y registrar tanto la temperatura de entrada como la capacidad de recuperación. El error de diseño habitual consiste en validar el calentamiento con una pequeña carga piloto y escalar el número de huevos sin recalcular la potencia frigorífica. La consecuencia puede ser una cola de enfriamiento más lenta que desplaza la calidad proteica sin que el equipo de calentamiento haya cambiado.

Después del enfriamiento aparece una zona higiénicamente crítica: secado, transporte, inspección postproceso y envasado. Un huevo internamente pasteurizado puede adquirir contaminación superficial en una cinta, un rodillo, una bandeja o un aerosol. La cáscara húmeda y la condensación merecen especial atención porque la literatura ha relacionado la condensación con una mayor penetración bacteriana bajo determinadas condiciones [33,34]. De ahí que el secado higiénico y la zonificación ambiental no sean accesorios. La parte final de la línea debe gestionarse como un área post-letal de mayor sensibilidad, con separación de flujos, vigilancia ambiental y criterios de liberación.

En términos de trazabilidad, es razonable esperar que la receta de proceso quede ligada a lote, clase térmica, carga, versión de programa, sensores y desviaciones. Un producto de esta naturaleza no debe liberarse sólo porque el cronómetro haya terminado. La documentación de proceso es parte del producto comercial: sin ella, el fabricante pierde precisamente la ventaja de estandarización que pretende vender a restauración e industria.

6. Elementos posibles, probables e improbables: separar ingeniería de narrativa

Una tecnología con alto atractivo comercial tiende a rodearse de explicaciones incompletas o excesivamente sofisticadas. Conviene, por ello, distinguir lo probable de lo simplemente posible. Es altamente probable que un proceso eficaz dependa de selección de materia prima, control de masa y temperatura inicial, una fase térmica de transferencia intensa, control de circulación, validación del punto frío y enfriamiento rápido. Estos elementos surgen directamente de la física y de la microbiología del sistema. También es probable una inspección de micro-fisuras antes y después del tratamiento, porque una grieta altera simultáneamente integridad, contaminación y transferencia.

Es posible, pero no necesario, que el proceso incorpore varias zonas térmicas, rotación periódica, tratamientos de superficie, recubrimientos postproceso o algoritmos de clasificación avanzada. También es posible un calentamiento híbrido con radiofrecuencia. La literatura demuestra que estas herramientas pueden aportar valor [23-30], pero ninguna de ellas debe inferirse a partir del aspecto de un huevo comercial. La misma huella funcional puede alcanzarse mediante combinaciones diferentes de rampa, temperatura, tiempo y enfriamiento.

Resulta improbable, en cambio, que un sistema industrial robusto se base en una única combinación fija de baño y tiempo aplicada indiscriminadamente a huevos de masas, temperaturas iniciales y edades muy diferentes sin margen ni clasificación. Podría funcionar con una severidad sobredimensionada, pero el coste sería una pérdida funcional innecesaria. También resulta científicamente insuficiente afirmar que una solución aplicada sobre la cáscara «pasteuriza» el interior. Incluso tratamientos de superficie capaces de reducir más de 5 log en una cáscara experimentalmente inoculada sólo prueban eficacia superficial bajo sus condiciones de estudio [36,37].

Es igualmente incorrecto sumar aritméticamente reducciones pertenecientes a compartimentos distintos. Una reducción de 2 log en cáscara y otra de 3 log en el interior no equivalen a una reducción interna de 5 log. Las poblaciones no son la misma población inicial ni comparten la misma ruta de exposición. La tecnología de barreras admite sumar efectos sobre una misma población y durante una misma secuencia de proceso cuando existe un modelo y datos que lo justifican; no admite mezclar *endpoints* biológicos distintos para construir un *claim* comercialmente atractivo.

Otra afirmación improbable es que la pasteurización elimine todo riesgo microbiológico. Pasteurización no es esterilización. Pueden existir fallos de proceso, heterogeneidad fuera del dominio validado, contaminación postproceso, micro-fisuras, abuso térmico y contaminación cruzada durante el cascado. El lenguaje científicamente defendible es **«proceso validado para el control o reducción de *Salmonella Enteritidis*»** con un objetivo cuantificado y unas condiciones de uso. Expresiones como «riesgo cero», «100 % seguro» o «sin riesgos microbiológicos» son absolutas y no reflejan la naturaleza de la gestión del riesgo alimentario.

- Finalmente, tampoco es creíble que un análisis de DSC, turbidez o proteómica permita reconstruir con exactitud una receta industrial ajena. Esas técnicas permiten crear una huella de daño térmico y comparar productos, pero el problema inverso es no identificable: múltiples historias tiempo-temperatura pueden producir cambios proteicos semejantes. La caracterización comparativa tiene valor para fijar un *benchmark* funcional y comprender el espacio tecnológico; no convierte el laboratorio en una máquina de leer secretos de proceso.

7. Radiofrecuencia: una alternativa real, pero no una solución mágica

La radiofrecuencia constituye la tecnología emergente con mayor desarrollo específico para pasteurización de huevo en cáscara. Su atractivo se basa en el calentamiento volumétrico: el campo electromagnético genera energía dentro del sistema y puede reducir el tiempo necesario para que las regiones internas alcancen una temperatura útil. *Geveke et al.* desarrollaron sistemas híbridos que combinaban RF con agua caliente [23]. *Yang et al.* optimizaron tratamientos a 40,68 MHz con potencias entre 30 y 45 W, tiempos de 2,5 a 8 minutos y agua de 30 a 38 °C, seguidos de una fase térmica a 56,7 °C; varias condiciones superaron 5 log de reducción sin alteración de calidad observable en los ensayos seleccionados [24].

En 2020, *Yang* y *Geveke* compararon combinaciones de RF con aire o agua caliente y obtuvieron reducciones de 5 log en aproximadamente 19,5 y 24,5 minutos para determinadas variantes con agua [25]. Un trabajo de 2024 empleó RF a 40,68 MHz y 35 W durante 4,5 minutos seguida de *spray* de agua a 56,7 °C durante 20 minutos, alcanzando 5 log de reducción de *Salmonella Typhimurium* en 24,5 minutos; la mayoría de los atributos de calidad se mantuvo próxima al control, aunque se observaron diferencias en degradación de albúmina [30]. La evidencia demuestra viabilidad científica y una reducción sustancial del tiempo respecto a algunos procesos térmicos convencionales prolongados.

Sin embargo, el uso de la RF introduce retos propios. Las propiedades dieléctricas del huevo no son uniformes y cambian con la temperatura. Las interfaces entre yema, albúmina, membranas y aire pueden concentrar campo. *Lau et al.* describieron la aparición de anillos de coagulación, un ejemplo visual de calentamiento no uniforme y *hot spots* [26]. La rotación, la posición del huevo, la impedancia, la potencia y el medio de acoplamiento son variables de ingeniería relevantes [27]. Conseguir un resultado excelente en un aplicador de laboratorio no garantiza homogeneidad en una línea de alta capacidad.

Tampoco debe suponerse que la RF es automáticamente más barata o más eficiente a escala industrial. Un análisis de ingeniería económica publicado en 2026 comparó el procesamiento híbrido RF-calor con pasteurización térmica convencional y ofrece un marco cuantitativo para estudiar costes, capacidad y consumo [32]. Su importancia reside precisamente en que el coste debe modelizarse; no en que exista una respuesta universal. La economía real depende del precio de la energía, el *throughput*, la utilización del equipo, la automatización, el coste de capital, la tasa de rechazo, el mantenimiento electromagnético y la vida útil del activo.

La recomendación tecnológica prudente es considerar a la RF como una ruta de segunda generación o como opción para plantas que ya han demostrado un mercado suficiente. Antes de comprometer CAPEX se necesita un *baseline* térmico propio, libertad de operación frente a patentes, capacidad de ingeniería electromagnética y un *business case* basado en millones de huevos por año. La sofisticación tecnológica sólo crea valor si reduce el coste total o mejora de manera medible la funcionalidad y la capacidad.

8. Cáscara, cutícula y tecnología de barreras: la oportunidad y sus límites

La cáscara es una barrera mineral porosa recubierta externamente por la cutícula. Su estado condiciona adhesión bacteriana, penetración y respuesta al lavado. *De Reu et al.* demostraron que factores de cáscara influyen en la penetración y contaminación del huevo por diferentes bacterias [33], y estudios posteriores relacionaron el lavado y la integridad de cutícula con la penetración de distintas cepas de *Salmonella* [35]. En consecuencia, una intervención superficial no puede evaluarse únicamente mediante el recuento de microorganismos recuperables inmediatamente después del tratamiento.

Las tecnologías de descontaminación superficial pueden ser muy potentes. La luz pulsada ha alcanzado reducciones importantes de *S. Enteritidis* en cáscara bajo condiciones experimentales, con impacto limitado sobre determinados atributos de calidad [36]. Los procesos de oxidación avanzada con peróxido de hidrógeno y UV también han mostrado reducciones superiores a 5 log en cáscaras experimentalmente contaminadas [37]. Estos resultados son relevantes para disminuir la carga exterior y el riesgo de transferencia, pero no convierten la superficie en un sustituto del *challenge* interno.

La aproximación multibarrera más racional separa tres compartimentos. Para el interior, la barrera primaria es un proceso térmico o híbrido validado frente al patógeno. Para la cáscara, el objetivo es reducir carga externa y transferencia durante cascado sin dañar cutícula, aumentar permeabilidad o dejar residuos incompatibles con la legislación y el uso previsto. Para el ambiente, la prioridad es impedir recontaminación mediante diseño higiénico, limpieza, control de *biofilm*, secado y monitorización post-letal. La suma estratégica de estas tres capas reduce el riesgo global, aunque cada una conserve su *endpoint* de validación.

Las soluciones de origen mineral o natural pueden ser candidatas interesantes para superficie o higiene ambiental, pero «natural» y «food grade» no son categorías mágicas de autorización. Una composición apta como ingrediente en determinados alimentos no queda automáticamente autorizada como tratamiento tecnológico de cáscara, y una solución eficaz sobre acero inoxidable no puede transferirse sin más al contacto directo con un huevo. Se requiere estudiar la función regulatoria, la composición exacta, las condiciones de uso, el enjuague o no enjuague, la penetración, los residuos o iones, el impacto sobre cutícula, la fuerza de la cáscara y la transferencia al contenido.

Un diseño experimental de superficie debería medir, además de UFC por huevo o área, la transferencia durante un cascado reproducible. La pregunta comercial no es sólo cuántas bacterias quedan en la cáscara, sino cuántas llegan al contenido, al recipiente, al guante o al útil. Marcadores fluorescentes y microorganismos *surrogate* no patógenos pueden ser útiles durante ingeniería; la validación final de la seguridad interna, sin embargo, debe descansar en un *challenge* pertinente o en una justificación equivalente aceptable.

El entorno postproceso merece una atención especial. En una línea donde el tratamiento principal ha reducido la carga interna, una cinta, un rodillo o un túnel húmedo puede convertirse en el punto dominante de riesgo. Las proteínas del huevo son excelentes sustratos para residuos adheridos; aplicar calor sobre suciedad proteica puede fijarla y dificultar su retirada. El programa de higiene debe combinar detergencia, acción mecánica, intervención antimicrobiana validada, compatibilidad de materiales y verificación microbiológica. ATP puede funcionar como indicador operacional de limpieza, pero no demuestra ausencia de *Salmonella*. El concepto de «*biofilm control*» no debe utilizarse como *claim* sin demostrar sobre los materiales y microorganismos relevantes que el programa interrumpe o reduce comunidades adheridas.

9. Modelado, NIR y aprendizaje automático: digitalizar sin sustituir la microbiología

La pasteurización en cáscara es un candidato natural para gemelos digitales porque la variable que se desea conocer, y la temperatura del punto frío de cada unidad no puede medirse de forma invasiva en todos los huevos de producción. Un gemelo térmico puede integrar masa, temperatura inicial, clase de materia prima, parámetros del medio, caudal, carga y receta para estimar una trayectoria interna conservadora. La palabra clave es «conservadora», es decir, que el sistema debe proteger frente a falsos seguros, no minimizar únicamente el error medio.

La primera capa del gemelo debería ser física. Un modelo axisimétrico de diferencias o elementos finitos puede representar cáscara, albúmina y yema con propiedades efectivas calibradas frente a huevos instrumentados. La CFD es útil para estudiar convección interna y efectos de geometría, como muestra la literatura reciente [31]. Sólo después de comprender los residuos del modelo físico resulta razonable incorporar aprendizaje automático para corregir sesgos sistemáticos asociados a lote, proveedor, estacionalidad o clases de huevo.

La espectroscopia NIR puede aportar variables no destructivas sobre frescura o almacenamiento. Coronel-Reyes y colaboradores utilizaron un espectrómetro NIR de bajo coste y técnicas de *machine learning* para predecir tiempo de almacenamiento a temperatura ambiente, alcanzando en su mejor modelo un R^2 aproximado de 0,832 y un RMSE de 1,97 días [38]. Cruz-Tirado y colaboradores demostraron igualmente el potencial de un espectrómetro portátil NIR para monitorizar frescura y predecir unidades *Haugh* mediante aprendizaje automático [39]. Estos resultados justifican estudiar la NIR como covariable de clasificación de entrada.

No justifican, sin embargo, dos afirmaciones frecuentes y erróneas. Una, que NIR detecta *Salmonella* y dos, que un modelo de IA certifica la pasteurización. Un espectro de frescura no es un ensayo de patógenos. Un algoritmo entrenado sobre curvas térmicas tampoco reemplaza un *challenge* microbiológico. La función digital es reducir incertidumbre, clasificar lotes, estimar el punto frío y detectar desviaciones dentro de un proceso previamente validado.

La gobernanza del modelo debe parecerse más a un sistema de calidad que a una aplicación de consumo. Cada predicción necesita una versión de modelo, un *dataset* de calibración, parámetros y trazabilidad. Los cambios de proveedor, estirpe, equipo, sensor o geometría de carga deben activar una evaluación de *change control*. Debe existir monitorización de *drift* y una regla de seguridad determinista: si falta un parámetro crítico, si un sensor está fuera de calibración o si el proceso abandona el dominio validado, el lote no se libera aunque el modelo estadístico asigne una alta probabilidad de conformidad.

En términos comerciales, el verdadero activo digital no es «usar inteligencia artificial». Es disponer de un *dataset* térmico-microbiológico suficientemente rico para construir clases de huevo, cuantificar incertidumbre y transferir una receta de una planta a otra con menos ensayo ciego. La ventaja competitiva reside en la calidad del conocimiento de proceso y en la integración entre física, microbiología y datos.

10. Validación microbiológica: el punto donde termina el marketing

La pasteurización es una afirmación de proceso que debe estar respaldada por evidencia. La validación no puede reducirse a analizar cinco huevos terminados y declarar ausencia de *Salmonella*. La probabilidad de encontrar contaminación natural interna es baja; por ello, un resultado negativo de muestreo de producto comercial no demuestra que el proceso posea una capacidad letal determinada. La herramienta apropiada es un *challenge test* diseñado alrededor del peligro y del modelo de escenario *worst case*.

Para un desarrollo dirigido al control de *S. Enteritidis*, resulta defendible emplear un *cocktail* de varias cepas de relevancia para huevo y con resistencia térmica adecuada. Tres a cinco cepas proporcionan una diversidad razonable, siempre que la selección esté científicamente justificada. El desafío interno debe localizar el microorganismo en una zona que represente la condición más protectora pertinente, evitando al mismo tiempo crear un artefacto físico que modifique radicalmente la transferencia. La concentración inicial debe ser suficiente para cuantificar la reducción objetivo con margen analítico.

La reducción interna, la reducción de cáscara y la transferencia durante cascado deben validarse en modelos separados. Para el proceso interior, un objetivo de al menos 5 log₁₀ de *S. Enteritidis* es un *benchmark* de diseño sólido por su anclaje en la definición estadounidense de *shell egg treated* y en la literatura de *in-shell pasteurization* [10,14,23-30]. En Europa, su uso debe describirse como criterio técnico de diseño y no como si el Derecho de la Unión impusiera universalmente esa cifra a todo huevo pasteurizado en cáscara.

La robustez exige varias secuencias de muestreo independientes y lotes distintos. El protocolo debe incluir condición nominal, una condición cercana al límite crítico inferior y un *worst case* de masa, T₀, circulación o carga. Debe registrarse la rampa real, porque la fisiología de estrés de *Salmonella* durante el *come-up* puede alterar la termorresistencia [22]. También debe documentarse el enfriamiento. La enumeración cuantitativa ha de complementarse con enriquecimiento y un sistema apropiado de recuperación de células sub-letalmente lesionadas. Los trabajos basados en el uso de la RF han mostrado que la cinética de inactivación puede no seguir un modelo *log-lineal* simple y que *Weibull* puede describir mejor determinadas curvas [28]; asumir primer orden por comodidad puede distorsionar el margen.

El seguimiento posterior es igualmente relevante. Un proceso puede dejar células lesionadas que no se recuperan inmediatamente en un medio selectivo, pero que sobreviven y vuelven a crecer bajo ciertas condiciones. Por eso es aconsejable incluir puntos a 24 horas, mitad de vida útil y final de vida útil, además de ensayos de abuso térmico razonable. Los modelos predictivos pueden ayudar a diseñar esos escenarios, pero deben permanecer dentro de su dominio de validez y contrastarse con datos propios; el propio informe científico de AESAN de 2025 insiste en combinar modelos con estudios de vida útil, *challenge* y datos reales [1].

Un *surrogate* puede acelerar el desarrollo piloto y permitir estudios en instalaciones no destinadas a patógenos. No debe convertirse automáticamente en la validación final. Es necesario demostrar una correlación conservadora entre la respuesta del *surrogate* y la de *S. Enteritidis* en la matriz y el perfil térmico de interés. El *challenge* con patógeno debe realizarse en un laboratorio competente y con capacidad para manejar cepas, recuperación y bioseguridad. Introducir *Salmonella* deliberadamente en una planta piloto ordinaria sería un riesgo innecesario y una mala decisión de gestión.

La liberación de producción debe apoyarse en límites de proceso validados, no en hacer un *challenge* por lote. Los estudios microbiológicos definen la ventana y el margen; el control rutinario verifica los parámetros críticos que la reproducen. Esa separación entre validación y monitorización es la base de un sistema industrial escalable.

11. El problema regulatorio europeo y español: una categoría tecnológicamente clara, jurídicamente menos explícita

La regulación española crea un incentivo comercial evidente para soluciones que permitan trabajar con huevo de yema fluida y reducir la dependencia de un tratamiento térmico final. El artículo 9 del Real Decreto 1021/2022 permite a los establecimientos minoristas usar huevo crudo cuando el alimento alcanza al menos 70 °C durante 2 segundos en el centro, o una combinación equivalente, y contempla 63 °C durante 20 segundos para huevos fritos, tortillas u otras preparaciones que se sirvan para consumo inmediato. Cuando no se aplica un tratamiento que cumpla esas condiciones, el apartado 2 exige sustituir el huevo crudo por ovoproductos procedentes de establecimientos autorizados [3].

La dificultad aparece al clasificar un huevo íntegro en cáscara que ha recibido un tratamiento de pasteurización, pero no ha sido cocido. El Reglamento (CE) 853/2004 define «huevos» como los huevos con cáscara, distintos de los rotos, incubados o cocidos, aptos para consumo humano directo o preparación de ovoproductos; y define «ovoproductos» como productos transformados resultantes de la transformación de huevos o de sus componentes o mezclas [5]. El Reglamento 852/2004 considera transformación una acción que altera sustancialmente el producto inicial e incluye el calentamiento entre sus ejemplos [4]. La tecnología se sitúa, por tanto, en una intersección que requiere análisis jurídico y criterio operativo de la autoridad competente.

No debería afirmarse, sin un expediente específico, que cualquier huevo pasteurizado en cáscara sustituye automáticamente al ovoproducto exigido por el artículo 9.2. Tampoco es correcto concluir lo contrario y declarar la categoría imposible. El Comité Científico de AESAN, en su informe de 2025, recomienda para determinados postres, batidos o salsas con huevo crudo emplear huevo pasteurizado en distintas presentaciones, incluyendo expresamente la «cáscara tratada» [1]. Esta recomendación científica reconoce la lógica de gestión del riesgo de la categoría, pero un informe científico no modifica por sí solo la redacción de un Real Decreto.

Existe una segunda cuestión en las normas de comercialización de huevos. El Reglamento Delegado (UE) 2023/2465 establece que los huevos de clase A no deben ser tratados «*for preservation*» y contiene restricciones sobre lavado y refrigeración en determinadas instalaciones [8]. De esa redacción no se desprende automáticamente que toda pasteurización excluya la clase A, porque la finalidad y la naturaleza del tratamiento deben analizarse; pero tampoco puede asumirse que la clasificación de huevo de mesa fresco se mantiene intacta después de cualquier proceso térmico. Denominación, categoría comercial, establecimiento de procesado e identificación necesitan una posición regulatoria coherente.

Los criterios microbiológicos añaden otra capa. El Reglamento (CE) 2073/2005, en su versión consolidada de 1 de julio de 2026, contiene para los ovoproductos un criterio de *Salmonella* de $n=5$, $c=0$, no detectada en 25 g, con la excepción de productos cuyo proceso o composición eliminen el riesgo, y criterios de higiene de proceso para *Enterobacteriaceae* [6]. La aplicación directa de una categoría concreta al huevo pasteurizado en cáscara dependerá de su clasificación jurídica. Utilizar esos criterios como comparador técnico es sensato; asignarlos de manera automática antes de resolver la categoría puede ser jurídicamente impreciso.

La denominación y los *claims* deben reflejar el tratamiento sin inducir a error, de acuerdo con los principios del Reglamento (UE) 1169/2011 [9]. Un fabricante debería preferir formulaciones como «**huevo pasteurizado en cáscara**» o «**proceso validado para la reducción de *Salmonella Enteritidis***», siempre que disponga de evidencia y que la denominación haya sido evaluada. Los *claims* absolutos de ausencia de riesgo son desaconsejables. La clave regulatoria es construir un dossier de proceso, no una frase publicitaria.

Desde el punto de vista estratégico, la empresa que desarrolle esta tecnología en la Unión Europea debería abrir el expediente regulatorio al principio del proyecto, no cuando la línea esté comprada. El memorando de clasificación debe abordar 852/2004, 853/2004, 2073/2005, 2023/2465, 1169/2011 y la normativa nacional de uso del huevo en restauración. El diálogo con la autoridad será mucho más útil si se presenta un producto, un diagrama de proceso, un *target* microbiológico y un uso previsto concretos.

12. Ventajas reales de la pasteurización en cáscara

La primera ventaja es gastronómica y difícil de replicar con ovoproducto líquido puesto que se conserva la anatomía del huevo. El cocinero casca una unidad, observa una clara y una yema separadas, puede freírla, hacerla a la plancha, escalfarla o trabajar la yema individualmente. Esta continuidad de uso reduce la barrera de adopción asociada a productos líquidos estandarizados y permite mantener preparaciones en las que la forma del huevo forma parte del plato.

La segunda ventaja es la posibilidad de desplazar una parte del control microbiológico desde el punto de servicio hacia un proceso industrial validado. En una cocina con cientos o miles de servicios, verificar que el centro de cada huevo frito ha alcanzado una combinación tiempo-temperatura concreta es operativamente difícil. Un ingrediente previamente tratado, trazado y conservado bajo especificación ofrece una capa adicional de estandarización. No elimina las buenas prácticas ni el control de frío, pero reduce la dependencia de una operación culinaria variable.

La tercera ventaja es comercial. Existe un conjunto de platos cuyo valor depende de texturas poco cuajadas: huevo frito con yema líquida, tortillas jugosas, determinadas carbonaras, holandesas, tiramisús, mousses, *eggnog*, salsas y emulsiones. *Mihalache et al.* evaluaron sensorialmente recetas tradicionalmente elaboradas con huevo crudo o poco cocinado en Portugal y Rumanía y concluyeron que el uso de huevo pasteurizado podía constituir una solución de seguridad sin una pérdida significativa de aceptación global en las preparaciones estudiadas [40]. No todos los platos ni todos los procesos serán equivalentes, pero la evidencia contradice la idea de que pasteurización y alta gastronomía sean necesariamente incompatibles.

La cuarta ventaja es la trazabilidad. La unidad conserva el código y el lote del sistema de huevo, mientras el tratamiento puede asociarse a una historia de proceso. Para cadenas de restauración, hoteles, catering y colectividades, esa trazabilidad puede integrarse en compras, homologación de proveedor y APPCC. La tecnología también puede reducir el rechazo psicológico de la llamada «huevina», una denominación coloquial que simplifica injustamente el valor de los ovoproductos pero que refleja una percepción real en parte del mercado.

Por último, una plataforma bien desarrollada puede convertirse en propiedad industrial y *know-how* transferible. El activo no es el agua caliente. Es la combinación de clasificación de entrada, perfil térmico, modelado del *worst case*, enfriamiento, validación, control de superficie, datos y criterios de liberación. Esa arquitectura admite modelos de licencia tecnológica, integración con fabricantes de equipo, servicios de validación, software de monitorización y consumibles de higiene cuando estén expresamente validados.

13. Desventajas, costes y límites que el discurso comercial no debería ocultar

La principal desventaja de la pasteurización térmica convencional es el tiempo de ciclo. La literatura histórica describe tratamientos prolongados y los trabajos de RF surgieron precisamente para acortar el *come-up* y reducir el daño funcional [14-17,23-25]. Un proceso de una hora puede ser microbiológicamente excelente y comercialmente mediocre si requiere enormes tanques, inventario en proceso y potencia frigorífica. El *throughput* debe evaluarse en huevos por hora y por metro cuadrado de planta, no sólo por lote.

El consumo energético es una segunda limitación. Es necesario calentar una masa de agua o aire y millones de unidades biológicas, y después extraer rápidamente esa energía. La recuperación de calor puede mejorar el balance, pero aumenta complejidad. Un análisis económico debe registrar kWh térmicos y frigoríficos por mil huevos, agua de reposición, tiempos de carga y descarga, OEE y coste de amortización. El reciente trabajo de ingeniería económica sobre RF confirma que la comparación entre tecnologías necesita un modelo de costes y capacidad, no intuiciones [32].

La variabilidad de materia prima genera costes invisibles. Una clasificación más estrecha puede reducir severidad, pero exige equipos, datos y gestión de lotes. La inspección de micro-fisuras produce rechazo. Los huevos pueden romperse durante calentamiento, manipulación o enfriamiento. Si el tratamiento altera la cutícula o aumenta la fragilidad, la tasa de merma puede erosionar rápidamente el margen. Un producto de mayor seguridad que pierde un 2 % adicional de unidades puede ser económicamente inaceptable en una operación de gran volumen.

La validación también cuesta. Estudios con patógenos, varias corridas, cepas, recuperación de células lesionadas, vida útil, abusos térmicos y revalidación de cambios no son opcionales si se pretende sostener un *claim* cuantificado. El laboratorio externo, la instrumentación, la calibración de sondas y la modelización pueden representar decenas o centenares de miles de euros durante el desarrollo. A ello se suma el coste jurídico de clasificar el producto y revisar la libertad de operación frente a patentes.

Existe, además, un límite sensorial. Ningún proceso térmico es completamente neutro. La literatura demuestra que, aun cuando el aspecto visual sea aceptable, pueden aparecer cambios en turbidez, unidades *Haugh* o degradación de albúmina [19,25,30]. La ingeniería puede minimizar el daño, pero no puede ni debe prometer invisibilidad absoluta. Para ciertos usos industriales de alta exigencia de espumado, un huevo líquido pasteurizado específicamente formulado podría seguir siendo superior. La pasteurización en cáscara no sustituirá a todos los ovoproduitos; ocupará los segmentos donde la unidad anatómica y la experiencia culinaria compensen el premium.

La cadena de frío y la higiene posterior siguen siendo necesarias. Tratar el huevo no autoriza a almacenarlo sin control ni a operar una zona post-letal sucia. La *Salmonella* puede sobrevivir durante periodos prolongados en determinadas condiciones, y la contaminación externa o cruzada sigue siendo posible [1,33-35]. Comercializar el producto como una licencia para abandonar las buenas prácticas sería contraproducente desde la perspectiva de seguridad y de responsabilidad.

Por último, señalar que la tecnología puede ser vulnerable a la banalización comercial. Si el mercado utiliza «pasteurizado» sin una definición operativa transparente, sin *target* microbiológico y sin documentación de proceso, aparecerán productos heterogéneos bajo una misma palabra. La diferenciación sostenible debe apoyarse en evidencia, auditoría y capacidad de transferir la validación a condiciones reales de planta.

14. Estrategia industrial y comercial: del producto a la plataforma tecnológica

El mercado potencial no debe definirse como «todos los consumidores de huevo». El primer segmento lógico es HORECA de alto consumo y valor igualmente elevado de la textura: restauración organizada, hotelería, catering, *dark kitchens*, colectividades con procedimientos estandarizados y cocinas centrales. En estos entornos, el coste adicional por huevo puede justificarse si reduce desviaciones, simplifica APPCC, protege la consistencia del plato y permite ofrecer yemas fluidas con una intervención industrial previa.

Un segundo segmento es la alta gastronomía y los fabricantes de soluciones culinarias que utilizan huevos individualizados. Aquí el argumento no es volumen, sino preservación de estructura y funcionalidad. Un tercer segmento es la industria del huevo que busca ampliar su *portfolio* más allá del huevo de mesa y del ovoproducto líquido. Para estos operadores, la tecnología puede ser una categoría de valor añadido y una herramienta de diferenciación en mercados con presión sobre el margen del huevo *commodity*.

El modelo comercial más robusto para un desarrollador tecnológico no consiste necesariamente en convertirse en productor avícola. Puede licenciar proceso y *know-how*, integrar el sistema con ingenierías de equipo, coordinar la validación microbiológica y ofrecer una capa digital de monitorización. Los consumibles de higiene o superficie, cuando exista una ruta regulatoria y datos específicos, pueden generar recurrencia; no deberían ser el único *moat*. Un competidor puede copiar una formulación genérica con relativa facilidad. Es mucho más difícil copiar un *dataset* que conecta miles de curvas térmicas, clases de huevo, resultados de *challenge*, atributos funcionales y comportamiento en varias plantas.

La libertad de operación debe estudiarse pronto. La idea genérica de pasteurizar huevos en cáscara está claramente anticipada por publicaciones y patentes históricas. Pretender proteger una reivindicación tan amplia sería débil. El espacio potencialmente patentable se encuentra en combinaciones específicas y no obvias: un método de clasificación térmica que asigne receta según masa, T0 y un proxy no destructivo; una secuencia multietapa con *quench* definida por límites de punto frío y calidad; una combinación específica de intervención superficial y proceso interno que demuestre sinergia; o un sistema de control híbrido físico-ML con reglas técnicas concretas de *lower bound* e *interlock*. La patente debe seguir a los datos, no precederlos.

Desde una perspectiva de marketing técnico, la narrativa *debe evitar la tentación de «tecnología secreta» y «cero riesgo»*. El comprador profesional valora una propuesta más sobria: *target* microbiológico, validación, comportamiento culinario, vida útil, condiciones de conservación y trazabilidad. La documentación puede convertirse en un argumento de venta. La empresa que explique mejor sus límites será, paradójicamente, más creíble frente a responsables de calidad y grandes cadenas.

La construcción del precio debe partir del valor evitado y creado. El *premium* no se justifica por haber calentado el huevo, sino por reducir riesgo operacional, mantener una preparación que de otro modo tendría que reformularse, proteger marca, disminuir incidencias y estandarizar servicio. En determinadas cadenas, el coste de una retirada, un brote o una desviación reputacional supera ampliamente el sobrecoste unitario. En otras, especialmente en consumo doméstico masivo, la sensibilidad al precio será mayor y el mercado puede permanecer nicho. La tecnología necesita segmentación, no evangelización indiscriminada.

15. Hacia una pasteurización de precisión: programa de desarrollo científicamente defendible

Un programa de desarrollo debería comenzar por el *benchmark* de producto y la caracterización de materia prima, pero sin intentar deducir recetas ajenas. Tres o más lotes comerciales de referencia, comparados con controles emparejados, pueden analizarse mediante masa, *Haugh*, pH, índice de yema, turbidez, viscosidad, DSC, fuerza de cáscara y pruebas culinarias. La huella multivariante permite definir qué nivel de daño funcional acepta el mercado. No permite saber con exactitud la temperatura y el tiempo utilizados por un tercero.

En paralelo debe construirse un *loop* térmico piloto altamente instrumentado. La prioridad no es producir miles de huevos, sino capturar datos limpios. Se necesitan sensores calibrados, posicionamiento reproducible en centro de yema, interfaz y albúmina, registro de temperatura del medio en varios puntos, caudal o proxy de circulación y un sistema de adquisición con reloj sincronizado. Un diseño secuencial de experimentos es preferible a un factorial gigantesco: primero se mapean extremos de masa, T0 y circulación; después un diseño *D-optimal* o de superficie de respuesta concentra ensayos en la región informativa.

La ventana inicial de investigación puede situarse, con prudencia, en medios térmicos próximos a 55-58 °C y tiempos globales de decenas de minutos, porque esa región está bien representada en la literatura clásica y reciente [14-17,31]. Es esencial insistir en que se trata de una ventana de screening y no de instrucciones de fabricación. La condición final debe derivarse de datos propios de punto frío, *challenge* y funcionalidad. La rampa y el *quench* deben formar parte del diseño experimental.

Las intervenciones de superficie deben abrirse como un paquete separado. Primero se resuelve la ruta regulatoria y la compatibilidad; después se comparan un control, el proceso hídrico, un *benchmark* autorizado y candidatos seleccionados. Las respuestas deben incluir carga exterior, transferencia al cascado, cobertura de cutícula, ángulo de contacto, permeabilidad mediante marcador, fuerza de rotura y residuos relevantes. Sólo los candidatos que mejoren transferencia sin deteriorar la barrera natural pasan a integración.

El *challenge* con *S. Enteritidis* se ejecuta después de seleccionar una o dos ventanas térmicas. Si la intervención superficial o ambiental parece mejorar robustez, puede investigarse si permite reducir severidad térmica; pero la hipótesis debe probarse sobre el compartimento interno. La seguridad no puede descansar en una suma conceptual de barreras. La condición integrada se valida de nuevo en *worst case*.

La vida útil se establece por el primer criterio limitante, microbiológico o funcional, no por la fecha que desee el departamento comercial. Deben incluirse escenarios nominales, desviaciones previsibles y ciclos que generen condensación. La información de modelo predictivo sirve para seleccionar puntos y diseñar el *challenge*, pero la empresa conserva la responsabilidad de justificar la vida útil con datos [1].

Finalmente, el proceso piloto se congela mediante una especificación maestra: clases de entrada, límites críticos o parámetros de proceso, receta, *quench*, integridad, criterios de liberación, desviaciones y *change control*. La validación industrial debe estudiar distribución térmica en carga máxima y mínima, variación de T0, masa límite y capacidad del sistema de frío. Sólo entonces tiene sentido comprometer CAPEX de una línea de gran escala o evaluar una segunda generación RF.

16. Discusión: por qué esta tecnología puede ser importante y por qué puede fracasar

La pasteurización del huevo en cáscara ocupa una posición singular entre la seguridad alimentaria y la gastronomía. A diferencia de muchas tecnologías de conservación, su objetivo comercial no es prolongar indefinidamente la vida útil ni transformar el alimento, sino hacer casi invisible una intervención de seguridad. El producto ideal se comporta como un huevo fresco para el cocinero, aunque detrás exista una ingeniería compleja. Esa invisibilidad funcional es, al mismo tiempo, su mayor valor y su mayor dificultad.

La tecnología puede ser importante porque resuelve una fricción real entre regulación, riesgo y preferencia culinaria. El huevo líquido pasteurizado seguirá siendo indispensable en la industria; ofrece homogeneidad, dosificación y una excelente plataforma para formulación. Pero no puede producir un huevo frito anatómicamente intacto. La pasteurización en cáscara abre precisamente el espacio que queda entre el huevo fresco sin tratamiento y el ovoproducto. El informe científico de AESAN de 2025, al incluir expresamente presentaciones pasteurizadas con cáscara tratada entre sus recomendaciones para determinadas preparaciones, confirma que la lógica de gestión del riesgo es científicamente reconocible [1].

Puede fracasar por razones igualmente reales. Un proceso térmico demasiado lento puede ser caro y dañar la albúmina. Un proceso demasiado rápido puede generar *hot spots* o dejar un *cold spot* infratratado. Una línea sin clasificación puede necesitar sobredimensionar la severidad. Un producto mal clasificado jurídicamente puede perder su principal promesa HORECA. Un *claim* absoluto puede crear responsabilidad innecesaria. Y una empresa que confíe en la palabra «IA» sin construir un *dataset* microbiológico y térmico descubrirá que el algoritmo no sustituye al *process authority*.

La frontera de innovación se encuentra, a juicio de este análisis, en la precisión y la integración. Clasificar el huevo como objeto térmico; diseñar la rampa como parámetro biológico; incluir el enfriamiento en la historia de letalidad; separar interior, cáscara y ambiente; medir transferencia durante cascado; usar NIR sólo para lo que puede predecir; combinar un gemelo físico con *machine learning* residual; y convertir la validación en un activo de transferencia. Ninguno de estos elementos, aislado, es revolucionario. Su integración puede serlo a escala industrial.

También es importante reconocer que no existe una tecnología universalmente superior. La inmersión en agua puede ser robusta y relativamente simple; RF puede reducir tiempo, pero aumenta complejidad; una barrera superficial puede aportar valor en una planta y ser innecesaria o jurídicamente incómoda en otra. La buena ingeniería no busca la solución más sofisticada, sino la mínima arquitectura capaz de cumplir el *target* microbiológico, conservar la función y ganar dinero dentro del marco regulatorio.

En este sentido, el principal error comercial sería vender la pasteurización en cáscara como una curiosidad. Es una plataforma de control de riesgo y de producto. Pero el segundo error sería sobredimensionar su mercado. No todos los huevos necesitan pasteurización individual y no todos los consumidores pagarán por ella. La adopción será más rápida allí donde la textura poco cuajada sea esencial, el volumen de servicio alto, el riesgo reputacional relevante y la compra esté profesionalizada.

El futuro más plausible es un mercado segmentado: huevo de mesa convencional para usos plenamente cocinados; ovoproductos líquidos, secos o congelados para industria y restauración que priorizan dosificación; y huevo pasteurizado en cáscara para aplicaciones en las que la anatomía y la fluidez de la yema tienen valor. La tecnología no destruye categorías existentes; crea una tercera zona de especialización.

17. Conclusiones

La pasteurización del huevo dentro de su cáscara es científicamente viable y cuenta con un cuerpo de evidencia acumulado durante más de tres décadas. Su dificultad actual no está en probar el efecto antimicrobiano del calor, sino en industrializar una ventana estrecha entre inactivación de *Salmonella Enteritidis* y desnaturalización de las proteínas que determinan la funcionalidad del huevo.

Los elementos más probables de un proceso robusto son la cualificación de materia prima, la detección de fisuras, la clasificación por masa y temperatura inicial, el control de la rampa, un medio térmico con transferencia reproducible, el modelado y validación del punto frío, el enfriamiento rápido, el secado higiénico, la inspección postproceso y la trazabilidad. La radiofrecuencia (RF) es una alternativa real y bien documentada, pero no debe presumirse en ningún producto ni considerarse automáticamente superior en coste o uniformidad. Las intervenciones de superficie pueden reducir contaminación externa y transferencia, pero no sustituyen la validación de letalidad interna.

Desde el punto de vista científico, son insostenibles varias simplificaciones: que un sanitizante de cáscara pasteuriza el contenido; que las reducciones logarítmicas de compartimentos distintos pueden sumarse; que un único tiempo de baño funciona de forma idéntica para todas las unidades; que la pasteurización equivale a esterilización; que NIR detecta *Salmonella*; que la inteligencia artificial puede certificar seguridad sin *challenge*; o que una huella térmica instrumental revela una receta propietaria exacta.

El marco europeo y español ofrece una oportunidad comercial, pero también una cuestión de clasificación que debe resolverse con rigor. El artículo 9 del Real Decreto 1021/2022 genera una necesidad clara en restauración para preparaciones poco tratadas térmicamente, mientras las definiciones de huevos y ovoproductos y las normas de comercialización exigen un análisis específico del producto pasteurizado en cáscara [3-8]. La evidencia científica de AESAN reconoce el interés de presentaciones con cáscara tratada, pero la comunicación comercial no debe adelantarse al expediente jurídico [1].

El valor industrial sostenible no residirá en una temperatura secreta ni en un único producto auxiliar. Residirá en la combinación de proceso, datos, validación, control de recontaminación, preservación funcional y capacidad de transferir la tecnología entre lotes, equipos y plantas. El sistema que domine esa integración podrá convertir un alimento biológicamente variable en una unidad de proceso predecible y, al mismo tiempo, conservar lo que el mercado desea del huevo: su forma, su textura y su comportamiento culinario.

La pasteurización en cáscara debe juzgarse, en definitiva, por cuatro preguntas. ¿Reduce de manera validada el peligro interno pertinente? ¿Conserva la funcionalidad que justifica mantener la cáscara y la anatomía del huevo? ¿Puede reproducirse a escala con un coste y un *throughput* aceptables? ¿Se comercializa bajo una clasificación y unos *claims* jurídicamente defendibles? Cuando las cuatro respuestas son afirmativas, no estamos ante un simple huevo calentado, sino ante una auténtica plataforma de tecnología alimentaria de precisión.

Referencias bibliográficas

1. Comité Científico AESAN (Grupo de Trabajo: Valero A, Rodrigo MD, Capita RM, Mayo B, Mora AC, Pérez F, Arrabal P). Informe del Comité Científico de la Agencia Española de Seguridad Alimentaria y Nutrición (AESAN) sobre las condiciones de mantenimiento de los alimentos elaborados con huevo u ovoproductos en los establecimientos minoristas. *Revista del Comité Científico de la AESAN*. 2025;42:79-140.
2. Humphrey TJ. Contamination of egg shell and contents with *Salmonella enteritidis*: a review. *International Journal of Food Microbiology*. 1994;21(1-2):31-40. doi:10.1016/0168-1605(94)90197-X.
3. España. Real Decreto 1021/2022, de 13 de diciembre, por el que se regulan determinados requisitos en materia de higiene de la producción y comercialización de los productos alimenticios en establecimientos de comercio al por menor. BOE-A-2022-21681.
4. Parlamento Europeo y Consejo. Reglamento (CE) n.º 852/2004, de 29 de abril de 2004, relativo a la higiene de los productos alimenticios. Texto consolidado.
5. Parlamento Europeo y Consejo. Reglamento (CE) n.º 853/2004, de 29 de abril de 2004, por el que se establecen normas específicas de higiene de los alimentos de origen animal. Texto consolidado de 18 de noviembre de 2025.
6. Comisión Europea. Reglamento (CE) n.º 2073/2005, de 15 de noviembre de 2005, relativo a los criterios microbiológicos aplicables a los productos alimenticios. Texto consolidado de 1 de julio de 2026.
7. Parlamento Europeo y Consejo. Reglamento (CE) n.º 2160/2003, de 17 de noviembre de 2003, sobre el control de la salmonela y otros agentes zoonóticos específicos transmitidos por los alimentos.
8. Comisión Europea. Reglamento Delegado (UE) 2023/2465, de 17 de agosto de 2023, por el que se completa el Reglamento (UE) n.º 1308/2013 en lo que atañe a las normas de comercialización de los huevos. Texto consolidado de 14 de octubre de 2024.
9. Parlamento Europeo y Consejo. Reglamento (UE) n.º 1169/2011, de 25 de octubre de 2011, sobre la información alimentaria facilitada al consumidor.
10. United States Food and Drug Administration. 21 CFR Part 118. Production, Storage, and Transportation of Shell Eggs. §118.3 Definitions. Current electronic Code of Federal Regulations.
11. World Health Organization; Food and Agriculture Organization of the United Nations. Risk Assessments of *Salmonella* in Eggs and Broiler Chickens. Microbiological Risk Assessment Series No. 2. Geneva/Rome: WHO/FAO; 2002.
12. EFSA Panel on Biological Hazards (BIOHAZ). Scientific Opinion on the public health risks of table eggs due to deterioration and development of pathogens. *EFSA Journal*. 2014;12(7):3782. doi:10.2903/j.efsa.2014.3782.
13. EFSA BIOHAZ Panel. *Salmonella* control in poultry flocks and its public health impact. *EFSA Journal*. 2019;17(2):5596. doi:10.2903/j.efsa.2019.5596.
14. Stadelman WJ, Singh RK, Muriana PM, Hou H. Pasteurization of Eggs in the Shell. *Poultry Science*. 1996;75(9):1122-1125. doi:10.3382/ps.0751122.
15. Hou H, Singh RK, Muriana PM, Stadelman WJ. Pasteurization of intact shell eggs. *Food Microbiology*. 1996;13(2):93-101. doi:10.1006/fmic.1996.0012.
16. Schuman JD, Sheldon BW, Vandepopuliere JM, Ball HR Jr. Immersion heat treatments for inactivation of *Salmonella enteritidis* within intact eggs. *Journal of Applied Microbiology*. 1997;83(4):438-444. doi:10.1046/j.1365-2672.1997.00253.x.
17. Brackett RE, Schuman JD, Ball HR Jr, Scouten AJ. Thermal inactivation kinetics of *Salmonella* spp. within intact eggs heated using humidity-controlled air. *Journal of Food Protection*. 2001;64(7):934-938. doi:10.4315/0362-028X-64.7.934.
18. Hank CR, Kunkel ME, Dawson PL, Acton JC, Wardlaw FB Jr. The effect of shell egg pasteurization on the protein quality of albumen. *Poultry Science*. 2001;80(6):821-824. doi:10.1093/ps/80.6.821.
19. Shenga E, Singh RP, Yadav AS. Effect of pasteurization of shell egg on its quality characteristics under ambient storage. *Journal of Food Science and Technology*. 2010;47(4):420-425. doi:10.1007/s13197-010-0069-2.
20. Rossi M, Schiraldi A. Thermal denaturation and aggregation of egg proteins. *Thermochimica Acta*. 1992;199:115-123. doi:10.1016/0040-6031(92)80255-U.
21. Matsudomi N, Oka H, Sonoda M. Inhibition against heat coagulation of ovotransferrin by ovalbumin in relation to its molecular structure. *Food Research International*. 2002;35(9):821-827. doi:10.1016/S0963-9969(02)00085-6.
22. Xu Y, Abdelhamid AG, Sabag-Daigle A, Ahmer BMM, Yousef AE. Heating Rate during Shell Egg Thermal Treatment Elicits Stress Responses and Alters Virulence of *Salmonella enterica* Serovar Enteritidis; Implications for Shell Egg Pasteurization. *Applied and Environmental Microbiology*. 2022;88(20):e01140-22. doi:10.1128/aem.01140-22.
23. Geveke DJ, Bigley ABW, Brunkhorst CD. Pasteurization of shell eggs using radio frequency heating. *Journal of Food Engineering*. 2017;193:53-57. doi:10.1016/j.jfoodeng.2016.08.009.
24. Yang Y, Geveke DJ, Brunkhorst CD, Sites JE, Geveke NJ, Tilman ED. Optimization of the radio frequency power, time and cooling water temperature for pasteurization of *Salmonella Typhimurium* in shell eggs. *Journal of Food Engineering*. 2019;247:130-135. doi:10.1016/j.jfoodeng.2018.12.004.
25. Yang Y, Geveke DJ. Shell egg pasteurization using radio frequency in combination with hot air or hot water. *Food Microbiology*. 2020;85:103281. doi:10.1016/j.fm.2019.103281.
26. Lau SK, Thippareddi H, Jones DD, Negahban M, Subbiah J. Challenges in Radiofrequency Pasteurization of Shell Eggs: Coagulation Rings. *Journal of Food Science*. 2016;81(10):E2492-E2502. doi:10.1111/1750-3841.13440.
27. Lau SK, Thippareddi H, Subbiah J. Radiofrequency Heating for Enhancing Microbial Safety of Shell Eggs Immersed in Deionized Water. *Journal of Food Science*. 2017;82(12):2933-2943. doi:10.1111/1750-3841.13965.
28. Bermudez-Aguirre D, Niemira BA. Microbial inactivation models of *Salmonella Typhimurium* in radio frequency treated eggs. *Food Control*. 2023;148:109634. doi:10.1016/j.foodcont.2023.109634.
29. Bermudez-Aguirre D, Niemira BA. Modeling quality changes and *Salmonella Typhimurium* growth in storage for eggs pasteurized by radio frequency treatments. *Food Control*. 2023;148:109638. doi:10.1016/j.foodcont.2023.109638.

30. Bermudez-Aguirre D, Sites J, Carter J, Niemira BA. Radio frequency plus heat for in-shell egg pasteurization. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2024;98:103834. doi:10.1016/j.ifset.2024.103834.
31. Sampanis PA, Chatzidakis SM, Stoforos GN, Stoforos NG. Analysis of Shell Egg Pasteurization Using Computational Fluid Dynamics. *Applied Sciences*. 2025;15(3):1263. doi:10.3390/app15031263.
32. Bermudez-Aguirre D, Sites JE, Mukhopadhyay S, Niemira BA. Cost-Engineering Analysis of Radio Frequency Plus Heat for In-Shell Egg Pasteurization. *Processes*. 2026;14(2):379. doi:10.3390/pr14020379.
33. De Reu K, Grijspeerdt K, Messens W, Heyndrickx M, Uyttendaele M, Debevere J, Herman L. Eggshell factors influencing eggshell penetration and whole egg contamination by different bacteria, including *Salmonella enteritidis*. *International Journal of Food Microbiology*. 2006;112(3):253-260. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2006.04.011.
34. De Reu K, Grijspeerdt K, Heyndrickx M, Messens W, Uyttendaele M, Debevere J, Herman L. Influence of eggshell condensation on eggshell penetration and whole egg contamination with *Salmonella enterica* serovar *Enteritidis*. *Journal of Food Protection*. 2006;69(7):1539-1545. doi:10.4315/0362-028X-69.7.1539.
35. Gole VC, Roberts JR, Sexton M, May D, Kiermeier A, Chousalkar KK. Effect of egg washing and correlation between cuticle and egg penetration by various *Salmonella* strains. *International Journal of Food Microbiology*. 2014;182-183:18-25. doi:10.1016/j.ijfoodmicro.2014.04.030.
36. Lasagabaster A, Arbolea JC, de Marañón IM. Pulsed light technology for surface decontamination of eggs: Impact on *Salmonella* inactivation and egg quality. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2011;12(2):124-128. doi:10.1016/j.ifset.2011.01.007.
37. Gottselig SM, Dunn-Horrocks SL, Woodring KS, Coufal CD, Duong T. Advanced oxidation process sanitization of eggshell surfaces. *Poultry Science*. 2016;95(6):1356-1362. doi:10.3382/ps/pev450.
38. Coronel-Reyes J, Ramirez-Morales I, Fernandez-Blanco E, Rivero D, Pazos A. Determination of egg storage time at room temperature using a low-cost NIR spectrometer and machine learning techniques. *Computers and Electronics in Agriculture*. 2018;145:1-10. doi:10.1016/j.compag.2017.12.030.
39. Cruz-Tirado JP, da Silva Medeiros ML, Barbin DF. On-line monitoring of egg freshness using a portable NIR spectrometer in tandem with machine learning. *Journal of Food Engineering*. 2021;306:110643. doi:10.1016/j.jfoodeng.2021.110643.
40. Mihalache OA, Monteiro MJ, Dumitrascu L, Neagu C, Ferreira V, Guimarães M, Borda D, Teixeira P, Nicolau AI. Pasteurised eggs - A food safety solution against *Salmonella* backed by sensorial analysis of dishes traditionally containing raw or undercooked eggs. *International Journal of Gastronomy and Food Science*. 2022;28:100547. doi:10.1016/j.ijgfs.2022.100547.