

Utilización del tiempo de vuelo para el seguimiento de coagulación de leche

Budelli E.¹, Pérez N.², Barrios S.¹, Ares G.³, Canetti R.⁴, Negreira C.⁵, Lema P.¹

¹Instituto de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

²Polo Agroalimentario Agroindustrial. Centro Universitario de Paysandú, Universidad de la República.

³Departamento de Ciencia y Tecnología de Alimentos. Facultad de Química, Universidad de la República.

⁴Instituto de Ingeniería Eléctrica, Facultad de Ingeniería, Universidad de la República.

⁵Laboratorio Acústica Ultrasonora, Instituto de Física, Facultad de Ciencias, Universidad de la República.

email: ebudelli@fing.edu.uy

Palabras clave: ultrasonido, monitoreo en línea, queso, coagulación.

Resumen

El cambio en la velocidad de propagación de ondas ultrasónicas ha sido propuesto como un método para el monitoreo en línea del proceso de coagulación enzimática de leche para la fabricación de queso. El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de la condición de contorno de temperatura sobre las medidas de tiempo de vuelo (t_v) de ondas de compresión durante este proceso.

La coagulación se realizó utilizando leche pasteurizada entera a 35 °C adicionada de CaCl_2 y quimosina. Se realizaron medidas de textura instrumental y ultrasónicas en paralelo. Se registró la fuerza en función del tiempo mediante ensayos de extrusión inversa con una sonda cilíndrica plana en un texturómetro TA.XT2i. Para las medidas ultrasónicas se utilizó una celda prismática, en la cual se introdujo un transductor de 3.5 MHz en una de las paredes laterales, registrándose el primer eco reflejado en la pared opuesta. Para este eco se calculó la variación en el t_v durante el proceso de coagulación.

Durante el proceso de coagulación la fuerza máxima y el t_v aumentaron, mientras que la temperatura dentro de la celda de ultrasonido descendió. Se obtuvo una buena correlación entre el t_v y la fuerza máxima ($R^2=0.94$) y entre el t_v y la temperatura ($R^2=0.93$). Cuando la temperatura de contorno se mantuvo igual que la del medio se registró un aumento en la fuerza máxima pero variaciones no significativas en el t_v .

Estos resultados permiten concluir que las variaciones en el t_v responden a variaciones en la temperatura dentro de la celda de coagulación y no a cambios en la estructura durante el proceso. Esto limita la aplicación de esta técnica para el monitoreo de la coagulación de la leche.

Introducción

Una de las dificultades que enfrenta la industria quesera en Uruguay en la actualidad es la falta de técnicas para el monitoreo objetivo en línea del proceso de elaboración. Esto afecta la estandarización de su producto final así como el rendimiento.

Dado que son muchos los parámetros que inciden en las características finales de un queso y en su calidad, es necesario monitorear y controlar variables del proceso de producción de modo de obtener productos con las características deseadas.

Una etapa del proceso de producción que resulta fundamental en el rendimiento y la calidad del producto final es la coagulación. Esta etapa implica la transformación de la leche líquida en un coágulo viscoelástico semi-sólido debido a la acción de enzimas específicas (Bulent Koc et al., 2008).

En particular, debe determinarse de la forma más precisa posible el instante en que se interrumpe el proceso de coagulación, llamado punto de corte del coágulo. Si el coágulo se corta cuando está demasiado débil, la estructura no es capaz de retener la grasa y otros componentes del queso que hacen a su calidad y al rendimiento quesero. Si el coágulo es cortado cuando está demasiado firme, la sinéresis se retarda, resultando en un queso de alta humedad que requerirá una maduración prolongada (Benedito et al., 2002). Por lo tanto, la estimación del tiempo de corte del coágulo de forma rápida y confiable afecta significativamente el rendimiento y las características físicas y sensoriales del queso (Bulent Koc et al., 2008). La implementación de controles y especificaciones en esta etapa son importantes para asegurar la uniformidad del producto final.

En los últimos años se ha verificado una clara tendencia a la investigación de métodos no destructivos que permitan monitorear la etapa de coagulación (Bulent Koc et al. 2008, Klandar et al. 2007, Buckin et al. 2003). La tecnología de ultrasonido aparece como una alternativa promisorio para el control en línea debido a que es no destructiva, automatizable, rápida y de bajo costo (Nassar et al., 2001; Gunasekaran et al., 1999, Bakkali et al., 2001).

En base a esto se decidió evaluar el uso de ondas de compresión para el monitoreo de coagulación de leche. La elección de la velocidad de propagación para el seguimiento del proceso se basó en que la velocidad de una onda ultrasónica al propagarse en un fluido depende de la rigidez y la densidad del mismo. Al variar estos parámetros durante la experiencia, varía la velocidad de propagación. Sin embargo, esta magnitud acústica presenta también una gran dependencia con la temperatura, por lo que es de interés estudiar la influencia de este parámetro.

El objetivo de este trabajo fue estudiar la influencia de la condición de contorno de temperatura sobre las medidas de tiempo de vuelo ($t_v = d/vel$) de ondas de compresión durante el proceso de coagulación enzimática de leche.

Materiales y Métodos

Muestras

Se utilizó leche pasteurizada entera (2,6% de grasa, 3,1% de proteínas). Se trabajó con quimosina obtenida por fermentación de *Escherichia coli* con una actividad de 600 IMCU/mL (Jucar Ltda., Nueva Helvecia, Uruguay) y con CaCl_2 de calidad analítica.

Coagulación

Se calentó la leche en horno microondas hasta una temperatura de 35 °C y se agregó el CaCl_2 en una concentración de 0,02 g/L. Parte de esta mezcla se destinó a la celda del equipo de medición por ultrasonido (450 mL). Se dejó estabilizar la temperatura en la misma, se agregó la solución de quimosina en una concentración de 0,2 mL/L y se agitó.

Paralelamente, al volumen de mezcla restante se agregó la solución de quimosina en la misma concentración, se agitó y se distribuyó en 20 vasos de bohemia de 200 mL, los que se llevaron a un baño de agua a la temperatura de ensayo. Estos vasos se destinaron a las medidas de textura instrumental.

Para ambas medidas, se comenzó a medir el tiempo a partir del agregado de cuajo.

Ensayos de extrusión inversa

Se utilizó un texturómetro Texture Analyzer TA.XT2i (Stable Micro Systems, Godalming, UK), y se realizó una extrusión inversa utilizando una sonda cilíndrica plana de 4 cm de diámetro. Las condiciones de ensayo fueron las siguientes: velocidad de preensayo = 2 mm/s, velocidad de ensayo = 1 mm/s, velocidad de postensayo = 2 mm/s, distancia de penetración = 5 mm. Se registró la fuerza en función del tiempo utilizando el software Texture Expert Exceed (Stable Micro Systems, Godalming, UK). De las curvas se determinó la fuerza máxima de extrusión, la cual se relaciona con la dureza del coágulo.

Medidas de tiempo de vuelo ultrasónico

Para las medidas ultrasónicas se utilizó una celda prismática de 450 mL sumergida en un baño de agua (Figura 1). Se introdujo un transductor de 3.5 MHz a través de una de las paredes laterales, registrándose el primer eco reflejado en la pared opuesta. Para este eco se calculó la variación en el tiempo de vuelo durante el proceso de coagulación utilizándose la técnica de correlación cruzada. Para ello, se tomó como referencia para el tiempo de vuelo el primer pulso de ultrasonido, por lo que todos los tiempos calculados fueron relativos a éste. Se monitoreó la temperatura en el centro de la celda durante el proceso de coagulación.

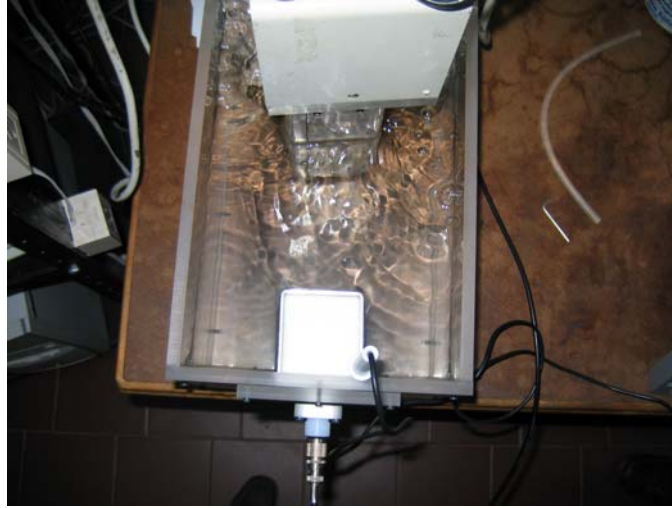


Figura 1. Set-up experimental para medidas de tiempo de vuelo

Resultados y Discusión

La Figura 2 muestra la evolución de la fuerza máxima de extrusión para dos ensayos de coagulación. Se observó un aumento en esta fuerza correspondiente al aumento de dureza del coágulo a lo largo del proceso de coagulación.

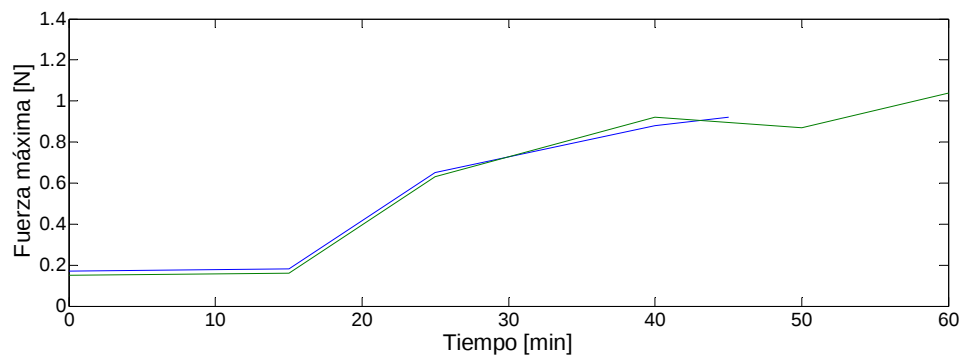


Figura 2. Fuerza máxima de extrusión en función del tiempo de coagulación

Los resultados obtenidos en la celda de ultrasonido pueden observarse en la Figura 3, en la que se muestra la evolución del tiempo de vuelo y la temperatura en el centro de la celda durante el proceso de coagulación.

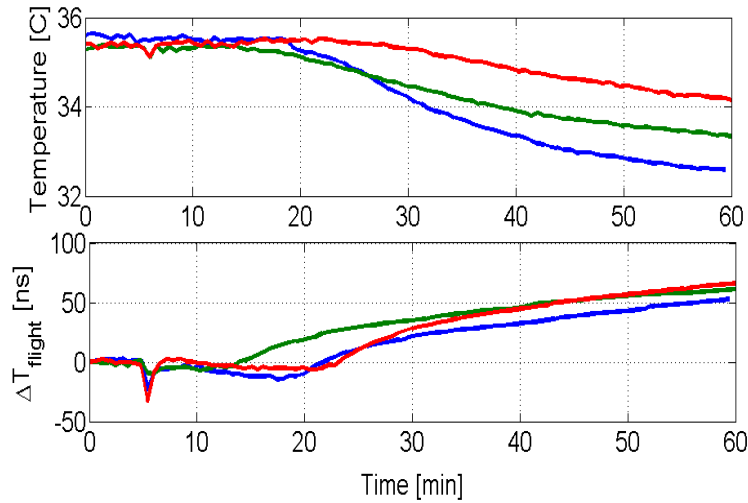


Figura 3. Evolución de la temperatura y del tiempo de vuelo en función del tiempo de coagulación. El agregado de quimosina se realizó en el minuto 5.

El tiempo de vuelo presentó un aumento aproximadamente 15 minutos después del agregado del cuajo. La evolución del t_v presentó una buena correlación con las medidas de fuerza máxima obtenidas por extrusión inversa ($R^2=0.94$). Analizando los datos de temperatura se encontró que también presentaron una buena correlación con las medidas de tiempo de vuelo ($R^2=0.93$).

En base a estos resultados se decidió monitorear la evolución del tiempo de vuelo durante la coagulación en condiciones adiabáticas. En estas condiciones la temperatura no varió significativamente durante el proceso y tampoco se registraron cambios significativos en el tiempo de vuelo.

Se estudió la variación del tiempo de vuelo en función de la temperatura para la mezcla antes del agregado de cuajo (Figura 4). Se observó que las variaciones en el tiempo de vuelo obtenidas para un cambio de 2 °C dentro de la celda (variación observada en las experiencias de coagulación) eran del orden de las variaciones totales del tiempo de vuelo en la experiencia de coagulación

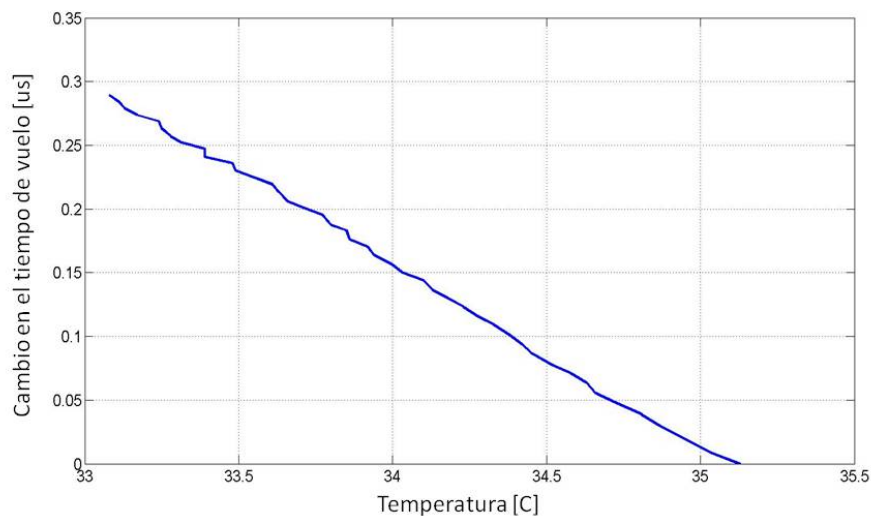


Figura 4. Tiempo de vuelo en función de la temperatura en una mezcla sin agregado de cuajo.

Conclusiones

Los resultados obtenidos permitieron concluir que las variaciones en el tiempo de vuelo durante la coagulación enzimática de leche están influidas por las condiciones de contorno en relación a la temperatura. Aunque la bibliografía reporta el uso del tiempo de vuelo para el seguimiento de la coagulación, solo se reportan resultados a escala de laboratorio, sin considerar la limitación de la influencia de la temperatura en las condiciones de contorno. No existen reportes sobre ensayos realizados a escala industrial. Los resultados obtenidos en nuestro estudio muestran que se obtienen variaciones significativas en el tiempo de vuelo cuando hay diferencia entre la temperatura ambiente y la temperatura de la mezcla dado que el cambio de estructura afecta la velocidad de intercambio de calor. Esto limita la aplicación de esta técnica para el monitoreo de la coagulación de la leche a escala industrial, donde el control del intercambio de calor no es factible.

Referencias

- Bakkali, F., Moudden, A., Faiz, B., Amghar, A., Maze, G., Montero, F., Akhnak, M. 2001 Ultrasonic measurement of milk coagulation time. *Meas. Sci. Technol.* 12, 2154-2159.
- Benedito J., Carcel J.A., Gonzalez R., Mulet A. 2002. Application of low intensity ultrasonics to cheese manufacturing processes. *Ultrasonics* 40, 19 – 23
- Buckin V., O'Driscoll B., Smyth C. 2003. Ultrasonic Spectroscopy for material analysis. *Recent advances. Spectroscopy Europe* 15/1 – 2003.

Bulent Koc A., Barbaros O. 2008. Nondestructive monitoring of renneted whole milk during cheese manufacturing Food research international. vol. 41, no7, pp. 745-750.

Gunasekaran, S., Ay, C. 1999. Evaluating milk coagulation with ultrasonics. Sem. Food Anal, 4 (2), 161-173, 1999.

Klandar A.H., Lagaude A., Chevalier-Lucia D. 2007. Assessment of the rennet coagulation of skim milk: A comparison of methods. International Dairy Journal 17, 1151–1160

Nassar G., Nongaillard B., Noël Y. 2001. Monitoring of milk gelation using a low frequency ultrasonic technique. Journal of Food Engineering 48, 351 – 359