

RENDIMIENTO DE DOS SISTEMAS DE MEZCLADO EN LA PRODUCCIÓN DE YOGUR BATIDO

PERFORMANCE OF TWO MIXING SYSTEMS ON STIRRED YOGURT PRODUCTION

Teodoro Espinosa-Solares*, Arturo Hernández-Montes, Benjamín Bautista-Reyes, Leticia Cruz-Pioquinto, Armando Santos-Moreno, Salvador Valle-Guadarrama

Departamento de Ingeniería Agroindustrial, Universidad Autónoma Chapingo.

Carretera México-Texcoco km 38.5. Chapingo, Estado de México,

C.P. 56230. MÉXICO. Tel.: (+52) 595 952 1569

Correo-e: t.espinosa.s@taurus.chapingo.mx (* Autor para correspondencia)

RESUMEN

Se evaluaron dos equipos utilizados para la producción de yogur batido. El primero fue un impulsor coaxial ancla-ancla modificada; el segundo un agitador doble helicoidal. El rendimiento de los sistemas de mezclado fue evaluado utilizando el tiempo de enfriamiento, la sinéresis, y el análisis sensorial. Los resultados del tiempo de enfriamiento para ambos sistemas de mezclado mostraron que el agitador doble helicoidal necesita menos tiempos de enfriamiento que el impulsor coaxial tipo ancla. No hubo diferencias estadísticas en la sinéresis de los yogures hechos en los distintos recipientes de mezclado. El análisis sensorial se evaluó tomando en cuenta la prueba de diferencia de control, el análisis descriptivo cuantitativo, y la prueba de preferencia. Estos experimentos mostraron que la mejor calidad se obtuvo utilizando un agitador doble helicoidal a 45 rpm. A partir de los hallazgos, es posible sugerir la producción de yogur batido en tanques pequeños con un agitador doble helicoidal a 45 rpm.

PALABRAS CLAVE: Impulsor doble helicoidal, agitador de ancla, tanque multitarea, tiempo de enfriamiento, sinéresis, análisis sensorial.

ABSTRACT

Two mixing devices used for stirred yogurt production were evaluated. One system had two coaxial impellers, an anchor and a modified anchor; the other had a double helical ribbon agitator. The performance of the mixing systems was evaluated using cooling time, syneresis, and sensory analysis. Cooling time results for both mixing systems showed that the double helical ribbon system needed shorter cooling times than the coaxial anchor-modified anchor one. There were no statistical differences in syneresis of the yogurts made in the different mixing vessels. Sensory analysis was evaluated considering difference-from-control test, quantitative descriptive analysis, and preference test. These experiments showed that the best quality was obtained using a double helical ribbon device at 45 rpm. In light of the findings, it is possible to suggest stirred yogurt production in small tanks with a double helical ribbon mixing system at 45 rpm.

KEYWORDS: Double helical ribbon impeller, anchor agitator, multi-task tank, cooling time, syneresis, sensory analysis.



INAGBI

Recibido: 31 de julio de 2014

Aceptado: 11 de diciembre de 2014

doi: 10.5154/r.inagbi.2014.07.006

La producción industrial de yogur batido se lleva a cabo normalmente mediante procesos automatizados, en el que la calefacción, la fermentación, la refrigeración y el mezclado se producen en distintas partes del equipo. Sin embargo, para la producción de yogur en una empresa pequeña, todos los procesos de producción pueden llevarse a cabo en un recipiente multitarea. Por lo tanto, este equipo tiene que ser lo suficientemente versátil como para manejar todos los pasos de la producción de yogur. El enfriamiento es un paso importante en la producción de yogur, pues durante el enfriamiento se reduce la actividad metabólica del cultivo iniciador y se controla la acidez del yogur (Tamime & Deeth, 1980). Además, el comportamiento de adelgazamiento de cizalla del yogur (Hassan, Frank, Schmidt, & Shalabi, 1996; Keogh & O'Kennedy, 1998; Ramaswamy & Basak, 1991) dificulta esta tarea. Durante el proceso ocurren cambios en las propiedades reológicas, y se debe considerar el riesgo de daño mecánico en el yogur batido a partir del mezclado excesivo.

Existen varios métodos para la producción de yogur en un tanque multitarea. Estos equipos incluyen predominantemente tanques encaquetados, la mayoría de ellos basados en impulsores de ancla y paletas (Tamime & Deeth, 1980). Para un buen desempeño durante los procesos de calentamiento y enfriamiento es necesario contar con equipos de mezclado con impulsores de ancla. Por ejemplo, el tanque Paasch Silkeborg, descrito por Tamime y Deeth (1980), tiene dos distintos impulsores de paletas. El primero agitador es un impulsor de superficie raspada que gira a 7 rpm, y el segundo agitador es una paleta helicoidal montada en el centro que gira a 15 rpm. Las velocidades lentas de agitación se usan para maximizar la eficiencia del mezclado y minimizando el cizallamiento. Sin embargo, se ha demostrado que, para la transferencia de calor en productos altamente viscosos, los impulsores helicoidales son mejores que los agitadores de ancla (Brito-de la Fuente, Nuñez, & Tanguy, 1997; Niedzielska & Kuncewicz, 2005).

Coyle, Hirschland, Michel, y Oldshue (1970) compararon la eficacia del mezclado con agitadores helicoidales y de ancla. Los coeficientes de transferencia de calor fueron un 20-30 % mayor para los impulsores helicoidales que para los agitadores de ancla con el mismo diámetro para el mismo consumo de energía. Kaminoyama, Akabane, Arai, Saito, y Kamiwano (1994), trabajando con suspensiones acuosas de CaCO_3 y agitadores de ancla, mostraron que los impulsores de ancla no acrecentan un movimiento importante del fluido en la dirección axial, reduciendo el intercambio de líquido en el tanque, lo que limita el mezclado; este hallazgo fue confirmado por Bertrand, Tanguy y Brito-de la Fuente (1996). Por otro lado, Takahashi, Yokota, Furukawa, y Harada (1994) realizaron experimentos físicos que demuestran que los helicoidales tienen un efecto de bombeo en la dirección axial en soluciones de jarabe de maíz (de 4 a 20 Pa·s) que mejoran el

Industrial stirred yogurt production is usually carried out using automated processes, in which heating, fermenting, cooling and mixing take place in several different pieces of equipment. However, for yogurt production in a small company, all the production processes may take place in a single multi-task vessel. Thus, this equipment has to be versatile enough to handle all the steps in yogurt production. Cooling is a critical step in yogurt production, because during cooling, the metabolic activity of the starter culture is reduced and yogurt acidity is controlled (Tamime & Deeth, 1980). Moreover, the shear-thinning behavior of yogurt (Hassan, Frank, Schmidt, & Shalabi, 1996; Keogh & O'Kennedy, 1998; Ramaswamy & Basak, 1991) makes the task more difficult. Changes in rheological properties take place during the process, and the risk of mechanical damage to stirred yogurt from excessive mixing must be considered.

There are several methods for producing yogurt in a multi-task tank. These devices include predominantly jacketed tanks, most of them based on anchor and paddled impellers (Tamime & Deeth, 1980). Mixing devices with anchor impellers are claimed to perform well during heating and cooling processes. For example, the Paasch and Silkeborg tank, described by Tamime and Deeth (1980), has two different paddle impellers. The first agitator is a scraped-surface impeller that rotates at 7 rpm, and the second agitator is a centrally-mounted helical paddle rotating at 15 rpm. Slow agitation speeds are used to maximize the efficiency of mixing and minimizing shearing. However, it has been shown that, for heat transfer in highly viscous products, helical ribbon impellers are better than anchor agitators (Brito-de la Fuente, Nuñez, & Tanguy, 1997; Niedzielska & Kuncewicz, 2005).

Coyle, Hirschland, Michel, and Oldshue (1970) compared the effectiveness of mixing for helical ribbon and anchor agitators. The heat transfer coefficients were 20 to 30 % higher for ribbon impellers than for anchor agitators of the same diameter at the same power consumption. Kaminoyama, Akabane, Arai, Saito, and Kamiwano (1994), working with CaCO_3 slurries and anchor agitators, showed that anchor impellers do not promote an important movement of the fluid in the axial direction, thereby reducing the interchange of fluid in the tank and limiting the mixing; this finding was confirmed by Bertrand, Tanguy, and Brito-de la Fuente (1996). On the other hand, Takahashi, Yokota, Furukawa, and Harada (1994) conducted physical experiments showing that helical ribbons have a pumping effect in the axial direction in corn syrup solutions (4 to 20 Pa·s), thereby improving the mixing process. Several studies have reported well-distributed flow patterns for helical ribbon impellers. For example, Tanguy, Thibault, Brito-de la Fuente, Espinosa-Solares, and Tecante (1997), working with Newtonian and non-Newtonian fluids, showed that a helical ribbon agitator produced a dominant flow pat-

proceso de mezclado. En varios estudios se han reportado patrones de flujo bien distribuidos para los impulsores helicoidales, como un ejemplo, Tanguy, Thibault, Brito-de la Fuente, Espinosa-Solares y Tecante (1997), trabajando con fluidos newtonianos y no newtonianos, mostraron que un agitador helicoidal produjo un patrón de flujo dominante que apenas fue modificado por la acción de una turbina Rushton incorporada en el tanque de mezcla girando seis veces más rápido que el impulsor helicoidal. Por otra parte, de la Villeon et al. (1998) compararon la eficacia del mezclado de tres impulsores: un helicoidal, doble helicoidal, y doble helicoidal con tornillo central. Estos autores concluyeron que para los fluidos de adelgazamiento de cizalla, los impulsores doble helicoidal fueron más eficientes que los otros y que al añadir un tornillo central no se mejoró el mezclado de manera significativa. Es importante señalar que los equipos de mezclado basados en un impulsor helicoidal han sido reportados como equipos muy útiles para tratar con fluidos que evolucionan reológicamente (Espinosa-Solares, Brito-de la Fuente, Tecante, & Tanguy, 1997a), como es el caso del yogur, en particular, cuando la transferencia de calor y la complejidad reológica están involucradas. Brito-de la Fuente et al. (1997) reportaron una mejor distribución de temperatura en fluidos no newtonianos con agitadores helicoidales que con impulsores de ancla. Así, los sistemas de mezclado basados en impulsores helicoidales son sugeridos como alternativas para la producción de yogur en equipos multitarea.

Han habido muchos reportes sobre cómo las condiciones del proceso afectan la calidad del yogur. Abrahamsen y Holmen (1981) informaron que el yogur elaborado con leche de cabra concentrada y homogeneizada tuvo mejor consistencia que los yogures elaborados con leche no homogeneizada. Parnell-Clunies, Kakuda, Mullen, Arnott y De Man (1986) reportaron que la firmeza y viscosidad del yogur fue mayor en yogur pasteurizado en lote (85 °C de 10 a 40 min) que en yogures calentados constantemente (98 °C de 0.5 a 1.87 min o 140 °C de 2 a 8 s). La evaluación sensorial indicó una preferencia general por yogur hecho a partir de leche expuesta por poco tiempo a altas temperaturas (98 °C durante 1.87 min). Por otra parte, de Ancos, Pilar-Cano y Gómez (2000) encontraron que el yogur expuesto a alta presión hidrostática (250 a 400 MPa) mostró mayor viscosidad en comparación que el yogur sin tratamiento. Los datos del análisis sensorial mostraron que los yogures tratados a 200 y 300 MPa tuvieron los valores más altos de aceptabilidad, aroma/sabor y textura en general. En contraste, el yogur tratado a 400 MPa fue calificado como insípido y mostró sinéresis alta.

Estos estudios indican que las condiciones del proceso juegan un papel importante en las características finales del yogur. Sin embargo, no existen datos publicados sobre la influencia de las condiciones de mezclado mediante impulsores de proximidad (impulsores helicoidal y de ancla) en las características del yogur. En la literatura se sugiere el uso de impulsores de ancla para la produc-

ción de que es hardly modified by the action of a Rushton turbine incorporated into the mixing tank rotating six times faster than the helical ribbon impeller. Moreover, de la Villeon et al. (1998) compared the mixing efficiency of three impellers: a single helical ribbon, a double helical ribbon, and a double helical ribbon with a central screw. These authors concluded that for shear-thinning fluids the double helical-ribbon impellers were more efficient than the others and that adding a central screw did not enhance mixing significantly. It is important to note that mixing devices based on a helical ribbon impeller have been reported as very useful devices for dealing with rheologically evolving fluids (Espinosa-Solares, Brito-de la Fuente, Tecante, & Tanguy, 1997a), as is the case with yogurt, in particular when heat transfer and rheological complexity are involved. Brito-de la Fuente et al. (1997) reported a better temperature distribution in non-Newtonian fluids with helical ribbon agitators than with anchor impellers. Thus, mixing systems based on helical ribbon impellers are suggested as alternatives for yogurt production in multi-task equipment.

There have been numerous reports on how processing conditions affect yogurt quality. Abrahamsen and Holmen (1981) reported that yogurt made from homogenized concentrated goat milk had better consistency than did yogurts made from non-homogenized milk. Parnell-Clunies, Kakuda, Mullen, Arnott, and DeMan (1986) reported that firmness and viscosity of yogurt were higher in vat pasteurized (85 °C for 10 to 40 min) yogurt than in continuous heated (98 °C for 0.5 to 1.87 min or 140 °C for 2 to 8 s) yogurts. Sensory evaluation indicated an overall preference for yogurt made from high temperature, short time (98 °C for 1.87 min) milk. Moreover, de Ancos, Pilar-Cano, and Gómez (2000) found that yogurt treated by high hydrostatic pressure (250 to 400 MPa) presented higher viscosity than the viscosity of the untreated yogurt. The sensory analysis data showed that yogurts treated at 200 and 300 MPa scored highest for general acceptability, flavor/taste and texture. In contrast, yogurt treated at 400 MPa was rated tasteless and showed high syneresis.

These studies indicate that processing conditions play an important role in the final characteristics of yogurt. However, there are no available published data regarding the influence of mixing conditions by proximity impellers (helical ribbon and anchor impellers) on yogurt characteristics. The literature suggests the use of anchor impellers for yogurt production (Tamime & Deeth, 1980). However, helical ribbon impellers have also been proposed for dealing with rheologically evolving fluids (Espinosa-Solares et al., 1997a), such as yogurt. Therefore, the aim of this article was to compare the performance of two mixing systems, double anchor impellers and a double helical ribbon agitator, for yogurt production in small tanks. For the comparison, three criteria were used: cooling time, syneresis, and sensory evaluation.

ción de yogur (Tamime & Deeth, 1980). Sin embargo, los impulsores helicoidales también han sido propuestos para tratar con fluidos que evolucionan reológicamente (Espinosa-Solares et al., 1997a), como el yogur. Por ello, el objetivo de este trabajo es comparar el desempeño de dos sistemas de mezclado, impulsores de doble ancla y un agitador doble helicoidal, para la producción de yogur en tanques pequeños. Para la comparación, se utilizaron tres criterios: tiempo de enfriamiento, sinéresis, y evaluación sensorial.

MATERIALES Y MÉTODOS

Equipos de mezclado

Se utilizaron dos sistemas de mezclado. El primero conocido como sistema doble helicoidal (DH), el cual se muestra en la Figura 1. Este sistema es análogo con respecto al impulsor presentado por Villeon et al. (1998) con relaciones geométricas similares a los utilizados por Espinosa-Solares et al. (1997a) en un impulsor helicoidal de turbina Rushton, pero se añadió un segmento helicoidal inferior al agitador con el fin de promover un efecto de bombeo. El diámetro del impulsor fue de 0.34 m. El segundo sistema de mezclado, conocido como ancla-ancla modificada (A-AM), se basó en la propuesta hecha por Tamime y Deeth (1980); Tamime y Robinson (1990). Se incorporaron las proporciones geométricas empleadas por Espinosa-Solares, Brito-de la Fuente, Tecate, y Tanguy (1997b) y se modificó la forma del ancla al interior. Este sistema de mezclado tuvo dos impulsores de ancla girando en ejes de accionamiento separados, como se muestra en la Figura 1. Visto desde arriba, el ancla en el exterior gira en sentido contrario a las manecillas del reloj, mientras que el ancla al interior gira hacia la derecha. El ancla al interior tuvo un diámetro de 0.26 m, y al exterior 0.36 m. Ambos tanques encamisados tuvieron un diámetro de 0.40 m, y fueron construidos con acero inoxidable 316. Cada tanque contaba con una capacidad de 60 L y fue llenado con 50 L de mezcla de leche. Los equipos de mezclado fueron impulsados con tres motores diferentes: 1, 0.75 y 0.5 HP (Emerson, distribuido por US Motors, México), cada uno controlado por un regulador de voltaje (Baldor, México).

Producción de yogur en laboratorio

La leche entera deshidratada (Dilac SA de CV, México) fue hidratada a 40 °C durante 5 min con agitación suave y después se mantuvo a 8 °C durante 24 ± 1 h. La concentración de sólidos fue de 11.9 % (p/p). Al día siguiente, la leche fue calentada a una temperatura de 60 °C y se homogeneizó a 17.2 MPa (Alfa Laval, SH20). Después, se añadió azúcar para una composición final de 16.5 % (p/p) de sólidos. Los contenidos de grasa y proteína se mantuvieron en 2.9 % (p/p) en la mezcla final. Esta base de leche se calentó a una temperatura de 85 °C durante 20 min y se enfrió a 45 °C. Se añadieron 750 mL de iniciador activado a 50 litros de mezcla de leche y se agitó suavemente durante 5 min. El mezclado

MATERIALS AND METHODS

Mixing devices

Two mixing devices were used. The first, called double helical ribbon system (DHR), is presented in Figure 1. It is analogous to the impeller presented by de la Villeon et al. (1998) with similar geometrical ratios to those used by Espinosa-Solares et al. (1997a) in a helical ribbon-Rushton turbine impeller, but a bottom ribbon segment was added to the agitator in order to promote a pumping effect. The diameter of the impeller was 0.34 m. The second mixing system, which was named anchor-modified anchor (A-MA), was based on the proposal made by Tamime and Deeth (1980); Tamime and Robinson (1990). The geometrical ratios employed by Espinosa-Solares, Brito-de la Fuente, Tecate, and Tanguy (1997b) were incorporated and the shape of the internal anchor was modified. This mixing system had two anchor impellers rotating in separate drive shafts, as shown in Figure 1. From a top view, the external anchor rotates counter-clockwise while the internal anchor rotates clockwise. The internal anchor had a 0.26 m diameter, and the external one 0.36 m. Both jacketed tanks had a 0.40 m diameter and were built of stainless steel 316. Each tank had a 60-L capacity and was filled with 50 L of milk mix. The mixing devices were driven with three different engines: 1, 0.75, and 0.5 HP (Emerson, distributed by US Motors, Mexico), each controlled by a voltage controller (Baldor, Mexico).

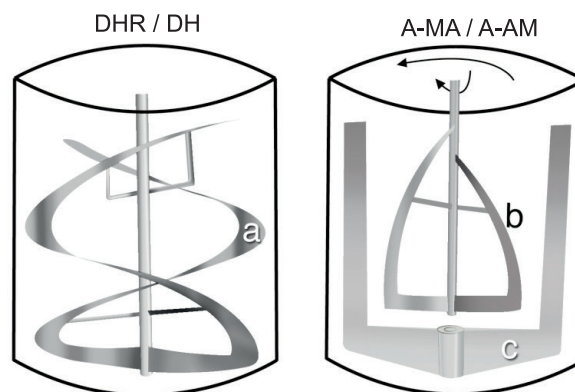


FIGURA 1. Sistema doble helicoidal (DH) y sistema ancla-ancla modificada (A-AM) utilizado para la producción de yogur batido (a: impulsor doble helicoidal; b: agitador ancla modificada; c: impulsor de ancla).

FIGURE 1. Double helical ribbon system (DHR) and anchor-modified anchor system (A-MA) used for stirred yogurt production (a: double helical ribbon impeller; b: modified anchor agitator; c: anchor impeller).

cesó y el proceso de fermentación se realizó a 43 ± 1 °C por alrededor de 5 h a una acidez de 0.70 %. En este punto del proceso, los equipos de mezclado empezaron a trabajar y se detuvieron cuando el yogur alcanzó una temperatura de 20 °C. Posteriormente, los recipientes de 19 L fueron llenados con el producto y almacenados a 8 °C.

Iniciador

Se utilizó un cultivo iniciador liofilizado, una mezcla de *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophilus* y *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* (MY800, Rhône-Poulenc, distribuido por Cuamex, México). La mezcla de leche (750 mL) se inoculó con 1.5 g de cultivo iniciador liofilizado y se fermentó en un recipiente a 45 °C durante 2 h.

Condiciones del proceso

Las pruebas preliminares se realizaron con el fin de definir la velocidad de rotación para cada sistema de mezclado. Para el sistema doble helicoidal se seleccionaron las velocidades entre 15 y 45 rpm. Para el impulsor ancla-ancla modificada, el ancla externa giró a 10 rpm en todos los experimentos y el impulsor interno giró de 10 a 30 rpm. En el Cuadro 1 se muestran los tratamientos de mezclado experimental. Se llevó a cabo un tratamiento de pseudo-control sin movimiento de los impulsores.

Laboratory yogurt production

Dehydrated whole milk (Dilac S.A. de C.V., Mexico) was hydrated at 40 °C for 5 min under gentle agitation and then kept at 8 °C for 24 ± 1 h. The solid concentration was 11.9 % (w/w). The following day, the milk was heated at 60 °C and homogenized at 17.2 MPa (Alfa Laval, SH20). Afterward, sugar was added for a final composition of 16.5 % (w/w) of solids. Fat and protein contents were kept at 2.9 % (w/w) in the final mix. This base milk was heated at 85 °C for 20 min and cooled to 45 °C. Activated starter (750 mL) was added to 50-L milk mix and gently stirred for 5 min. The mixing ceased and the fermentation process was conducted at 43 ± 1 °C for around 5 h to an acidity of 0.70 %. At this point of the process, mixing devices started working and stopped when yogurt reached 20 °C. Then 19-L containers were filled with the product and stored at 8 °C.

Starter

A lyophilized starter culture, a mixture of *Streptococcus salivarius* ssp. *thermophilus* and *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* (MY800, Rhône-Poulenc, distributed by Cuamex, Mexico), was used. Milk mix (750 mL) was inoculated with 1.5 g of lyophilized starter culture and fermented in a flask at 45 °C for 2 h.

CUADRO 1. Condiciones de procesamiento utilizadas en los tratamientos para la producción de yogur agitado.

TABLE 1. Processing conditions used in the treatments for production of stirred yogurt.

Sistema de mezclado / Mixing system	Velocidad de rotación (rpm) / Rotational speed (rpm)		Tratamiento / Treatment
Doble helicoidal / Double helical ribbon	15		DH15 / DHR15
	30		DH30 / DHR30
	45		DH45 / DHR45
Ancla-ancla modificada / Anchor-modified anchor	Ancla externa / External anchor	Ancla interna / Internal anchor	
	10	10	A-AM11 / A-MA11
	10	20	A-AM12 / A-MA12
	10	30	A-AM13 / A-MA13

Evaluación del tiempo de enfriamiento

Se utilizaron termómetros bimetalicos (Metron, México) para la evaluación de la temperatura (precisión: ± 1 °C). Los sensores fueron ubicados a 12.5 cm del perímetro y 9.0 cm de la superficie. El tiempo de enfriamiento se consideró como el tiempo requerido para disminuir la temperatura del yogur de 43 °C a 20 °C.

Sinéresis

La sinéresis se evaluó mediante dos parámetros: el índice de sinéresis y el coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis, ambos parámetros se determinaron dos días después de la producción de yogur. Para evaluar el índice de sinéresis, se adaptó la metodología reportada por Keogh y O’Kennedy (1998); se centrifugaron 30 g de yogur a 680 g a 8 °C durante 10 min (Eppendorf centrifuge 5810R, rotor A-4-62, Brinkmann Instruments, Inc., Catiague Road Westbury, NY, USA). El índice de sinéresis se reportó como una relación adimensional del peso de suero obtenido con el peso de la muestra inicial. En el caso del coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis, se utilizó el procedimiento propuesto por Harwalkar y Kalab (1981) y Hess, Roberts, y Ziegler (1997). Tubos con 30 g de yogur fueron centrifugados a 50, 100, 250, 500, y 680 g durante 10 minutos a una temperatura de 8 °C. El peso del suero separado durante la centrifugación se expresó como porcentaje en peso de la muestra inicial y se representó frente al valor *g*. Después de ajustar los datos en bruto mediante la regresión lineal, la pendiente de la curva fue considerada como el coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis.

Evaluación sensorial

La evaluación sensorial ha sido reportada en otras partes por Granata y Morr (1996) y Penna, Baruffaldi, y Olivera (1997), como una herramienta para evaluar la calidad de los alimentos. Las pruebas de discriminación son utilizadas para encontrar diferencias entre muestras similares, las pruebas descriptivas explican que atributos sensoriales diferencian a las muestras, y las pruebas afectivas muestran las preferencias de un grupo específico de consumidores de un producto alimenticio.

Las técnicas de evaluación sensorial utilizadas fueron las siguientes: una prueba de diferencia de control, un análisis descriptivo cuantitativo, y una prueba de preferencia global (Meilgaard, Carr, & Civille, 1991).

Preparación de la muestra. El yogur se preparó de acuerdo a las condiciones de mezclado descritas anteriormente y se almacenó en recipientes de plástico de 19 L a una temperatura de 8 °C durante la noche. Los recipientes de plástico de cinco litros se llenaron con este yogur, y fueron transferidos al laboratorio sensorial, y se mantuvieron a 5 °C. El yogur fue utilizado por los panelistas, conforme fue necesario. Las muestras de yogur de 30 g fueron presentadas a los panelistas en recipientes de plástico de

Processing conditions

Preliminary tests were performed in order to define the rotational speed for each mixing system. For the double helical ribbon system speeds between 15 and 45 rpm were selected. For the anchor-modified anchor device, the external anchor rotated at 10 rpm in all the experiments and the inner impeller rotated between 10 and 30 rpm. Table 1 shows the experimental mixing treatments. A pseudo-control treatment was conducted without movement of the impellers.

Cooling time evaluation

Bimetalic thermometers (Metron, Mexico) were used for temperature evaluation (accuracy: ± 1 °C). Sensors were located 12.5 cm from the perimeter and 9.0 cm from the surface. Cooling time was considered as the time required to decrease yogurt temperature from 43 °C to 20 °C.

Syneresis

Syneresis was evaluated by two parameters: syneresis index and coefficient of susceptibility to syneresis. Both parameters were determined two days after yogurt production. To evaluate the syneresis index, the methodology reported by Keogh and O’Kennedy (1998) was adapted; 30 g of yogurt were centrifuged at 680 g for 10 min at 8 °C (Eppendorf centrifuge 5810R, rotor A-4-62, Brinkmann Instruments, Inc., Catiague Road Westbury, NY, USA). The syneresis index was reported as a dimensionless ratio of the weight of whey obtained to the weight of the initial sample. In the case of coefficient of susceptibility to syneresis, the procedure proposed by Harwalkar and Kalab (1981) and Hess, Roberts, and Ziegler (1997) was used. Tubes containing 30 g of yogurt were centrifuged at 50, 100, 250, 500, and 680 g for 10 minutes at 8 °C. The weight of the whey separated during centrifugation was expressed as weight percentage of the initial sample and plotted against *g* value. After fitting the raw data by linear regression, the slope of the curve was considered as the coefficient of susceptibility to syneresis.

Sensory evaluation

Sensory evaluation has been reported elsewhere by Granata and Morr (1996) and Penna, Baruffaldi, and Olivera (1997) as a tool for evaluating the quality of foods. Discrimination tests are used to find differences between similar samples, descriptive tests explain which sensory attributes make samples different, and affective tests show preferences of a specific group of consumers for a food product.

The sensory evaluation techniques used were as follows: a difference-from-control test, a quantitative descriptive analysis, and an overall preference test (Meilgaard, Carr, & Civille, 1991).

Sample preparation. Yogurt was prepared under the mixing conditions described above and stored in 19-L plas-

50 mL (Envases Primo Cuevas S.A. de C.V., México) codificadas con un número de 3 dígitos al azar.

Diferencia de control. Para esta prueba se requirieron cuatro panelistas capacitados. Sus edades oscilaban de los 30 a los 55 años. El testigo fue un yogurt natural comercial (Yoplait, Sigma Alimentos S.A. de C.V., México). Seis tratamientos fueron comparados con el testigo. Se utilizó una escala de nueve puntos para medir la diferencia de control (1 = ninguna diferencia, 9 = muy diferente). Se dio agua destilada y galletas entre cada muestra para enjuagarse la boca.

Análisis descriptivo cuantitativo. Cinco panelistas, de edades comprendidas entre los 30 y 55 años, con 350 horas de experiencia en análisis descriptivo fueron seleccionados por análisis secuencial para las pruebas de yogurt. La selección se llevó a cabo mediante pruebas de triángulo y ajustes $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.05$, $P_0 = 0.45$ y $P_1 = 0.70$. Después de siete pruebas de triángulo todo el panel pasó a la región de aceptación. Los panelistas contaron con 12 horas de capacitación en análisis descriptivo de yogurt.

La prueba se llevó a cabo en un laboratorio con cabinas particionadas bajo iluminación fluorescente. Los cuatro tratamientos fueron evaluados para los atributos de aroma, sabor y textura en cada uno de tres períodos (repeticiones). Se dio agua destilada y galletas entre cada muestra. En el Cuadro 2 se muestran los descriptores sensoriales y las definiciones.

tic buckets at 8 °C overnight. Five-liter plastic containers were filled with this yogurt, transferred to the sensory laboratory, and kept at 5 °C. The yogurt was used by the panelists as needed. Yogurt samples of 30 g in 50-mL plastic cups (Envases Primo Cuevas S.A. de C.V., Mexico) coded with a random 3-digit number were presented to the panelists.

Difference-from-control. Four trained panelists were used for this test. Their ages ranged from 30 to 55 years. A plain commercial yogurt (Yoplait, Sigma Alimentos S.A. de C.V., Mexico) was referred to as the control. Six treatments were compared against the control. A nine-point scale was used to measure Difference-from-Control (1 = no difference to 9 = extremely different). Distilled water and crackers were given between samples for mouth rinsing.

Quantitative descriptive analysis. Five panelists, aged from 30 to 55 years, with 350 h of experience with descriptive analysis were selected by sequential analysis for yogurt testing. Selection was carried out by triangle tests and settings $\alpha = 0.05$, $\beta = 0.05$, $P_0 = 0.45$ and $P_1 = 0.70$. After seven triangle tests the whole panel passed to the acceptance region. The panelists had 12 h of training in yogurt descriptive analysis.

The test was conducted in a laboratory with partitioned booths under fluorescent lighting. The four treatments were evaluated for aroma, flavor and texture attributes

CUADRO 2. Definición de atributos y referencias utilizados en el análisis descriptivo cuantitativo de yogurt batido.

Atributos	Definición
Dulzor	Un factor de sabor básico. Referencia: Lactosa (Merk-México, S.A.). 4 % de lactosa = 2; 6 % de lactosa = 7; 8 % de lactosa = 14.
Sabor a leche cocida	Una característica de leche procesada térmicamente. Referencia: leche "Alpura" ultrapasteurizada (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México) = 6; leche "Alpura" pasteurizada (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México) = 14.
Acidez	Un factor de sabor básico. Referencia: Ácido láctico (Merk-México, S.A.). 0.2 % de ácido láctico = 5; 0.5 % de ácido láctico = 13.
Apariencia gruesa	Una característica de textura geométrica. Referencia: Mayonesa "Kraft" (Kraft Foods de México, S. de R.L. de C.V., México) = 1; yogurt con manzanas "Gerber" (Gerber S.A. de C.V., México) = 8; queso cottage "Lyncott" (Industrias Cor, S.A. de C.V., México) = 14.
Cremosidad	Superficie suave característica de la leche percibida en la cavidad oral. Referencia: 50 % de crema "Alpura" (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México); leche "Alpura" light (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México) ; crema "Alpura" = 12.
Firmeza	Crema "Nestlé" (Nestlé México, S.A. de C.V., México) = 2; jarabe de maíz "Karo" (Productos de Maíz, S.A. de C.V., México) = 8; crema "Chipilo" (Grupo Prolesa S.A. de C.V., México) = 14.
Viscosidad	Fuerza requerida para ingerir un líquido por la boca utilizando la lengua. Referencia: crema "Nestlé" = 6; jarabe de maíz "Karo" = 14.

TABLE 2. Definition of attributes and references used in the quantitative descriptive analysis of stirred yogurt.

Attributes	Definition
Sweetness	A basic taste factor. Reference: Lactose (Merk-México, S.A.). 4 % lactose = 2; 6 % lactose = 7; 8 % lactose = 14.
Cooked milk flavor	A characteristic of heat processed milk. Reference: ultrapasturised “Alpura” (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México) milk = 6; pasteurised “Alpura” (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México) milk = 14.
Sourness	A basic taste factor. Reference: Lactic acid (Merk-México, S.A.). 0.2 % lactic acid = 5; 0.5 % lactic acid = 13.
Coarse appearance	A geometric texture characteristic. Reference: “Kraft” (Kraft Foods de México, S. de R.L. de C.V., México) mayonnaise = 1; “Gerber” (Gerber S.A. de C.V., México) yogurt with apples = 8; “Lyncott” (Industrias Cor, S.A. de C.V., México) cottage cheese = 14.
Creaminess	Smooth surface characteristic of milk perceived on the oral cavity. Reference: 50 % “Alpura” (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México) cream in “Alpura” (Ganaderos Productores de Leche Pura, S.A. de C.V., México) light milk; “Alpura” cream = 12.
Firmness	“Nestlé” (Nestlé México, S.A. de C.V., México) cream = 2; “Karo” (Productos de Maíz, S.A. de C.V., México) corn syrup = 8; “Chipilo” (Grupo Prolesa S.A. de C.V., México) cream = 14.
Viscosity	Force required to sip a liquid into the mouth using the tongue. Reference: “Nestlé” cream = 6; “Karo” corn syrup = 14.

Prueba de preferencia. La preferencia del consumidor por las muestras de yogurt batido fue determinada por un panel de consumidores de 103 miembros, conformado por estudiantes de la Universidad Autónoma Chapingo, personal, y profesorado de entre 18 y 50 años. El panel utilizó una escala hedónica de nueve puntos (1 = extremadamente desagradable y 9 = extremadamente sabroso). Para el gusto en general se evaluaron seis tratamientos. Se pidió a los panelistas que se enjuagaran la boca entre cada muestra.

Estadística

Debido a que solo era posible elaborar dos lotes de yogurt al día en cada tanque, se llevó a cabo un diseño de bloques incompletos equilibrados con quince bloques, dos tratamientos por bloque y cinco repeticiones (Cochran & Cox, 1990) para evaluar el tiempo de enfriamiento y el coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis. Se realizó una prueba de Tukey para separ las medias cuando en el análisis de varianza se observó un efecto significativo en el tratamiento ($\alpha = 0.05$).

En el caso de la evaluación sensorial, se utilizaron diseños de bloques completos al azar (Cochran & Cox, 1990) para las pruebas de diferencia de control y preferencia con los panelistas o consumidores como bloques. Se utilizó un diseño de parcelas divididas para el análisis descriptivo cuantitativo con tres sesiones de evaluación diferentes como repeticiones. También se llevó a cabo un análisis de componentes principales para monitorear el desempeño de los panelistas (Kwan & Kowalski, 1980). La prueba de mínima

en each of three periods (replicates). Distilled water and crackers were given between samples. Sensory descriptors and definitions are presented in Table 2.

Preference test. Consumer preference for stirred yogurt samples was determined by a 103-member consumer panel comprised of Autonomous University of Chapingo students, staff, and faculty aged from 18 to 50 years. The panel used a nine-point hedonic scale (1 = dislike extremely to 9 = like extremely). Six treatments were evaluated for overall liking. Panelists were asked to rinse their mouths between samples.

Statistics

Because it was possible to make only two yogurt batches a day in each tank, a balanced incomplete block design with fifteen blocks, two treatments per block and five replicates (Cochran & Cox, 1990) was used for evaluating cooling time and coefficient of susceptibility to syneresis. A Tukey test was used to separate means when the analysis of variance showed a significant treatment effect ($\alpha = 0.05$).

In the case of sensory evaluation, randomized complete block designs (Cochran & Cox, 1990) were used for difference-from-control and preference tests with panelists or consumers as blocks. A split-plot design was used for the quantitative descriptive analysis with three different evaluation sessions as replicates. Principal component analysis was used to monitor panelists’ performance (Kwan & Kowalski, 1980). Fisher’s least significant difference (LSD) test

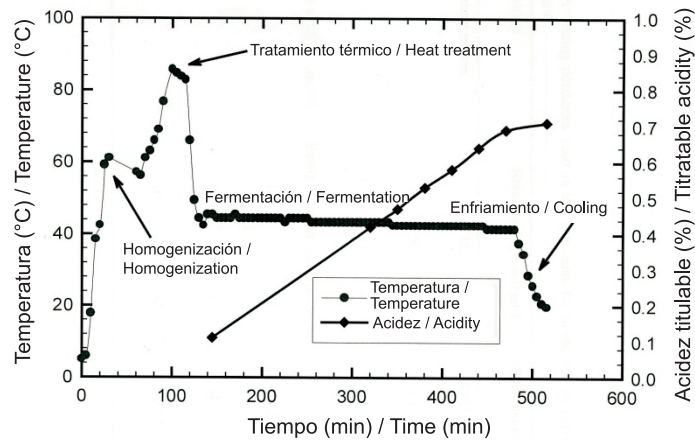


FIGURA 2. Evolución de la temperatura y la acidez durante la producción de yogur utilizando un impulsor doble helicoidal a 45 rpm (DH45).

FIGURE 2. Temperature and acidity evolution during yogurt production using a double helical ribbon mixing impeller at 45 rpm (DHR45).

diferencia significativa de Fisher (MSD) se utilizó para medios separados cuando en el análisis de varianza se observó un efecto significativo en el tratamiento ($\alpha = 0.05$).

El Sistema de Análisis Estadístico (SAS / STAT, 1989) fue utilizado para analizar los datos.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestran los cambios en la temperatura y la acidez producida durante la producción de yogur en condiciones del proceso del tratamiento DH45. Este fue el comportamiento típico registrado en todos los experimentos. Es importante notar que los niveles de acidez se nivelan mientras que la pendiente de temperatura descende durante el proceso de enfriamiento. Por lo tanto, tan pronto la temperatura disminuye, también disminuye la actividad metabólica, lo que concuerda con la literatura (Tamime & Deeth, 1980).

Tiempo de enfriamiento

Durante el proceso de enfriamiento en condiciones sin mezclado (datos no mostrados), fue posible reducir la temperatura a sólo 31 °C después de 220 min, lo que difiere bastante del tiempo de enfriamiento más largo (103.8 min) registrado en el tratamiento A-AM11 (Cuadro 3). Como consecuencia de este largo tiempo de enfriamiento en el recipiente sin mezclado, aconteció una sinéresis muy evidente durante el proceso de enfriamiento. Estos resultados indican la necesidad de utilizar equipos de mezclado en recipientes para enfriamiento durante la producción de yogur.

En el Cuadro 3 se muestra el tiempo requerido para reducir la temperatura de 43 °C a 20 °C para todos los tra-

was used to separate means when the analysis of variance showed a significant treatment effect ($\alpha = 0.05$).

The Statistical Analysis System (SAS/STAT, 1989) was used to analyze the data.

RESULTS AND DISCUSSION

Figure 2 shows the changes in temperature and acidity produced during yogurt production under DHR45 treatment processing conditions. This was the typical behavior recorded in all experiments. It is important to note that acidity levels off while the temperature slope descends during the cooling process. Thus, as soon as temperature decreases, metabolic activity diminishes, which is in agreement with the literature (Tamime & Deeth, 1980).

Cooling time

During the cooling process under non-mixing conditions (data not shown), it was possible to reduce temperature only to 31 °C after 220 min, which is very different from the longest cooling time (103.8 min) recorded for A-MA11 treatment (Table 3). As a consequence of this long cooling time in the non-mixed vessel, a very evident syneresis occurred during the cooling process. These results indicated the need to use mixing devices in vessels for cooling during yogurt production.

Table 3 presents the time required for reducing temperature from 43 °C to 20 °C for all treatments. As the results suggest, the helical ribbon system had a shorter cooling time than the anchor-modified anchor device at least at the higher mixing rates. As an example, DHR45 cooling time was only 39.3 % of the cooling time used by A-MA11. These differences could be attributed to the flow

tamientos. Como se sugiere en los resultados, el sistema helicoidal tuvo un tiempo de enfriamiento más corto que el impulsor ancla-ancla modificada, por lo menos en las velocidades de mezclado más altas. Como ejemplo, el tiempo de enfriamiento del DH45 fue sólo de 39.3 % del tiempo de enfriamiento comparado con A-AM11. Estas

patterns induced by the two impeller types. While the helical ribbon promotes an axial movement of the fluid, the anchor agitators develop a flow in a radial direction. This leads to differences in cooling time among treatments. It is important to point out here that further work is necessary to provide quantitative data about the heat trans-

CUADRO 3. Tiempo de enfriamiento, índice de sinéresis, y coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis registrados por los tratamientos.

TABLE 3. Cooling time, syneresis index, and coefficient of susceptibility to syneresis registered by treatments.

Tratamiento / Treatment	Tiempo de enfriamiento ¹ / Cooling time ¹ (min)	Índice de sinéresis ¹ / Syneresis index ¹ (-)	Coefficiente de susceptibilidad a la sinéresis ¹ / Coefficient of susceptibility to syneresis ¹ (-)
DH45 / DHR45	40.8 ^a	0.387 ^a	0.056 ^a
DH30 / DHR30	56.8 ^a	0.357 ^a	0.058 ^a
DH15 / DHR15	79.3 ^b	0.363 ^a	0.059 ^a
A-AM13 / A-MA13	85.8 ^{bc}	0.345 ^a	0.057 ^a
A-AM12 / A-MA12	102.3 ^c	0.371 ^a	0.061 ^a
A-AM11 / A-MA11	103.8 ^c	0.384 ^a	0.064 ^a

¹Los valores mostrados son medias de cinco repeticiones, misma letra significa que no existe diferencia significativa (Tukey, $\alpha = 0.05$).

¹Values shown are means of five replications, same letter means no significant difference (Tukey, $\alpha = 0.05$).

diferencias pueden ser atribuidas a los patrones de flujo inducidos por los dos tipos de impulsores. Mientras que el helicoidal promueve un movimiento axial del fluido, los agitadores de ancla desarrollan un flujo en una dirección radial. Esto conduce a diferencias en el tiempo de enfriamiento entre los tratamientos. Es importante señalar que es necesario seguir esta investigación para proporcionar los datos cuantitativos acerca de los fenómenos de transferencia de calor. Sin embargo, los equipos propuestos en este estudio son diseños nuevos y no han sido previamente caracterizados en términos de patrones de flujo, consumo de energía, tiempo de mezclado, y energía de mezclado. Obviamente, el papel de las propiedades reológicas y las condiciones hidrodinámicas sobre los parámetros de macromezclado debe ser considerado con el fin de proporcionar información adecuada para ampliar y seleccionar el sistema de mezclado adecuado.

Desde un punto de vista estadístico, los tratamientos DH45 y DH30 se enfriaron más rápido que los tratamientos A-AM. Este enfriamiento mayor del impulsor helicoidal confirma que para hacer frente a los fluidos no newtonianos, los impulsores helicoidales se encuentran entre las mejores opciones si se desean tiempos de enfriamiento cortos (Brito-de la Fuente et al., 1997; Espinosa-Solares et al., 1997a).

Sinéresis

En el Cuadro 3 también se muestran los valores del índice de sinéresis y el coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis para todos los tratamientos. Se puede observar que no se mostraron diferencias estadísticas entre los tratamientos para ambos parámetros.

fer phenomenon. However, the devices proposed in this paper are novel designs and have not been characterized previously in terms of flow patterns, power consumption, mixing time, and mixing energy. Obviously the role of rheological properties and hydrodynamic conditions in the macromixing parameters must be considered in order to provide suitable information for scaling up and selecting the proper mixing system.

From a statistical point of view, the DHR45 and DHR30 treatments cooled quicker than the A-MA treatments. This quicker cooling of the helical ribbon impeller confirms that for dealing with non-Newtonian fluids helical ribbon impellers are among the better choices if short cooling times are desired (Brito-de la Fuente et al., 1997; Espinosa-Solares et al., 1997a).

Syneresis

Table 3 also shows the values of the syneresis index and the coefficient of susceptibility to syneresis for all treatments. It can be seen that no statistical differences among treatments were observed for both parameters.

Syneresis index values for the treatments ranged from 0.345 to 0.385, which are in the same order of magnitude as the values reported by Keogh and O'Kennedy (1998). These authors, studying the influence of adding hydrocolloids to yogurt, found that the syneresis index ranged from 0 to 0.391 for trials with gelatine, 0 to 0.235 for trials with starch, and 0 to 0.492 for trials with a combination of xanthan and locust bean gums. It must be pointed out that although our experiments were performed without adding any hydrocolloid, the syneresis index values were

Los valores del índice de sinéresis para los tratamientos oscilaron de 0.345 a 0.385, los cuales están en el mismo orden de magnitud que los valores reportados por Keogh y O'Kennedy (1998). Estos autores, que estudiaron la influencia de añadir hidrocoloides al yogur, encontraron que el índice de sinéresis osciló de 0 a 0.391 para los ensayos con gelatina, de 0 a 0.235 para los ensayos con almidón, y de 0 a 0.492 para los ensayos con una combinación gomas de xantana y algarrobo. Se debe señalar que, aunque nuestros experimentos se realizaron sin añadir ningún hidrocoloide, los valores del índice de sinéresis fueron más pequeños que los obtenidos con algunos de los hidrocoloides utilizados por Keogh y O'Kennedy (1998). Este comportamiento se puede atribuir al hecho de que los equipos utilizados promueven el movimiento en el recipiente teniendo un cizallamiento bajo, lo que podría contribuir a la reducción de la sinéresis.

En el caso del coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis, los valores obtenidos en los experimentos de este estudio oscilaron de 0.056 a 0.064. Estos valores son mucho mayores que los reportados por Hess et al. (1997). Estos autores evaluaron varios estabilizadores y cepas de productores de exopolisacáridos que producen *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*. Los coeficientes de susceptibilidad a la sinéresis observados en este estudio fueron 1.5 a 11.6 veces mayores que los reportados por Hess et al. (1997). El hecho de que ni el índice de sinéresis ni el coeficiente de susceptibilidad a los datos de sinéresis mostraron diferencias entre los tratamientos confirma que la composición química puede desempeñar un papel importante durante la conformación de la estructura del yogur.

Evaluación sensorial del yogur batido

Prueba de diferencia de control. Todos los tratamientos fueron comparados con un yogur natural comercial, el cual tenía una acidez titulable de 1.38 % (p/p). Como se muestra en el Cuadro 4, el tratamiento DH45 tuvo la diferencia sensorial más pequeña (5.06). Se encontró que las medias de los tratamientos fueron estadísticamente diferentes. Se obtuvieron tres grupos utilizando la prueba MDS al separar las medias. El grupo con una diferencia sensorial pequeña del testigo fue el tratamiento DH45. Mientras que el grupo formado por los tratamientos A-AM11, A-AM13, DH15, y DH30 tuvieron la diferencia sensorial más grande entre los tratamientos y el control. Es importante señalar que dentro de los tratamientos DH, la diferencia de control más baja se obtuvo con una velocidad de rotación de 45 rpm, que corresponde a la velocidad máxima utilizada en este estudio. En el caso de los tratamientos A-AM, no fue tan evidente una tendencia en relación a la velocidad de rotación. Estos hallazgos indican que, el sistema de mezclado utilizado en un recipiente multitarea para el enfriamiento durante la producción de yogur juega un papel importante en las propiedades sensoriales, lo cual podría atribuirse a los diferentes patrones de flujo, así como la velocidad de cizallamiento aparente observada en las condiciones específicas de la operación.

smaller than those obtained with hydrocolloids, as reported by Keogh and O'Kennedy (1998). This behavior can be attributed to the fact that the devices promoted the movement in the vessel by low shear rate, which could contribute to reduce syneresis.

In the case of the coefficient of susceptibility to syneresis, the values obtained in the experiments of this study ranged from 0.056 to 0.064. These values are much higher than those reported by Hess et al. (1997). These authors evaluated several stabilizers and exopolysaccharide-producing strains of *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus*. The coefficients of susceptibility to syneresis observed in this study were 1.5 to 11.6 times higher than those reported by Hess et al. (1997). The fact that neither syneresis index nor coefficient of susceptibility to syneresis data showed differences among treatments confirms that chemical composition might play an important role during the conformation of the structure of the yogurt.

Sensory evaluation of stirred yogurt

Difference-from-control test. All treatments were compared to a plain commercial yogurt, which had a titratable acidity of 1.38 % (wt / wt). As it is shown in Table 4, the DHR45 treatment showed the smallest sensory difference (5.06). The means of the treatments were found to be statistically different. Three groups were obtained using LSD to separate means. The group that gave a small sensory difference from the control was DHR45 treatment, while the group formed by treatments A-MA11, A-MA13, DHR15, and DHR30 had the largest sensory difference between treatments and the control. It is important to point out here that within DHR treatments the lowest difference-from-control was achieved with a rotational speed of 45 rpm, which corresponds to the highest speed used in this work. In the case of A-MA treatments a trend was not as apparent in relation to the rotational speed. These findings indicate that the mixing system used for cooling during yogurt production in multi-task vessel plays an important role in sensory properties, which could be attributed to the different flow patterns as well as the apparent shear rate observed under the specific operating conditions. In the literature, it has been reported that the k_s constant, which can be considered as the shear constant, relates rotational speed to shear rate in non-Newtonian fluids (Metzner & Otto, 1957). The k_s for helical ribbon impellers varies from 10 to 30 (Brito-de la Fuente et al., 1997). Taking those values the shear rate for the DHR45 treatment could be between 7.5 and 22.5 s^{-1} , while in the A-MA treatments the shear rate is unpredictable with the data available in the literature, basically because there is no information regarding dual impellers similar to those used in the A-MA system. Further work is needed in order to provide the hydrodynamic conditions in that kind of system, as well as to give better design criteria.

Quantitative descriptive analysis. Based on the results obtained by the difference-from-control test and also con-

CUADRO 4. Comparación de medias para la prueba de diferencia de control en yogur.

TABLE 4. Means comparisons for yogurt difference-from-control test.

Tratamiento / Treatment	Diferencia de control ¹ / Difference-from-Control ¹	Acidez titulable (% [p/p] ± error estándar) / Titratable acidity (% [wt / wt] ± std. error)
Placebo (testigo vs. testigo) / Placebo (control vs. control)	1.13 ^d	1.380 ± 0.021
DH45 / DHR45	5.06 ^c	0.703 ± 0.003
DH30 / DHR30	6.88 ^{ab}	0.748 ± 0.014
DH15 / DHR15	6.88 ^{ab}	0.750 ± 0.013
A-AM13 / A-MA13	7.44 ^a	0.728 ± 0.041
A-AM12 / A-MA12	6.31 ^b	0.733 ± 0.007
A-AM11 / A-MA11	7.63 ^a	0.755 ± 0.023

¹Escala 1 = sin diferencia 9 = extremadamente diferente, misma letra significa que no existe diferencia significativa mediante la prueba de diferencia mínima significativa (α = 0.05).

¹Scale 1 = no difference 9 = extremely different, same letter means no significant difference by the Least Significant Difference test (α = 0.05).

En la literatura se han reportado que la constante k_s , que puede ser considerada como la constante de cizallamiento, relaciona la velocidad de rotación con la velocidad de cizallamiento en fluidos no newtonianos (Metzner & Otto, 1957). La constante k_s para los impulsores helicoidales varía de 10 a 30 (Brito-de la Fuente et al., 1997). Tomando aquellos valores, la velocidad de cizallamiento para el tratamiento DH45 podría ser de entre 7.5 y 22.5 s⁻¹. Mientras que en el caso de los tratamientos A-AM, la velocidad de cizallamiento es impredecible con respecto a los datos disponibles en la literatura, básicamente porque no existe información con respecto a los impulsores duales similares al sistema A-AM. Es necesario continuar con los estudios a fin de proporcionar las condiciones hidrodinámicas en ese tipo de sistemas, así como para proporcionar mejores criterios de diseño.

Análisis descriptivo cuantitativo. Basándose en los resultados obtenidos por la prueba de diferencia de control y también teniendo en cuenta los resultados del tiempo de enfriamiento, se realizó el análisis descriptivo cuantitativo para estos yogures: yogur testigo, y dos tratamien-

sidering cooling time results, quantitative descriptive analysis was done for these yogurts: control yogurt and treatments DHR45 and A-MA11, which had the greatest contrast in cooling time and difference-from-control score. The analysis of variance results presented no interaction between treatments and subjects. The comparisons of means are shown in Table 5. The control yogurt had the highest values for sweetness, cooked milk flavor, creaminess, sourness, and firmness, while DHR45 had scores in these parameters closer to the control than did the A-MA11 yogurt, except in the case of firmness. Yogurt obtained with A-MA11 treatment had a coarser appearance and a greater viscosity than did the control yogurt. Sourness means were separated (α = 0.05) into two groups. The first one, formed by A-MA11 and control treatments, had the higher sour scores than did DHR45 yogurt. In fact, the titratable acidities developed in the yogurt after cooling were 0.755 % and 0.703 % (w / w) for the A-MA11 and DHR45 treatments, respectively. Considering all these characteristics and the statistical differences observed, there was more similarity between sensory profiles of DHR45 and control yogurt than be-

CUADRO 5. Comparación de medias para los atributos sensoriales de control y dos condiciones experimentales de agitación.

TABLE 5. Comparison of means for the sensory attributes of control and two experimental stirring conditions.

Tratamiento / Treatment	Características del yogur ¹ / Characteristic of yogurt ¹						
	Dulzor / Sweetness	Sabor a leche cocida / Cooked milk flavor	Acidez / Sourness	Apariencia gruesa / Coarse appearance	Creemosidad / Creaminess	Firmeza / Firmness	Viscosidad / Viscosity
Testigo / Control	13.9 ^a	7.4 ^a	4.8 ^a	2.7 ^b	7.8 ^a	8.8 ^a	8.9 ^b
DH45 / DHR45	11.3 ^b	4.5 ^b	2.8 ^b	2.8 ^b	5.6 ^b	5.0 ^c	6.9 ^c
A-AM11 / A-MA11	9.3 ^c	3.6 ^c	4.5 ^a	7.5 ^a	2.9 ^c	7.3 ^b	10.1 ^a

¹Misma letra significa que no existe diferencia significativa (DMS, α = 0.05).

¹Same letter means no significant difference (LSD, α = 0.05).

tos, DH45 y A-AM11 con el mayor contraste en el tiempo de enfriamiento y puntaje de diferencia de control. Los resultados del análisis de varianza no mostraron ninguna interacción entre los tratamientos y los sujetos. Las comparaciones de medias se muestran en el Cuadro 5. El yogur testigo tuvo los valores más altos valores de dulzor, sabor de leche cocida, cremosidad, acidez, y firmeza, mientras que, DH45 tuvo, en estos parámetros, puntajes cercanos al testigo, en comparación con el yogur A-AM11 excepto en firmeza. El yogur obtenido con el tratamien-

CUADRO 6. Comparación de medias para yogur: preferencia general.

TABLE 6. Comparison of means for yogurt: overall preference.

Tratamiento / Treatment	Preferencia ¹ / Preference ¹
DHR45 / DHR45	6.52 ^a
DH30 / DHR30	5.43 ^b
DH15 / DHR15	5.53 ^b
A-AM13 / A-MA13	5.60 ^b
A-AM12 / A-MA12	6.73 ^a
A-AM11 / A-MA11	5.30 ^b

¹Escala hedónica 1 = extremadamente desagradable 9 = extremadamente sabroso, Misma letra significa que no existe diferencia significativa (DMS, $\alpha = 0.05$).

¹Hedonic scale 1 = dislike extremely 9 = like extremely, same letter means no significant difference (LSD, $\alpha = 0.05$).

to A-AM11 tuvo un aspecto más densa y una viscosidad mayor en comparación con el yogur testigo. Los medios de acidez se dividieron ($\alpha = 0.05$) en dos grupos. El primero, conformado por los tratamientos A-AM11 y testigo, los cuales tuvieron los puntajes más altos de acidez en comparación con el yogur DH45. De hecho, la acidez titulable desarrollada en el yogur después del enfriamiento fue de 0.755 % y 0.703 % (p/p) para los tratamientos A-AM11 y DH45, respectivamente. Tomando en cuenta todas estas características y las diferencias estadísticas observadas, hubo mayor similitud entre los perfiles sensoriales de DH45 y el yogur testigo que entre A-AM11 y el yogur testigo. Es importante señalar que todos los tratamientos de este estudio se realizaron con leche rehidratada y sin aditivos.

Prueba de preferencia. La preferencia de yogur percibida por el panel de 103 miembros consumidores mostró pequeñas diferencias. Los medios preferenciales generales se muestran en la Cuadro 6. Estadísticamente, se prefirieron los tratamientos DH45 y A-AM12 por encima de otros tratamientos de yogur. Estos resultados, junto con los encontrados en la prueba de diferencia de control sugieren que los tratamientos DH45 y A-AM12 son alternativas viables para la producción de yogur.

Rendimiento global

Las condiciones del proceso juegan un papel importante en las características de yogur (Abrahamsen & Holmen,

tween A-MA11 and control yogurt. It is important to note here that all the treatments of this study were done with rehydrated milk and no additives.

Preference test. Yogurt preference as perceived by the 103-member consumer panel presented small differences. The overall preference means are shown in Table 6. Statistically, DHR45 and A-MA12 treatments were preferred over other yogurt treatments. These results along with those found in the difference-from-control test suggest that DHR45 and A-MA12 treatments are viable alternatives for yogurt production.

Overall performance

Processing conditions play an important role in yogurt characteristics (Abrahamsen & Holmen, 1981; de Ancos et al., 2000; Parnell-Clunies et al., 1986). Stirred yogurt production in multi-task vessels is not an exception. From the engineering point of view, the DHR device cooled faster than did the A-MA system. This validates previous studies where helical ribbon impellers cooled quicker than the anchor agitators (Brito-de la Fuente et al., 1997; Coyle et al., 1970). The changes in the flow patterns could be related to events during the fermentation process. The axial pumping of the double helical ribbon impeller caused a continuous exchange of the fluid located close to the wall of the vessel. Because of that, temperature is reduced quickly and metabolic activity is diminished. As a consequence, different cooling times are related to different physical-chemical properties of the final fluid. Considering the susceptibility of yogurt to mechanical damage, the time used for mixing the product during cooling could also affect yogurt structure. Thus, the better mixing performance by the DHR system observed in this study was related to the best sensory properties, which could be attributed to a quick reduction of metabolic activity of the starters and to a less mechanical damage during the cooling process.

CONCLUSIONS

Mixing devices were developed for yogurt production in multi-task vessels. Under experimental conditions, the DHR system required a shorter cooling time than the A-MA device. There were no statistical differences in syneresis in the stirred yogurts made in the two mixing treatments. The best sensory properties were also achieved using the DHR system at 45 rpm. A difference-from-control test assigned the smaller difference from a commercial yogurt to this treatment. Descriptive analysis showed more similar sensory profiles between DHR45 and control treatment than between the control and A-MA11 treatment. Finally, when the yogurts were judged by consumers, the most preferred yogurt was the treatment that included the DHR45. In light of the findings of this study, it is possible to suggest the production of stirred yogurt in small tanks using a double helical ribbon mixing system at 45 rpm. To thoroughly describe

1981; de Ancos et al., 2000; Parnell-Clunies et al., 1986). La producción de yogur batido en recipientes multitarea no es una excepción. Desde el punto de vista de la ingeniería, el equipo DH enfría más rápido que el sistema A-AM. Esto valida estudios previos en donde los impulsores helicoidales enfriaron más rápido que los agitadores de ancla (Brito-de la Fuente et al., 1997; Coyle et al., 1970). Los cambios en los patrones de flujo podrían estar relacionados con eventos durante el proceso de fermentación. El bombeo axial del impulsor doble helicoidal causó un intercambio continuo del fluido cerca de la pared del recipiente. Debido a eso, la temperatura se reduce rápidamente y la actividad metabólica se ve disminuida. Como consecuencia de ello, los diferentes tiempos de enfriamiento están relacionados con diferentes propiedades físico-químicas del fluido final. Teniendo en cuenta la susceptibilidad del yogur a daños mecánicos, el tiempo utilizado para mezclar el producto durante el enfriamiento podría también afectar la estructura del yogur. Por lo tanto, el mejor rendimiento de mezclado mediante el sistema DH observado en este estudio estuvo relacionado con las mejores propiedades sensoriales, lo que podría atribuirse a una reducción rápida de la actividad metabólica de los iniciadores y a un daño mecánico menor durante el proceso de enfriamiento.

CONCLUSIONES

Los equipos de mezclado fueron desarrollados para la producción de yogur en recipientes multitarea. En condiciones experimentales, el sistema DH requiere un tiempo de enfriamiento más corto que el equipo A-AM. No se observaron diferencias estadísticas en la sinéresis en los yogures agitados realizados en cualquiera de los tratamientos de mezclado. Las mejores propiedades sensoriales también se lograron mediante el sistema DH a 45 rpm. Una prueba de diferencia de control señaló la diferencia más pequeña entre un yogur comercial y este tratamiento. El análisis descriptivo mostró perfiles sensoriales más similares entre DH45 y el tratamiento testigo que entre el testigo y el tratamiento A-AM11. Finalmente, cuando los yogures fueron probados por los consumidores, el yogur más preferido fue el del tratamiento que incluía el DH45. A partir de los hallazgos de este estudio, es posible sugerir la producción de yogur batido en tanques pequeños utilizando un sistema de mezclado doble helicoidal a 45 rpm. Para describir minuciosamente el desempeño de los sistemas de mezclado propuestos es necesaria mayor investigación sobre la caracterización de macromezclado.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo financiero del Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de México (CONACYT) a través de la concesión I-29982B.

the mixing performance of the proposed mixing systems, additional research on macromixing characterization is necessary.

ACKNOWLEDGMENTS

The authors gratefully acknowledge the financial support from Mexico's National Science and Technology Council (CONACYT) through grant I-29982B.

End of English Version

REFERENCIAS

- Abrahamsen, R. K., & Holmen, T. B. (1981). Goat's milk yoghurt made from non-homogenized and homogenized milk, concentrated by different methods. *Journal of Dairy Research*, 48(03), 457-463. doi: <http://dx.doi.org/10.1017/S0022029900021932>
- Bertrand, F., Tanguy, P., & Brito-de la Fuente, E. (1996). A New Perspective for the Mixing of Yield Stress Fluids with Anchor Impellers. *Journal of chemical engineering of Japan*, 29(1), 51-58. doi: 10.1252/jcej.29.51
- Brito-de la Fuente, E., Nuñez, M. C., & Tanguy, P. A. (1997). Non-Isothermal mixing of rheologically complex fluids with close-clearance impellers: Effect of natural convection. *Chemical engineering & technology*, 20(3), 203-207. doi: 10.1002/ceat.270200308
- Cochran, W. G., & Cox, G. M. (1990). Diseños experimentales *Segunda Edición*. Editorial Trillas. México, DF.
- Coyle, C., Hirschland, H., Michel, B., & Oldshue, J. (1970). Heat transfer to jackets with close clearance impellers in viscous materials. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 48(3), 275-278. doi: 10.1002/cjce.5450480309
- de Ancos, B., Pilar-Cano, M., & Gómez, R. (2000). Characteristics of stirred low-fat yoghurt as affected by high pressure. *International dairy journal*, 10(1), 105-111. doi: 10.1016/S0958-6946(00)00021-2
- de la Villeon, J., Bertrand, F., Tanguy, P., Labrie, R., Bousquet, J., & Lebouvier, D. (1998). Numerical investigation of mixing efficiency of helical ribbons. *AIChE journal*, 44(4), 972-977. doi: 10.1002/aic.690440423
- Espinosa-Solares, T., Brito-de la Fuente, E., Tecante, A., & Tanguy, P. (1997a). Power consumption of a dual turbine-helical ribbon impeller mixer in ungasged conditions. *Chemical Engineering Journal*, 67(3), 215-219. doi:10.1016/S1385-8947(97)00040-5
- Espinosa-Solares, T., Brito-de la Fuente, E., Thibault, F., & Tanguy, P. (1997b). Power consumption with anchor mixer - effect of bottom clearance. *Chemical Engineering Communications*, 157(1), 65-71. doi: 10.1080/00986449708936683
- Granata, L. A., & Morr, C. (1996). Improved Acid, Flavor and Volatile Compound Production in a High Protein and Fiber Soy milk Yogurt-like Product. *Journal of Food Science*, 61(2), 331-336. doi: 10.1111/j.1365-2621.1996.tb14188.x
- Harwalkar, V., & Kalab, M. (1981). Effect of acidulants and temperature on microstructure, firmness and susceptibility to syneresis of skim milk gels. *Scanning Electron Microscopy*, 503-513.

- Hassan, A., Frank, J., Schmidt, K., & Shalabi, S. (1996). Rheological properties of yogurt made with encapsulated nonropy lactic cultures. *Journal of Dairy Science*, 79(12), 2091-2097. doi:10.3168/jds.S0022-0302(96)76582-7
- Hess, S., Roberts, R., & Ziegler, G. (1997). Rheological Properties of Nonfat Yogurt Stabilized Using *Lactobacillus delbrueckii* ssp. *bulgaricus* Producing Exopolysaccharide or Using Commercial Stabilizer Systems. *Journal of Dairy Science*, 80(2), 252-263. doi: http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(97)75933-2
- Kaminoyama, M., Akabane, K., Arai, K., Saito, F., & Kamiwano, M. (1994). Numerical analysis of flow of a Bingham fluid in an anchor impeller. *International Chemical Engineering*, 34(2), 263-269.
- Keogh, M., & O'Kennedy, B. (1998). Rheology of stirred yogurt as affected by added milk fat, protein and hydrocolloids. *Journal of Food Science*, 63(1), 108-112. doi: 10.1111/j.1365-2621.1998.tb15687.x
- Kwan, W., & Kowalski, B. R. (1980). Data analysis of sensory scores, evaluations of panelists and wine score cards. *Journal of Food Science*, 45(2), 213-216. doi: 10.1111/j.1365-2621.1980.tb02578.x
- Meilgaard, M. C., Carr, B. T., & Civille, G. V. (1991). *Sensory evaluation techniques*: CRC press.
- Metzner, A., & Otto, R. (1957). Agitation of non-Newtonian fluids. *AIChE journal*, 3(1), 3-10. doi: 10.1002/aic.690030103
- Niedzielska, A., & Kuncewicz, C. (2005). Heat transfer and power consumption for ribbon impellers. Mixing efficiency. *Chemical Engineering Science*, 60(8-9), 2439-2448. doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2004.10.046
- Parnell-Clunies, E. M., Kakuda, Y., Mullen, K., Arnott, D., & DeMan, J. (1986). Physical properties of yogurt: A comparison of vat versus continuous heating systems of milk. *Journal of Dairy Science*, 69(10), 2593-2603. doi: http://dx.doi.org/10.3168/jds.S0022-0302(86)80706-8
- Penna, A. B., Baruffaldi, R., & Olivera, M. N. (1997). Optimization of yogurt production using demineralized whey. *Journal of Food Science*, 62(4), 846-850. doi: 10.1111/j.1365-2621.1997.tb15469.x
- Ramaswamy, H., & Basak, S. (1991). Rheology of stirred yogurts. *Journal of Texture studies*, 22(2), 231-241. T
- Takahashi, K., Yokota, T., Furukawa, T., & Harada, K. (1994). Mixing of Highly Viscous Newtonian Liquid in a Helical Ribbon Agitated Vessel at Various Liquid Depths. *Journal of chemical engineering of Japan*, 27(2), 244-247. doi: 10.1252/jcej.27.244
- Tamime, A., & Deeth, H. (1980). Yogurt technology and biochemistry. *Journal of Food Protection*, 43(12), 939-977.
- Tamime, A., & Robinson, R. K. (1990). *Yogur: ciencia y tecnología*: Acribia.
- Tanguy, P. A., Thibault, F., Brito-de la Fuente, E., Espinosa-Solares, T., & Tecante, A. (1997). Mixing performance induced by coaxial flat blade-helical ribbon impellers rotating at different speeds. *Chemical Engineering Science*, 52(11), 1733-1741. doi:10.1016/S0009-2509(97)00008-0