

La innovación de la cavitación hidrodinámica en la elaboración de cerveza: eficiencia, calidad y el papel central de CDR BeerLab®

Dr. Francesca Bruni, investigadora del Laboratorio Químico del CDR "Francesco Bonicolini"

P2604

1. Introducción: el cambio de paradigma en la producción de brassicultura

La industria cervecera moderna está experimentando una transición fundamental, evolucionando desde una práctica tradicionalmente establecida hacia una frontera de ingeniería de procesos de alta precisión. El reto para los cerveceros contemporáneos es doble: reducir la huella energética de los procesos y maximizar la retención de compuestos bioactivos sensibles al calor, preservando al mismo tiempo la integridad organoléptica del producto final.

En este escenario, la cavitación hidrodinámica (HC) ha surgido como el "cambio de juego" tecnológico. No se trata de una optimización incremental, sino de un cambio de paradigma capaz de integrar y sustituir etapas críticas como la maceración y la ebullición, operando a micro y nanoescala. Sin embargo, la adopción industrial de tales tecnologías requiere una validación analítica rigurosa. En este sentido, el sistema **CDR BeerLab®** representa un punto fundamental para el control del proceso, proporcionando los datos necesarios para traducir la compleja dinámica de fluidos en una excelencia operativa certificada y en la calidad deseada del producto final.

2. Fundamentos tecnológicos de la cavitación hidrodinámica (HC)

La cavitación hidrodinámica es un fenómeno físico caracterizado por la formación, crecimiento y posterior implosión de burbujas de vapor en un líquido, desencadenada por una caída de la presión local por debajo de la presión de vapor. Al colapsar las burbujas, se liberan energías mecánicas localizadas (ondas de choque y microchorros) y temperaturas puntuales extremas, al tiempo que se mantiene una temperatura aparente moderada.

Para el tratamiento de mostos de alta viscosidad con cargas de sólidos en suspensión, el **reactor de tubo Venturi** ha demostrado ser superior desde el punto de vista técnico a las placas de orificio, ya que proporciona estabilidad fluidodinámica y reduce drásticamente el riesgo de ensuciamiento u obstrucción. El control de la intensidad del proceso se rige por el **número de cavitación (σ)**, definido por la relación entre las presiones estática y dinámica. Datos experimentales avanzados confirman que la eficiencia de letalidad de la levadura no es lineal, sino que tiene dos máximos locales críticos en $\sigma = 0,3$ y $\sigma = 1,7$, que son parámetros fundamentales para el ajuste fino del reactor.

Desde el punto de vista termodinámico, el HC ofrece ventajas únicas:

- **Calentamiento Semi-Adiabático:** La energía mecánica suministrada por la bomba se convierte directamente en calor por fricción volumétrica interna, eliminando la necesidad de

superficies de intercambio de calor de alta temperatura.

- **Ausencia de gradientes térmicos:** El calentamiento uniforme del volumen de fluido evita la formación de "puntos calientes", eliminando el riesgo de caramelización de los azúcares y preservando la estabilidad del color (EBC).
- **Eficacia cinética:** La desintegración celular y la extracción del almidón tienen lugar mecánicamente, lo que acelera drásticamente la cinética enzimática.

3. Análisis operativo: eficiencia energética y mejora de la extracción

En el marco del **proyecto T.I.L.A. (Innovative Technology for Food Liquids)**, se exploró la tecnología de la cavitación al servicio de la producción de latón para reducir el tiempo de trabajo y el consumo de energía. Las pruebas experimentales recogidas durante los ensayos muestran una clara diferencia entre el proceso tradicional (TR) y el proceso asistido por cavitación (HC). La tecnología HC simplifica la arquitectura de la planta al eliminar el picado en seco y reducir drásticamente los tiempos de ebullición.

Parámetros de funcionamiento	Proceso tradicional (TR)	Proceso HC (CAVIBEER)	Mecanismo físico dominante
Consumo de energía (ciclo)	Referencia 100%	Reducción > 30-40%	Eliminación de la ebullición y reducción de la pérdida de calor
Inactivación de la levadura (energía)	Referencia 100%	Reducción ~ 20%	Sinergia entre estrés mecánico y térmico
Tiempos de procesado	Ciclo estándar	Reducción > 50%	Aceleración de la transferencia de masa y de la sacarificación
Eficacia de extracción del almidón	Estándar	Aumento del 30%	Desintegración mecánica de los granos
Temperatura de sacarificación	~ 68-70°C	~ 33-35°C	Reducción del gradiente de ~35°C por medios mecánicos

La reducción de la temperatura de sacarificación a ~**33-35°C** no es sólo un ahorro térmico, sino una transformación de la cinética del proceso que minimiza el estrés oxidativo de los precursores del aroma.

4. Excelencia cualitativa y perfiles bioactivos

La cavitación hidrodinámica mejora enormemente la calidad nutricional de la cerveza. En lugar de destruir o perder los valiosos compuestos del lúpulo, como ocurre en la elaboración tradicional con ebullición fuerte y prolongada, este método los protege e incluso aumenta su

presencia en el producto final. He aquí las principales ventajas:

● **Xanthohumol (XN) y DMX (desmetilxanthohumol):**

Se trata de dos flavonoides prenilados superimportantes en el lúpulo, conocidos por sus propiedades antioxidantes, antiinflamatorias y potencialmente protectoras contra ciertas enfermedades. En la ebullición clásica, casi todo el xanthohumol se transforma en una forma menos activa (isoxanthohumol). Con la cavitación hidrodinámica (HC), esta transformación se reduce considerablemente.

En una muestra analizada durante los ensayos del proyecto, la cantidad de DMX aumentó incluso un 136% con respecto a la cantidad inicial: el proceso protegió prácticamente al 100% estos valiosos compuestos.

● **6-Geraniilnaringenina (6-GN):**

Se trata de otro compuesto raro y muy bioactivo del lúpulo, que aporta beneficios antioxidantes y de otro tipo. La cavitación favorece enormemente su formación a partir de precursores presentes en el lúpulo.

En la misma muestra con una concentración elevada de DMX, se alcanzaron 55 µg/L, un nivel muy alto que supera el típico de las ales ligeras y se acerca al de las cervezas oscuras, normalmente más ricas en este compuesto. La conversión fue del 20,9%, mientras que en el método tradicional es prácticamente nula.

● **Pasteurización suave para proteger los aromas:**

Para que la cerveza sea estable y segura, eliminando las levaduras residuales como *Saccharomyces cerevisiae*, suele ser necesario calentar a altas temperaturas (como 62-63 °C). Con la cavitación, bastan 52 °C para inactivar el 90% de la levadura.

Es una especie de "pasteurización en frío": los delicados aromas volátiles del lúpulo, como los aromas frescos, herbáceos y cítricos, se conservan mucho mejor, porque no se "cuelen" con un calor excesivo.

● **Reducción del gluten para producir cervezas "reducidas en gluten" o sin gluten con cereales tradicionales:**

La prolina es la parte más "obstinada" del gluten, la que más se resiste a la digestión y crea problemas a las personas sensibles.

Aplicando regímenes de cavitación específicos durante la cocción y la fermentación, esta prolina puede descomponerse de forma natural, sin enzimas añadidas ni cambios radicales en la receta.

El resultado: se pueden producir cervezas con un contenido de gluten muy bajo o incluso "sin gluten" según las normas, utilizando cebada o trigo normales y manteniendo el sabor y el estilo tradicionales.

En pocas palabras: esta tecnología no sólo ahorra energía y hace que el proceso sea más eficiente, sino que también

produce una cerveza más rica en compuestos de lúpulo saludables, más aromática, más estable y potencialmente adecuada incluso para aquellos con baja tolerancia al gluten. Se trata de un importante paso adelante hacia cervezas de alta calidad y más "funcionales".

5. El papel de CDR BeerLab®: optimización y validación científica

En los experimentos CNR, el CDR BeerLab® no fue una simple herramienta de monitorización, sino el dispositivo principal para validar los modelos matemáticos de letalidad de las levaduras (FT térmico y FC cavitacional). La precisión fotométrica permitió calibrar rigurosamente estos modelos, cuantificando la reducción de la viabilidad celular en función de los regímenes de cavitación aplicados. Sin esta precisión, la optimización de los parámetros fluidodinámicos seguiría siendo teórica.

Ajuste inmediato del proceso: lo que CDR BeerLab® puede hacer en la práctica

Gracias a un análisis rápido y preciso, puede ajustar su proceso en tiempo real:

- Control de **IBU** y **XN**: ajusta la válvula de presión para optimizar el número de cavitación σ en función de la extracción de lúpulo.
- **Análisis de azúcares**: indica la viabilidad de la levadura residual, validando los modelos de letalidad in situ (más azúcares residuales = menos levadura viva).
- Determinación de la estabilidad del **color** y del **alcohol**: verifica la ausencia de oxidación y la regularidad de la fermentación tras la cavitación.

La precisión de CDR BeerLab® permitió correlacionar los datos reales con la letalidad, identificando experimentalmente picos de máxima eficacia a $\sigma = 0,3$ y $\sigma = 1,7$.

Con estas mediciones fotométricas continuas, los investigadores confirmaron y optimizaron el proceso de forma concreta y fiable.

6. Conclusiones: Hacia la cervecería 4.0

La integración de la tecnología CAVIBEER y la precisión analítica de **CDR BeerLab®** marca el rumbo de la elaboración industrial de cerveza del futuro. Los resultados son inequívocos: ahorro energético superior al 30%, reducción a la mitad de los tiempos de ciclo y un perfil bioactivo mejorado.

La sinergia entre una avanzada ingeniería de fluidos y un estricto control de calidad es la piedra angular de una producción sostenible, saludable y técnicamente superior. La transición hacia una cervecería 4.0 pasa necesariamente por esta unión de innovación mecánica y certidumbre analítica.