



OPTIMIZACIÓN Y MODELADO CINÉTICO DEL PROCESO DE PRODUCCION DE
YOGURT EN EL FERMENTADOR LENTO TIPO BACTH EN LA EMPRESA
COOLACTAME LTDA

RICARDO ANTONIO CAMACHO PEREZ

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
PAMPLONA, COLOMBIA

2016



OPTIMIZACIÓN Y MODELADO CINÉTICO DEL PROCESO DE PRODUCCION DE
YOGURT EN EL FERMENTADOR LENTO TIPO BACTH EN LA EMPRESA
COOLACTAME LTDA

RICARDO ANTONIO CAMACHO PEREZ

PROYECTO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO

DIRECTOR:

MSC. ERICK GERMAN YANZA

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA
PAMPLONA, COLOMBIA

2016



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

Trabajo presentado para optar por el título de ingeniero químico.

Título del proyecto: optimización y modelado cinético del proceso de producción de yogurt en el fermentador lento tipo batch en la empresa Coolactame Ltda.

Fecha de inicio: agosto 2016

Fecha de terminación: diciembre de 2016

Autor: Ricardo Antonio Camacho Pérez.

Firma: _____

Director del trabajo de grado: Erick German Yanza Hurtado.

Firma: _____

Director de programa:

Firma: _____

Jurado 1:

Firma: _____

Jurado 2:

Firma: _____



UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA

ACTA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

*A mis padres,
Que fueron y son mi mayor apoyo en la vida, sin quienes ninguno de mis sueños se podría
ver realizado y a quienes les debo más que la vida, les debo mis alegrías*

AGRADECIMIENTOS

A Dios,

Por haberme otorgado una maravillosa familia, quienes han creído en mí siempre y han sido el ejemplo de tolerancia y persistencia para alcanzar todas mis metas. A mis profesores, quienes fueron mi guía en este largo proceso de aprendizaje. A la empresa Coolactame la cual me dio mi primera oportunidad en lo que espero sea una larga carrera profesional y finalmente a todos aquellos que de alguna forma colaboraron en mis años de formación.

RESUMEN

El presente trabajo fue desarrollado en la empresa Coolactame ubicada en la ciudad de Tame – Arauca. Tiene como objetivo optimizar el proceso de producción de yogurt; para esto, se midieron algunos parámetros base como lo son el porcentaje de lactosa, de grasa, de sólidos no grasos, de nitrógeno y de sinéresis, obteniendo valores promedio de 5,3 %, 4,49 %, 9,90 %, 3,70% y 58,46 %, respectivamente.

También se propone el sistema de control de impurezas, el cual es necesario para el proceso de producción de yogurt, que consta de un filtro continuo con diferentes tamaños de malla que elimina de manera óptima las impurezas del producto final. Así mismo, para el control de la velocidad de agitación en el fermentador se propone utilizar un variador de frecuencia TDA2086 ya que este se ajusta a los parámetros necesarios para dicho proceso.

De igual manera, se realizaron los diagramas PFD y P&ID del proceso de elaboración de yogurt con su respectivo balance de materia y energía, obteniendo, del primero, un rendimiento de 127,526% con respecto a la cantidad de leche cruda utilizada en el proceso, y del balance de energía, se calculó que son necesarios 127,982 Kw/h para el procesamiento de 1000 Lts de leche.

Finalmente se determinó el modelo cinético de la fermentación láctica, obteniendo un valor de concentración final de ácido láctico del 23.63%, del rendimiento observado de sustrato en producto de un 45% y de la productividad volumétrica de un 93.3%.

ABSTRACT

The present work was developed in the company Coolactame located in the city of Tame - Arauca. It aims to optimize the yogurt production process; For the case, some basic parameters such as the percentage of lactose, fat, non-fatty solids, nitrogen and syneresis were measured, obtaining average values of 5.3%, 4.49%, 9.90% 3, 70% and 58.46%, respectively. It is also proposed the impurities control system, which is necessary for the yogurt production process, which consists of a continuous filter with different mesh sizes that optimally eliminates the impurities of the final product. Also, for the control of the agitation speed in the fermenter that uses a frequency inverter TDA2086 since this one adjusts the necessary parameters for the said process. In the same way, PFD and P & ID diagrams of the yogurt processing process were analyzed with their respective matter and energy balance, obtaining, first, a yield of 127.526% with respect to the amount of raw milk used in the process, And Energy balance, calculated that the child needs 127,982 Kw / h for processing 1000 liters of milk. Finally, the kinetic model of lactic fermentation was determined, obtaining a final concentration of lactic acid concentration of 23.63%, the observed yield of substrate in the product of 45% and of the volumetric productivity of 93.3%

CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo general	18
2.2 Objetivos específicos.....	18
3. MARCO REFERENCIAL	¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.
3.1 El yogurt	19
3.1.1 Microbiología y bioquímica de la fermentación de yogurt	19
3.2 Lactosa.....	20
3.4 Proteínas de la leche	21
3.4.1 Método de Kjeldahl	22
3.5 Sinéresis.....	22
3.6 Fermentación	23
3.7 Simbiosis	23
3.8 Cinética de la fermentación	23
3.8.1 Efecto de la temperatura.....	24
3.8.2 Efecto del pH.....	24
3.8.3 Produccion de ácido láctico.....	25
3.9 Sistemas de control.....	25
3.9.1 Tipos de sistemas de control.....	26
3.9.1.1 Sistema de control lazo abierto.....	26
3.9.1.2 Sistema de control lazo cerrado (control realimentado).....	26
3.10 Filtración.....	¡Error! Marcador no definido.
3.10.1 Equipos de filtración.....	27
3.10.1.1 Filtros de presión	27
3.10.1.2 Filtro prensa.....	28
3.10.1.3 Filtro de placa horizontal.....	28
3.10.1.4 Filtro de hoja vertical.....	29

3.10.1.5 Nutsche	29
3.10.1.6 Filtro automático	29
3.10.1.7 Vela.....	29
3.10.1.8 Filtro de tambor rotatorio al vacío.....	30
3.11 Sistema de control de velocidad	30
3.11.1 Variación de la velocidad por cambio del número de pares de polos	31
3.11.2 Variacion de velocidad por variadores de frecuencia.....	32
3.12 Control de revoluciones.....	34
4. METODOLOGÍA.....	36
4.1 Medición de los parámetros base.....	36
4.1.1 Porcentaje de lactosa	36
4.1.2 Porcentaje de proteínas.....	36
4.1.3 Determinación del porcentaje de nitrogeno total.....	36
4.1.4 Porcentaje de grasas.....	37
4.1.5 Porcentaje de solidos no grasos	38
4.1.6 Determinación de la Sinéresis	38
4.2 Desarrollo de sistemas de control.....	38
4.2.1 sistema de control de la velocidad de agitación	38
4.3 Sistema de control de impurezas	39
4.4 Elaboración del diagrama PFD del proceso de elaboración del yogurt.....	39
4.5 Elaboración del diagrama P&ID	40
4.6 cinética de fermentación.....	40
4.6.1 seguimiento del ácido láctico	40
5. RESULTADOS Y ANÁLISIS	42
5.1 Resultados parámetros bases	42
5.1.1 Porcentaje de Lactosa	42
5.1.2 Porcentaje de grasa	43
5.1.3 Porcentaje de solidos no grasos	44
5.1.4 Porcentaje de proteína	45
5.1.5 Porcentaje de nitrógeno total	46
5.1.6 Porcentaje de Sinéresis	48

5.2 Sistemas de control.....	50
5.2.1 Control de impurezas.....	50
5.2.2 Control de velocidad de agitación.....	53
5.3 Diagrama PFD.....	55
5.3.1 Balance de materia y energía.....	56
5.4 Diagrama P&ID.....	60
5.5 Cinética de fermentación lactica.....	61
5.5.1 Seguimiento del ácido láctico.....	61
5.5.2 Análisis espectrofotométrico UV-visible.....	66
6. CONCLUSIONES.....	74
7. RECOMENDACIONES.....	77
 ANEXO A. Registro físico-químico de la leche recibida en la empresa coolactame ltda por un periodo de 5 semanas.....	 83
 ANEXO B. Cálculos para la determinación del porcentaje total de nitrógeno en cinco lotes de yogurt en la empresa coolactame ltda.....	 85
 ANEXO C. cálculos para el porcentaje de sinéresis.....	 87
 ANEXO D. Balance de materia y energía.....	 89
 ANEXO E. Cálculos del seguimiento de la producción de ácido láctico en la fermentación del yogurt coolactame.....	 93
 ANEXO F. Modelado cinético.....	 95

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Relación semanal del porcentaje de Lactosa.

Tabla 2. Porcentaje de grasa.

Tabla 3. Porcentaje de solidos no grasos.

Tabla 4. Porcentaje de proteínas.

Tabla 5. Relación del porcentaje de nitrógeno en diferentes lotes de producción.

Tabla 6. Porcentaje de sinéresis.

Tabla 7. Balance de materia en el yogurt.

Tabla 8. Modelo del proceso desde la materia prima.

Tabla 9. Balance de energía.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Reacción estequiometria involucrada en el biorreactor de producción de ácido láctico.
- Figura 2. Diagrama en bloque del sistema de control básico.
- Figura 3. Diagrama en bloque de un sistema de control de lazo abierto.
- Figura 4. Diagrama en bloque de un sistema de control de lazo cerrado.
- Figura 5. Clasificación Filtros a Presión.
- Figura 6. Esquema del sistema de control en motores eléctricos.
- Figura 7. Grafica de aceleración.
- Figura 8. Grafica de deceleración.
- Figura 9. Convertidor de frecuencia.
- Figura 10. Esquema de un sistema de control en un proceso productivo.
- Fig.11. Ultrasonido LAC-S BOECO de la empresa Coolactame Ltda.
- Fig.12. Centrifuga utilizada en el análisis de la sinéresis.
- Fig.13. Vista general del filtro actual del fermentador batch de la empresa Coolactame.
- Fig.14. Vista interior del filtro actual.
- Fig.15. Carcasa del filtro actual del fermentador.
- Fig. 16. Vista final del filtro propuesto para la empresa Coolactame.
- Fig.17.Carcasa del filtro propuesto para loa recirculación.
- Fig. 18. Vista superior del filtro propuesto.
- Fig.19. Esquema del filtro propuesto para la recirculación con proyección interior.
- Fig.20. Vista interior del filtro propuesto para la recirculación.
- Fig.21. Tacómetro digital TACHOMETER DT-2234C+.
- Fig.22. Esquema de un variador de velocidad TDA2086.
- Fig.23. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de yogurt.

Fig.24. Fermentador lento de la empresa Coolactame Ltda.

Fig.25. Instrumento de control actual para impurezas.

Fig.26. Diagrama P&ID del fermentador utilizado en la empresa Coolactame Ltda.

Fig.27. Espectrofotómetro HACH DR/4000U utilizado para el seguimiento del ácido láctico.

LISTA DE GRÁFICAS

- Gráfica 1. Variación del porcentaje de lactosa promedio, a lo largo de cinco semanas.
- Gráfica 2. Variación del porcentaje de grasa promedio, a lo largo de cinco semanas.
- Gráfica 3. Variación del porcentaje de grasa promedio, a lo largo de cinco semanas.
- Gráfica 4. Variación del porcentaje de proteínas promedio, a lo largo de cinco semanas.
- Gráfica 5. Variación del porcentaje de nitrógeno total en relación con cada lote producido.
- Gráfica 6. Variación del porcentaje de sinéresis, durante el almacenamiento a 3°C en sistemas de yogurt con más de 3 por ciento de grasa.
- Gráfica 7. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 1 de la empresa Coolactame.
- Gráfica 8. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 2 de la empresa Coolactame.
- Gráfica 9. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 3 de la empresa Coolactame.
- Gráfica 10. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 4 de la empresa Coolactame.
- Gráfica 11. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 5 de la empresa Coolactame.
- Gráfica 12. Comparativo entre los diferentes lotes con respecto a su velocidad de formación de ácido láctico a través de la fermentación láctica.
- Grafica 13. Curva de calibración para el ácido láctico por espectrofotometría UV-vis.
- Grafica 14. Seguimiento del ácido láctico en la fermentación láctica a través del tiempo.
- Grafica 15. Formación de biomasa a lo largo del tiempo.
- Grafica 16. Consumo de lactosa en la fermentación láctica.
- Grafica.17. formación de ácido láctico como producto de la fermentación láctica.
- Grafica 18. Cinética de formación de Biomasa y ácido láctico vs consumos de lactosa en la fermentación.

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación [1]: Relación lineal de la ley de Arrhenius.

Ecuación [2]: ley de Arrhenius modificada.

Ecuación [3]: Ecuación de Luedekin y Piret.

Ecuación [4]: Modelo matemático para conocer el efecto del pH.

Ecuaciones [5] y [6]: correlación de Henderson-Hasselbach.

Ecuación [7]: Ecuación de Luedeking-Piret para la formación de ácido láctico.

Ecuación [8]: Ecuación para la determinación de la velocidad de giro de un motor de corriente alterna.

Ecuación [9]: ecuación para la determinación del porcentaje de nitrógeno total.

Ecuación [10]: Ecuación de la determinación del porcentaje de sinéresis.

Ecuación [11]: Porcentaje de rendimiento.

Ecuación [12]: Rendimiento observado de sustrato en producto.

Ecuación [13]: Productividad volumétrica.

Ecuación [14]: Rendimiento observado de sustrato en biomasa.

Ecuación [15]: Forma integrada de la ecuación de crecimiento logístico.

Ecuación [16]: Ecuación de consumo de lactosa.

1. INTRODUCCIÓN

Actualmente las empresas procesadoras de lácteos están teniendo un auge debido a la gran producción láctea del país que desde el 2012 presenta una producción por encima de los 13 millones de litros/día. (Superintendencia de industria y comercio, 2012).

Debido a esta gran producción de leche las empresas han optado por optimizar sus procesos y poder aumentar su capacidad de producción.

Coolactame Ltda. Es una empresa dedicada al procesamiento de lácteos ubicada en el municipio de Tame, Arauca. Cuenta con más de 26 años de experiencia y en los últimos años ha alcanzado un liderazgo regional. Por lo cual la empresa requiere estudiar la línea de producción de yogurt con el fin de organizar operaciones, controlar variables del proceso y conocer la cinética relacionada con la fermentación láctica del proceso; para con esto optimizar su desempeño.

El proceso de fermentación es una de las partes cruciales de una empresa de lácteos por lo que este es utilizado en la elaboración de la mayoría de sus productos, por otra parte, este proceso debe ser controlado para mejorar los rendimientos en cuanto a costos de producción y calidad.

Este proceso de fermentación en la empresa Coolactame no cuenta con un protocolo para optimizar los tiempos y el costo de operación del fermentador y actualmente el fermentador lento no cuenta con un sistema de control para la velocidad de agitación y el control de impurezas en la recirculación de la materia prima lo que hace que se presentes problemas de calidad en el producto final para esto se plantea optimizar y modelar cinéticamente el proceso de fermentación en la empresa ya que al ser una parte tan crítica del proceso de elaboración de yogurt se pueden aumentar los márgenes de ganancias y se pueden reducir los subproductos que en el caso del yogurt se presentan por la sinéresis que se lleva a cabo en la maduración del producto

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo general

Optimizar y modelar cinéticamente el proceso de fermentación del yogurt en la empresa Coolactame Ltda.

2.2 Objetivos específicos

- Modelar cinéticamente la fermentación láctica llevada a cabo en fermentador batch.
- Desarrollar y protocolizar los sistemas de control para el fermentador lento. (Control de rpm del agitador y filtros para impurezas).
- Determinación de las condiciones ideales para la fermentación.
- Elaboración del diagrama PFD del proceso de elaboración del yogurt.
- Elaboración del diagrama P&ID del fermentador.

3. MARCO REFERENCIAL

3.1 El yogurt

El yogurt es un producto obtenido por la fermentación láctica de la leche previamente pasteurizada o esterilizada a través de la simbiosis entre la *S.thermophilus* y *L. Bulgaricus* las cuales se encuentran presentes en el producto final. (Resolución número 02310 de 1986).

3.1.1 Microbiología y bioquímica de la fermentación de yogurt

Los microorganismos encargados de convertir la leche en yogurt son el *streptococcus thermophilus* y el *lactobacillus bulgaricus* los cuales son bacterias Gram positivas, y producen ácido láctico como metabolito principal también se les conoce como bacterias homofermentativas. Estos microorganismos crecen en forma óptima en un intervalo de temperatura entre los 40 y 45 °C; su metabolito se detiene a temperaturas por debajo de los 10°C. El *L.bulgaricus* es capaz de fermentar fructosa, galactosa, glucosa y lactosa, mientras que el *S. thermophilus* puede fermentar glucosa, fructosa, lactosa y sacarosa. (Hernández, Alfaro & Arrieta, 2003)

Estas bacterias son las encargadas de fermentar la leche logrando una acidificación correcta de la misma y evitando la sinéresis en el producto, el *S. thermophilus* debido a la liberación de aminoácidos y péptidos de la leche es que da el cuerpo y aroma al yogurt, estas dos bacterias tienen un desarrollo simbiótico en el proceso de fermentación (Reyes Tello, 2008)

El yogurt debe su aroma a un equilibrio delicado entre sustancias volátiles ya presentes en la leche y los metabolitos secundarios sintetizados por las bacterias. En la fermentación estas bacterias convierten la lactosa en ácido láctico y pequeñas cantidades de acetaldehído, 2,3-butanodiona, y el 2,3 pentanodiona-, que conforman el típico aroma del yogurt. (Rúales Guzmán, 2012)

En el proceso de fermentación del yogurt la lactosa es transformada en piruvato través de la ruta de Embden-Meyerhof-Parnas, y posteriormente el piruvato es transformado en ácido láctico por el lactato deshidrogenasa. (Calixto Ortiz et al., 2016).

3.2 Lactosa

La lactosa es el componente mayoritario de la materia seca de la leche. Su contenido esta alrededor de los 50 g por litro de leche. La leche también presenta otros azucares en menor medida.

La lactosa es un glúcido reductor que pertenece al grupo de los diholósidos. Está formada por la unión de una molécula de α o β -glucosa y otra de β -galactosa. Su fórmula estructural implica la existencia de dos isómeros: α y β estas formas se distinguen por sus propiedades físicas y en particular por su poder rotatorio y sus caracteres de solubilidad y cristalización. (Veisseyre, 1985)

3.3 Ácido láctico

El ácido láctico (ácido 2-hidroxiopropanoico), es un compuesto incoloro de fórmula $\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$. Es una de las moléculas ópticamente activas más pequeñas de la naturaleza y se encuentra bajo dos formas: la dextrógira D (-) y levógira L (+), frecuentemente denominadas ácido láctico y ácido L-láctico. Es producido por animales, plantas y microorganismos en la naturaleza. También puede ser derivado a partir de intermedios con un origen en materiales renovables (por ejemplo, acetaldehído, etanol) o a partir de químicos derivados del carbón (acetileno) o aceites (etileno). (Suárez Zuluaga, 2007).

El ácido láctico es ampliamente utilizado en las industrias alimentaria, médica, farmacéutica y cosmética, como materia prima para síntesis orgánica, como purgante en forma de lactato de calcio o lactato de magnesio, como removedor de sales de calcio, en el curtido de pieles, en la producción de plásticos biodegradables, agroquímicos, etc. En soluciones acuosas, el ácido láctico no ionizado existe en equilibrio con los aniones lactato y los iones hidrógeno. Es fuertemente higroscópico y la presencia de dos grupos funcionales en su estructura (-OH, -COOH) lo hace formar espontáneamente, dímeros y polímeros de ácido láctico (Gil Horán, Domínguez Espinosa & Pacho Carrillo, 2008).

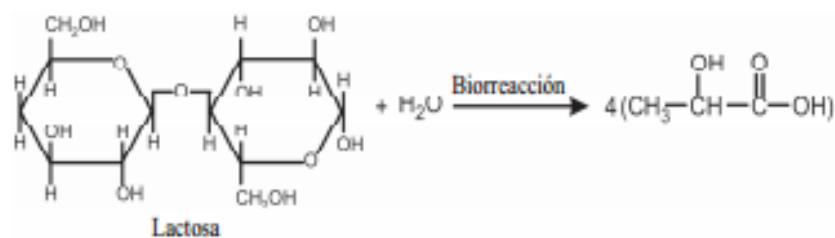


Fig. 1. Reacción estequiometria involucradas en la biorreacion de producción de ácido láctico.

Fuente: Gil Horán, R., Domínguez Espinosa, R. & Pacho Carrillo, J. (2008). Bioproducción de ácido láctico a partir de residuos de cáscara de naranja: Procesos de separación y purificación. *Tecnol. Ciencia Ed (IMIQ)*, 23(2), pp.79-90.

3.4 Proteínas de la leche

Las proteínas de la leche son de dos tipos, proteínas del lacto-suero y caseínas. Las caseínas constituyen más del 80% de las proteínas totales de la leche, aunque la proporción relativa de proteínas del lacto-suero frente a caseínas varía según el estado de lactación (Hernández Rojas & Vélez Ruiz, 2014).

Las caseínas Las caseínas de la leche se pueden subdividir básicamente en cuatro tipos, caseínas s1, s2, β y k que se encuentran en una proporción molar media de 3:0,8:3:1 respectivamente; Los distintos tipos de caseína se encuentran en todas las especies mamíferas estudiadas hasta el momento, aunque su proporción varía ampliamente según la especie, Sin embargo, a nivel ultra estructural, las micelas de caseína son similares en la mayoría de las especies (Ferrandini et al., 2006). Las caseínas son proteínas globulares y tienen un contenido de aminoácidos similar a los otros tipos, aunque la cisteína sólo está presente en pequeñas cantidades en las caseínas s2 y k. Una característica inusual de las caseínas es la modificación post-ribosoma que consiste en la fosforilación de los grupos hidroxilo de la serina. Los residuos de fosfoserina son, en parte, responsables de las propiedades únicas de las caseínas (Lasik et al., 2016).

El carácter anfifílico de las caseínas y su fosforilación facilita las interacciones entre ellas y con el fosfato cálcico para formar complejos esféricos altamente hidratados conocidos como micelas. Su tamaño es variable, oscilando su diámetro entre 30 y 300 nm (diámetro medio 120 nm, peso molecular 108). El 92% del contenido proteico de las micelas está constituido por caseínas s1, s2, y k con una relación media de 3:1:3:1. El 8% restante son compuestos inorgánicos, principalmente fosfato cálcico coloidal. Se cree que se distribuye en la micela en forma de fosfato cálcico amorfo y la presencia de iones calcio es absolutamente esencial para la formación de la micela (Chevallier et al., 2016).

3.4.1 Método de Kjeldahl

Este método es utilizado para determinar la cantidad de nitrógeno total en una muestra orgánica, el nitrógeno total en una muestra de leche agrupa las caseínas, las proteínas del suero y el nitrógeno no proteico; Consta de tres etapas, las cuales son digestión, destilación y titulación.

En la etapa de digestión se produce la descomposición del nitrógeno que contienen las muestras orgánicas utilizando una solución de ácido concentrado. Esto se obtiene haciendo llegar al punto de ebullición a la muestra obteniendo como resultado una solución de sulfato de amonio.

En la etapa de destilación se libera amoníaco, el cual es retenido en una solución con una cantidad determinada de ácido bórico. Inicialmente se realiza una destilación con vapor por el método de arrastre de vapor de agua, mediante la cual se acelera la obtención del destilado. Al final, se utiliza la titulación para valorar finalmente la cantidad de amonio presente en la muestra destilada. (Shahani and Sommer, 1951).

3.5 Sinéresis

La sinéresis es la expulsión o separación del lacto-suero debido a la contracción del gel esto afecta la calidad de los productos lácteos, porque se observa líquido en la superficie causando el rechazo por el consumidor. Es debido al re arreglo de la red molecular de caseína después de la formación del gel. Los principales factores de procesos asociados con la sinéresis son: rápida acidificación, alta temperatura de incubación, excesivo tratamiento térmico, bajo contenido de sólidos, muy baja

producción de ácidos y uso de renina (Acevedo, Rodríguez & Fernández, 2010). La sinéresis es un defecto del yogur que se previene usando estabilizantes o incrementando el contenido de sólidos totales de la leche que se destina para su producción (Reyes & Ludeña, 2015). La sinéresis de un yogurt puede ser evaluado por dos parámetros: el índice de sinéresis y el coeficiente de susceptibilidad a la sinéresis ambos parámetros deben ser medidos con el producto terminado y refrigerado El índice de sinéresis se reporta como una relación adimensional del peso de suero obtenido con el peso de la muestra inicial; mientras

que el coeficiente de susceptibilidad se expresa como la pendiente de la curva obtenida a diferentes revoluciones por minuto (Espinosa-Solares et al., 2014).

La sinéresis puede ser controlada con el uso de almidones en la materia prima y con la adición de pectina, se conoce que la pectina confiere al yogur calidad y estabilidad mediante su interacción con la caseína, la cual juega un papel muy importante en la estructura del gel (Castillo, Borregales & Sánchez, 2004).

3.6 Fermentación

La fermentación o acidificación está formada por dos fases: Siembra e incubación. La siembra consiste en la inoculación de las bacterias específicas del yogur, *Lb. bulgaricus* y *S. thermophilus*.

La fase de incubación corresponde al desarrollo de la acidez del yogur y depende de dos factores: la temperatura y el tiempo. La temperatura debe elegirse próxima a la temperatura óptima de desarrollo del *S. thermophilus*, es decir entre los 42 - 45°C, más que a una temperatura próxima a la óptima del *Lb. bulgaricus*, 47-50°C ya que es preferible que los *Streptococcus* inicien la fermentación, por otro lado, una temperatura entre 42- 45°C asegura una simbiosis óptima. El objetivo de esta fase es alcanzar un 0.9 % ácido láctico o pH 4.6 (Gonzales Berrios, 2006).

3.7 Simbiosis

El proceso de simbiosis se compone por 3 etapas; en la primera el *S.thermophilus* está en fase de latencia corta y se produce ácido fórmico, ácido pirúvico y dióxido de carbono, en este punto se asimila más rápido el oxígeno. En la segunda etapa el *L. Bulgaricus* produce péptidos y aminoácidos (valina, histiolina y treonina). Finalmente en la tercera etapa se define la tolerancia a ácido láctico la cuales son para el *S.thermophilus* 0,8% y para el *L. Bulgaricus* 1,7%.(He et al., 2014)

3.8 Cinética de la fermentación

L. bulgaricus y *S. thermophilus* son las bacterias del ácido láctico que convierten la lactosa en glucosa y galactosa usando la enzima galactosidasa. La glucosa y la galactosa se convierten posteriormente en piruvato y ATP a través de la vía glucolítica, y, a continuación, el piruvato se convierte en ácido láctico, para el análisis de la cinética de esta fermentación se deben seguir los efectos del carbono y los sustratos de nitrógeno,

temperatura, pH, y la función del lactato y ácido láctico (Aghababaie, Khanahmadi & Beheshti, 2015 a).

3.8.1 Efecto de la temperatura

La Ley de Arrhenius puede describir el efecto de la temperatura constante en la velocidad de reacción en algunas reacciones químicas específicas, a pesar de que no es apropiado para describir la dependencia del crecimiento de bacterias con la temperatura por esto (RATKOWSKY et al., 1983) propuso una relación lineal entre la raíz cuadrada de la constante de velocidad de crecimiento (r) y la temperatura absoluta (1) en grados Kelvin.

$$\sqrt{r} = b (T - T_0) \quad [1]$$

Donde b es un coeficiente de regresión y T_0 es la temperatura teórica que es una propiedad intrínseca del organismo evaluado. Ya que estas ecuaciones no pueden ser aplicadas a diferentes cepas de microorganismos se propuso una ley de Arrhenius modificada que describe el efecto de la temperatura en la constante de la tasa de crecimiento propuesta por (Esener et al. 1981).

$$F_T = \frac{e^{-\left(\frac{\Delta E_a}{RT}\right)}}{1 + A e^{-\left(\frac{\Delta G_a}{RT}\right)}} \quad [2]$$

3.8.2 Efecto del pH

El efecto del pH es muy importante en el seguimiento de la producción de ácido láctico en la fermentación del yogurt teniendo como base la biomasa que puede ser calculada con la ecuación de Luedekin y Piret. (Roy, Leduy, & Goulet, 1987)

$$\frac{dx}{dt} = X(\mu_{\max} - hP) \quad [3]$$

(Schepers, Thibault, & Lacroix, 2001) propusieron un modelo matemático para conocer el efecto del pH en la producción de ácido láctico utilizando el *Lactobacillus helveticus*

$$f_{pH} = \frac{C_1(pH_{opt} - pH)^2 + C_2}{(pH_{opt} - pH)^2 + C_3} \quad [4]$$

3.8.3 Producción de ácido láctico

“Para describir la influencia de la inhibición del producto en las bacterias del ácido láctico, algunos investigadores han separado el efecto de las formas disociadas y no disociadas del ácido láctico sobre la tasa de crecimiento considerando los dos términos.” (Venkatesh et al., 1993; Schepers et al., 2002b).

Por lo anterior, la concentración total de ácido láctico (P) es igual a la suma de sus formas disociada y no disociada ($CP = CHLa + CLa$), estas concentraciones pueden obtenerse según la correlación de Henderson-Hasselbach.

$$C_{HLa} = \frac{C_p}{1+10^{(pH-pKa)}} \quad [5]$$

$$C_{La} = \frac{C_p}{1+10^{(pKa-pH)}} \quad [6]$$

Ecuación de Luedeking-Piret para la formación de ácido láctico.

$$\frac{d_p}{d_t} = \alpha * \frac{d_x}{d_t} + \beta * X \quad [7]$$

Esta ecuación describe la formación de ácido láctico, donde α (g/g) y β (g/g.h) representan la constante de producción de ácido láctico asociada y no asociada al crecimiento respectivamente.

3.9 Sistemas de control

Definimos un sistema de control como el conjunto de elementos que funcionan de manera concatenada para proporcionar una salida o respuesta deseada. Los componentes básicos de un sistema de control pueden ser descritos por los objetivos de control, los componentes del sistema de control, los resultados o salida la relación básica entre estos tres componentes se muestra en la Figura n° 1.

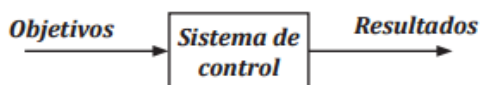


Fig. 2. Diagrama en bloque del sistema de control básico.

Fuente: Carrillo Paz, A. (2011). Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado (2nd ed., pp. 20-29). Santa Rita: UNERMB

3.9.1 Tipos de sistemas de control

Los tipos de sistemas de control más comunes son los sistemas de control a lazo abierto y los sistemas de control a lazo cerrado.

3.9.1.1 Sistema de control lazo abierto

Es aquel sistema de control en el que la salida no es afectada por la señal de entrada. La salida no se realimenta para compararla con la entrada. Los elementos de un sistema a lazo abierto usualmente están divididos en dos partes, el controlador y el proceso controlado, véase la Figura n° 3.

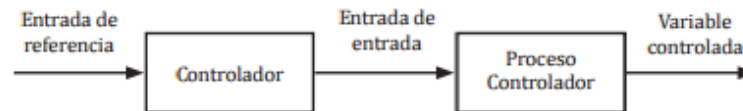


Fig. 3. Diagrama en bloque de un sistema de control de lazo abierto.

Fuente: Carrillo Paz, A. (2011). Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado (2nd ed., pp. 20-29). Santa Rita: UNERMB

3.9.1.2 Sistema de control lazo cerrado (control realimentado)

En el sistema de control a lazo cerrado, el controlador se alimenta de la señal de error de desempeño, la cual representa la diferencia entre la señal de entrada y la señal de realimentación con el fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor deseado. El término lazo cerrado siempre indica una acción de control realimentado para reducir el error del sistema. Véase la Figura n° 4.

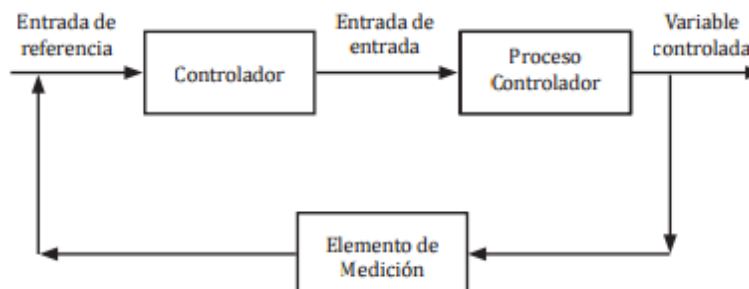


Fig. 4. Diagrama en bloque de un sistema de control de lazo cerrado
 Fuente: Carrillo Paz, A. (2011). *Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado* (2nd ed., pp. 20-29). Santa Rita: UNERMB.

Una de las ventajas importantes que presenta este tipo de sistema de control es que se hace insensible a las perturbaciones y mantiene su exactitud; de la comparación de la señal realimentada y la señal de entrada resulta la señal de error, la que es minimizada con la acción de control. Sus principios son aplicables a sistemas que presentan perturbaciones o variaciones imprevisibles en los componentes del sistema (Carrillo Paz, 2011).

3.10 Filtración

La filtración es el proceso que se enfoca en la separación de la materia sólida suspendida de un líquido, al hacer que este último pase a través de los poros de alguna sustancia, este proceso se lleva a cabo a través de un equipo conocido como filtro y el líquido que ha pasado a través del filtro se llama filtrado. El filtro puede ser de papel, tela, algodón hidrófilo, asbesto, lana de vidrio, loza de barro sin esmaltar, arena u otro material poroso. (Weber, 1979)

3.10.1 Equipos de filtración

3.10.1.1 Filtros de presión

Los filtros de presión, con la excepción del filtro de presión de tambor rotatorio, son máquinas de tipo semi-continuo que entran en una sección de lavado y en el cual el modo de descarga de la torta se encuentra al final del ciclo de filtración. El ciclo de filtración puede extenderse desde 5 a 10 minutos en aplicaciones de filtración de la torta y hasta 8 horas o incluso más para el pulido de los líquidos. La recolección de filtrado depende del modo de funcionamiento del filtro, que puede ser de velocidad constante de flujo, presión constante o trabajar con aumento presión y tasa de reducción para una bomba centrífuga de flujo. (Pineda Santos, 2005)

3.10.1.2 Filtro prensa

El filtro prensa se compone de una cabeza y un seguidor que contiene un paquete de placas rectangulares verticales, cada placa está revestida con tela filtrante en ambos lados que, una

vez presionado el conjunto, forman una serie de cámaras que dependen del número de placas. Todo el paquete de placas está soportado por vigas de arriba o de lado y puede manejar un área de hasta 1000 m² y 20 m³ de torta. (Ventosilla, 2014)

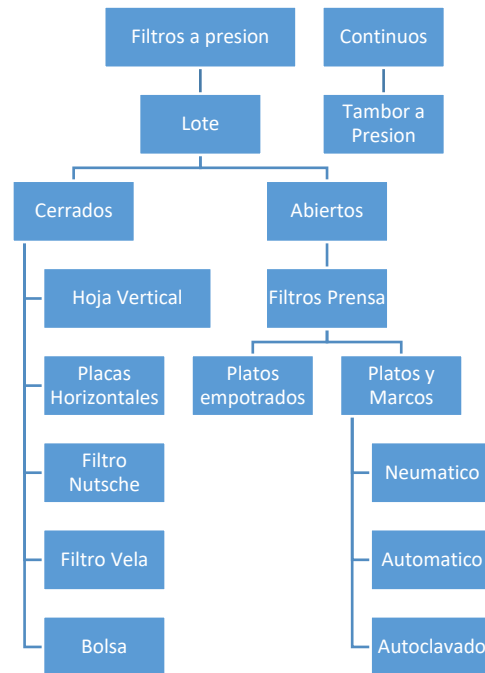


Figura 5: Clasificación Filtros a Presión

3.10.1.3 Filtro de placa horizontal

Estos filtros se aplican comúnmente a las industrias de procesos químicos finos tales como antibióticos, pesticidas o pigmentos cuando la carga de insolubles impuros es baja y se requiere de un pulido para obtener una alta claridad del producto. Sin embargo, en los últimos años se han incorporado cada vez más en las industrias pesadas, tales como fertilizantes o metales preciosos cuando el producto es la torta, el lavado eficiente y se requieren bajas humedades. La estructura de filtro consiste en una pila de placas unidas a un eje hueco que están montados dentro de un recipiente a presión, cada placa se encuentra cubierta con un medio de filtro adecuado. Maneja un área de hasta 60 m² y 4 m³ de capacidad de torta. (Briones C., 2010)

3.10.1.4 Filtro de hoja vertical

Estos filtros son bastante similares a los de placa horizontal a excepción de la orientación de los elementos de filtro que son verticales en lugar de horizontales. Se aplican para las suspensiones de pulido con muy bajo contenido de sólidos de 1-5% o por filtración de torta con una concentración de sólidos del 20-25%. Maneja un área de hasta 100 m² y 7 m³ de capacidad de torta en recipientes a presión vertical y hasta 300 m² y 20 m³ de capacidad de torta en recipientes horizontales. (Cadena Ríos, 2008)

3.10.1.5 Nutsche

El filtro Nutsche es la versión industrial del conocido embudo Buchner de escala de laboratorio, excepto que está diseñado para operar ya sea en vacío o presión; la mayoría funciona, por lo general bajo presión, en las industrias orientadas por lotes, tales como productos de química fina, tintes, productos farmacéuticos y pesticidas. Estos filtros son muy adecuados para el manejo de materiales inflamables, tóxicos, corrosivos o de olor nocivo, puesto que se esterilizan en autoclave, además son diseñados para ser usados en entornos peligrosos y antiexplosivos; hay que tener en cuenta que, cuando se requiere un funcionamiento extremadamente seguro, están disponibles en casi cualquier tamaño. Tales filtros tienen un área de filtración de 15 m² y son adecuados para las suspensiones de filtrado rápido que producen fácilmente 0,5 m de tortas gruesas. (Monteros Cárdenas, 2012)

3.10.1.6 Filtro automático

El filtro automático a presión se asemeja a algunos filtros de presión en medida, pero con placas que se apilan horizontalmente para formar una torre, cambiando así el sentido de la filtración de horizontal a vertical. El diseño vertical ahorra espacio y un filtro que tienen 150 m² cabe en menos de 90 m², pero sí requieren un espacio libre para adaptarse a una altura de 6 metros.

3.10.1.7 Vela

Estos filtros como todos los filtros de presión, opera en un ciclo de proceso por lotes y que se pueden ver en el manejo de dióxido de titanio, gases de combustión, clarificación salmuera, barro rojo, arcilla china, productos de química fina, y muchas otras aplicaciones que requieren una torta de baja humedad, líneas de proceso filtración o alto grado de pulido, también se utilizan para el espesamiento, es decir para producir una suspensión

fluida concentrada mediante la eliminación parcial de la fase líquida como filtrado. Este modo de operación es posible puesto que pueden operar en tiempos de ciclos muy cortos y se aprovechan las altas velocidades de filtración, mientras que las tortas son todavía delgadas. Pueden filtrar hasta 120 m². (Pérez Vidal, Díaz Gómez, & González Rojas, 2014)

3.10.1.8 Filtro de tambor rotatorio al vacío

Consiste en un tambor giratorio en una tina de líquido a filtrar. La técnica es muy adecuada para lodos y líquidos con un alto contenido en sólidos, lo que podría obstruir otras formas de filtro. El tambor está pre-recubierto con un coadyuvante de filtración, por lo general de tierra de diatomeas (DE) o perlita, el líquido a filtrar se envía a la cuba por debajo del tambor. El tambor gira a través del líquido y el vacío aspira líquido y sólidos sobre la superficie pre-capta de tambor, la parte líquida se "aspira" por el vacío a través de los medios de filtro a la parte interna del tambor, y el filtrado se bombea. Los sólidos se adhieren a la parte exterior del tambor, que pasa entonces a un cuchillo, cortando los sólidos y una pequeña porción de los medios de filtro para revelar una superficie de medio fresco que entrará en el líquido cuando gira el tambor. El cuchillo avanza automáticamente a medida que se retira de la superficie. (Narvárez Toro, Vinazco Isaza, Torres Muñoz, & Guerrero Bueno, 2014)

3.11 Sistema de control de velocidad

En el sistema de control de velocidad mostrado en la Figura n° 6, desarrollado por James Watt, la cantidad de combustible que admite la máquina se ajusta de acuerdo con la diferencia de velocidad establecida como parámetro de operación (Objetivo de Control) y la velocidad real de la máquina. El funcionamiento se describe así: el regulador de velocidad se ajusta de manera que al alcanzar la velocidad deseada, no fluya aceite a presión a ningún lado del cilindro de potencia; si la velocidad real cae por debajo de la velocidad deseada debido a una perturbación, la disminución de la fuerza centrífuga del regulador de velocidad hace que la válvula de control se mueva hacia abajo, aportando más combustible y la velocidad del motor aumenta hasta alcanzar el valor deseado, así mismo, si la velocidad del motor aumenta por encima del valor deseado, el incremento de la fuerza centrífuga hace que la válvula de control se mueva hacia arriba, esto disminuye la entrega de combustible y la velocidad del motor disminuye hasta alcanzar el valor deseado. En este

sistema la variable controlada (salida) es la velocidad del motor y el sistema de control es la máquina, y la entrada es el combustible (gasolina). (Ogata, 2003)

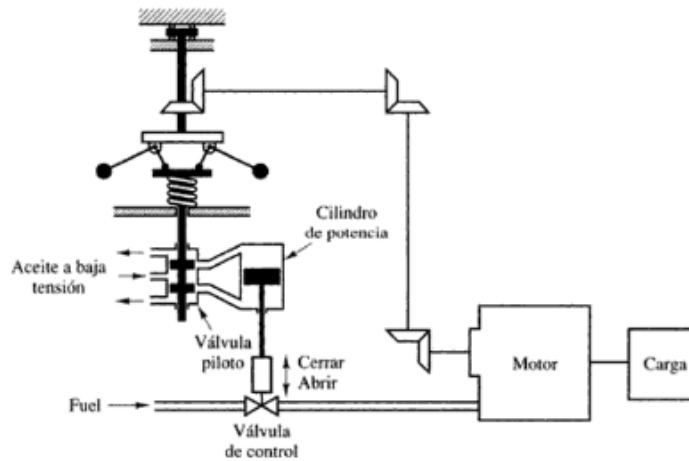


Fig. 6. Esquema del sistema de control en motores eléctricos
Fuente: Ogata, K. (2003). Ingeniería de control moderna (4th ed., pp. 3-7). Madrid: Prentice Hall.

La velocidad de giro de un motor de corriente alterna está definida por la siguiente expresión:

$$N = 60 * \frac{F}{p} \quad [8]$$

N= la velocidad de giro en r.p.m

F= es la frecuencia de la red en Hz

P= es el número de pares de polos del motor

Está claro que, modificando la frecuencia o el número de pares de polos del motor se cambia la velocidad de giro.

3.11.1 Variación de la velocidad por cambio del número de pares de polos

El número de pares de polos solamente se puede definir en el momento de la construcción del devanado del motor. Por tanto, en este sentido, si está previsto que una máquina

funcione a diferentes velocidades, su devanado debe diseñarse de tal manera que desde su caja de bornes se pueda elegir la velocidad de funcionamiento.

Basado en el cambio de velocidad en función del número de pares de polos, dos son los métodos habituales utilizados para la construcción de motores

- Motor con devanados separados
- Motor con devanados compartidos o tomas intermedias.

3.11.2 Variación de velocidad por variadores de frecuencia

Otra forma de variar la velocidad de un motor de corriente alterna se consigue cambiando la frecuencia de su alimentación, mediante los denominados variadores de frecuencias. Un variador de frecuencia es un dispositivo de electrónica de potencia que como su nombre lo dice es capaz de modificar la frecuencia en hercios de la alimentación de un motor. Estos variadores trabajan entre el rango mínimo y máximo de frecuencia de los motores haciéndolo muy eficiente. La programación de los variadores de frecuencia, estos equipos disponen de varios parametros para funcionar correctamente entre ellos la rampa de aceleración y la rampa de deceleración.

Rampa de aceleración, es el tiempo en segundos que se emplea para que el motor consiga la velocidad preprogramada.

Rampa de deceleración, “es el tiempo en segundos que se emplea para que el motor disminuya su velocidad hasta detenerse o alcanzar otra velocidad preprogramada inferior.”

(Martín Castillo & García García, 2009)

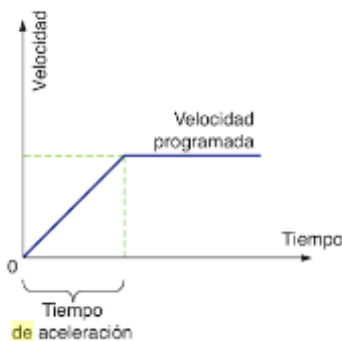


Fig. 7. Grafica de aceleración.

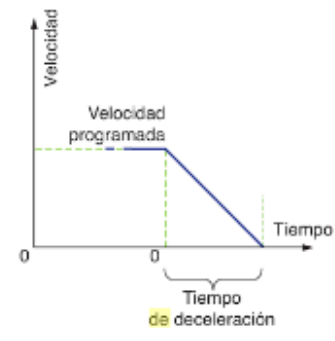


Fig. 8. Grafica de deceleración.

Fuente fig. 7 y fig. 8: Martín Castillo, J. & García García, M. (2009). Automatismos industriales (1st ed., pp. 208-212). Madrid: Editex.

El fundamento tecnológico de la regulación electrónica de velocidad en motores, es regulador electrónico de velocidad que está formado por circuitos que incorporan transistores de potencia como el IGBT o tiristores, siendo el principio básico de funcionamiento transformar la energía eléctrica de frecuencia industrial en energía eléctrica de frecuencia variable. Esta variación de frecuencia se consigue mediante dos etapas en serie. Una etapa rectificadora que transforma la corriente alterna en continua, con toda la potencia en el llamado circuito intermedio y otra inversora que transforma la corriente continua en alterna, con una frecuencia y una tensión 24 regulables, que dependerán de los valores de consigna. A esta segunda etapa también se le suele llamar ondulator. Todo el conjunto del convertidor de frecuencia recibe el nombre de inversor (Fig.9)

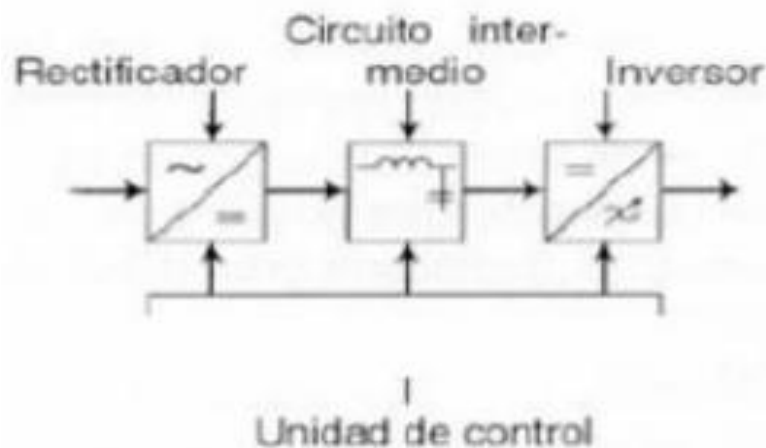


Fig. 9. Convertidor de frecuencia

Fuente: Torres, J. (2015). Señalización de fallas de drives de prensa 1 en el área de laminación (pregrado). Universidad tecnológica de Querétaro.

El modo de trabajo puede ser manual o automático, según las necesidades del proceso, dada la enorme flexibilidad que ofrecen los reguladores de velocidad, permitiendo hallar soluciones para obtener puntos de trabajo óptimos en todo tipo de procesos, pudiendo ser manejados por ordenador, PLC, señales digitales o de forma manual. (Torres, 2015)

3.12 Control de revoluciones

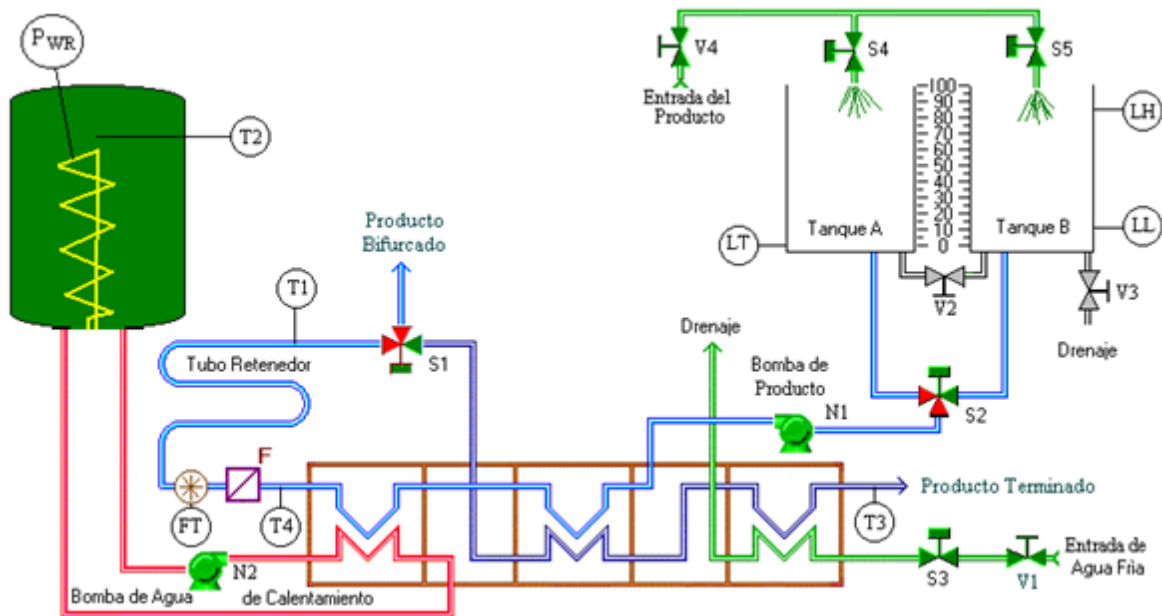


Fig. 10. Esquema de un sistema de control en un proceso productivo.

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación tal es el caso del procesamiento de leche y mezcla de fluidos. La agitación se refiere al movimiento inducido de un material en una forma específica, generalmente con un modelo circulatorio dentro de algún tipo de contenedor, la producción lechera utiliza un tanque de leche o enfriador de leche a granel que es una tina de depósito empleada para enfriar y conservar la leche a baja temperatura bajo normas de fabricación las cuales definen el aislamiento, la agitación de la leche, la potencia de enfriado, las tolerancias aceptables en las mediciones de cantidad de leche, la calibración. Casi todos los tanques disponen de una caja de comandos con un termostato que controla el proceso de enfriado. La persona responsable puede poner en marcha o detener el tanque, comandar la agitación de la leche, iniciar el proceso de lavado del interior del tanque y reiniciar el sistema. Los tanques más recientes y de gran capacidad están equipados con un sistema de control y alarma. Esos sistemas verifican la temperatura del interior del tanque, el funcionamiento del agitador, el equipo de frío y la temperatura del agua de lavado. En caso de mal funcionamiento, se dispara una alarma. Esos sistemas pueden además guardar en la memoria la temperatura y el mal funcionamiento por un determinado período. La agitación se refiere a forzar un fluido por medios mecánicos para

que adquiera un movimiento circulatorio en el interior de un recipiente. El agitador crea un cierto tipo de flujo dentro del sistema, dando lugar a que el líquido circule por todo el recipiente y vuelva de vez en cuando al agitador.

4. Metodología

4.1 Medición de los parámetros base

Se analizan algunos parámetros de la leche fresca para conocer sus porcentajes y se realiza los análisis por un periodo de 5 semanas para tener un valor promedio de cada variable a analizar.

4.1.1 Porcentaje de lactosa

Para el análisis del porcentaje de lactosa se toman muestras diarias por 5 semanas para conocer el valor promedio de lactosa que se recibe en la empresa. Para esto se toman los datos con un equipo de ultrasonido LAC-S BOECO para cada proveedor de leche de la planta y se toma una muestra total de la leche a utilizar en la producción del yogurt.

Por otra parte se determina el porcentaje de lactosa consumido en el proceso con el equipo de ultrasonido LAC-S BOECO tomando muestras cada 30 minutos en el proceso de elaboración del yogurt este proceso toma alrededor de 8 horas desde el momento de la recepción hasta el momento del enfriamiento esto se realiza en cuatro lotes diferentes en el transcurso de un mes para tener un promedio de la velocidad de desaparición de lactosa.

4.1.2 Porcentaje de proteínas

El porcentaje de proteínas se determina de dos formas; la primera con el ultrasonido LAC-S BOECO para tener un se calcula por la correlación entre el porcentaje de nitrógeno. En el caso del análisis con el ultrasonido LAC-S BOECO se determinan por un periodo de 5 semanas para conocer el valor promedio del porcentaje de proteína de la leche que llega a la empresa para la parte del cálculo de proteína por correlación con la cantidad de nitrógeno se lleva a cabo únicamente en los lotes de producto que sean analizados en conjunto con lactosa y otros parámetros para así determinar el modelo cinético.

4.1.3 Determinación del porcentaje de nitrógeno total

Para la determinación del porcentaje total de proteínas se utiliza el método de Kjeldahl el cual consiste en tres etapas digestión, destilación, valoración.

- Digestión: Colocar la cantidad adecuada de muestra (de acuerdo al contenido estimado de nitrógeno) entre 0,1 y 4 g con una precisión de ± 1 mg, en un balón Kjeldahl de 500 ml. Agregar el catalizador, perlas de vidrio y 15-20 ml de H_2SO_4 al 98%. Todo el material

debe estar sumergido en el ácido para que no haya pérdidas de nitrógeno. Conectar el balón a una trampa de agua y calentar la mezcla suavemente hasta que cese el desprendimiento de espuma; luego calentar enérgicamente hasta completar la digestión de la materia orgánica (no se observan partículas carbonosas sin oxidar y el líquido queda translúcido y de color débilmente verdoso o azul-verdoso). La digestión demanda entre 1 y 2 horas. Enfriar y agregar 200ml de agua a la muestra.

- Destilación: Presentar el balón con la muestra digerida a un refrigerante por medio de una trampa adecuada. Preparar un Erlenmeyer con 25-50 ml de H_3BO_3 4% (sobre el cual se va a recoger el NH_3 destilado) y gotas de indicador Mortimer (color rojo), y colocarlo a la salida del refrigerante quedando sumergido en la solución ácida. Antes de conectar completamente el balón se va agregando la cantidad necesaria de solución de NaOH 40% para neutralizar el ácido sulfúrico, primero sin agitar para que se ubique en el fondo, y una vez agregado todo, conectar bien el balón, agitar para lograr la mezcla (el medio se hace fuertemente alcalino y se detecta por formación de un precipitado pardo oscuro, dispersado; simultáneamente se comienza el calentamiento a ebullición del contenido del balón. El indicador vira a azul cuando empieza a destilarse el NH_3 por arrastre en corriente de vapor. Se sigue destilando hasta llegar a aproximadamente 200 ml en el erlenmeyer colector. Una vez alcanzado dicho volumen, se retira el erlenmeyer enjuagando dentro del mismo el extremo del refrigerante, para no perder nitrógeno y luego se apaga el calentamiento.
 - Valoración: El destilado se valora con solución de H_2SO_4 0.2 N, hasta lograr el viraje del indicador Mortimer al color inicial rojo.
- d) Blanco: Se debe realizar un blanco de reactivos, siguiendo las mismas indicaciones, pero sin colocar muestra en el balón.

4.1.4 Porcentaje de grasas

El porcentaje de grasas se determina con el ultrasonido LAC-S BOECO, este parámetro es seguido por 5 semanas para determinar un valor promedio de la leche que llega diariamente a la empresa, con este valor podemos tener valores base del tipo de leche que se utiliza en la elaboración de yogurt.

4.1.5 Porcentaje de solidos no grasos

El porcentaje de solidos no grasos se determina con el ultrasonido LAC-S BOECO, este parámetro se sigue por un periodo de 5 semanas para conocer cómo afecta de manera directa la sinéresis del producto final, por tanto, se encontrará un valor promedio del mismo.

4.1.6 Determinación de la Sinéresis

La sinéresis se mide después de un día de almacenamiento del producto, refrigerado a 3°C en promedio, después se agitan las muestras de yogurt por 2 minutos, a 400 rpm, con un agitador magnético y, posteriormente, se centrifugan a 1380 rpm a temperatura ambiente por 10 minutos. La sinéresis, se calcula como la cantidad de líquido que se separa del yogurt, debido a la centrifugación con relación a la masa total que fue centrifugada. (Castillo, borregales and Sánchez, 2004). Este proceso se llevara a cabo en los lotes que serán analizados a lo largo de un mes en la empresa, para conocer así un promedio de la sinéresis que se produce en el yogurt de la empresa Coolactame Ltda.

Al conocer este valor de la sinéresis se determinará si está dentro de los límites permitidos en un yogurt entero y se plantearán alternativas de mejoras en el proceso para disminuir los porcentajes de sinéresis que ocasionan baja calidad en el producto.

4.2 Desarrollo de sistemas de control

Para el desarrollo de los sistemas de control se tendrán en cuenta los siguientes parámetros.

4.2.1 sistema de control de la velocidad de agitación

El sistema de control de la velocidad de agitación tendrá en cuenta, a su vez, los siguientes parámetros:

- Determinación de la velocidad de agitación actual: En este primer punto se determinaran las revoluciones actuales del agitador utilizando un tacómetro digital TACHOMETER DT-2234C⁺ el cual tiene un rango de operación de 2.5 a 99.999 RPM y una exactitud: +/- (0.05%+1 dígito) según datos del fabricante.

- Determinación del mejor sistema de control para la velocidad de agitación: Seguidamente se determinará el mejor sistema de control que se ajuste a los rangos de velocidad necesarios para llevar a cabo la fermentación en el birreactor.

Actualmente el fermentador cuenta con un motor de inducción eléctrica de rotor bobinado conectado a un agitador de paleta con inclinación de 45°.

4.3 Sistema de control de impurezas

Para el desarrollo del sistema de control de impurezas se tendrán en cuenta los siguientes parámetros:

- Determinación del tamaño de las impurezas presentes en el fermentador: Para llevar a cabo este paso de la metodología se toman muestras periódicas de las impurezas presentes en la materia prima y se determinan sus tamaños utilizando el método de reducción por tamices (Norma ASTM C136-1).
- Diseño del control: El control básicamente consiste en un filtro continuo con múltiples tamaños de mallas estandarizados por la (Norma ASTM C136-1.) el cual se diseña en acero inoxidable con secciones intercambiables de los tamices.
- Análisis de la disminución de flujo en la recirculación: Este análisis se hará con el fin de conocer la disminución en el flujo que pasa en la recirculación ya que al integrar un filtro esto hará que se presente una caída de presión en la tubería de la recirculación ocasionando demoras en el proceso de recirculación del producto por lo tanto es importante analizar los costos de estas demoras.

4.4 Elaboración del diagrama PFD del proceso de elaboración del yogurt

Este diagrama se realiza en Visio Profesional 2013 de Microsoft Corporation para la elaboración del diagrama se tendrán en cuenta el balance de materia y energía del proceso, los cuales serán analizados tomando los datos específicos de las cantidades de entrada y salida de materia que influyen en el proceso directamente.

Para el balance de energía se tomaran las presiones de entrada de vapor al fermentador, también se tomaran los valores de la temperaturas del vapor que entra al fermentador y se calculara el valor de la energía necesaria para aumentar la temperatura del fermentador a

85°C por 10 minutos luego se analizara el tiempo y la temperatura de entrada del refrigerante al fermentador, el análisis de la energía requerida en la centrifuga y el homogeneizador se llevara a cabo calculando el tiempo de uso del equipo para cada lote y la relación de energía eléctrica que utiliza en este periodo de tiempo. Finalmente stos balances se determinaran de acuerdo a un lote estándar de yogurt de la empresa que está alrededor de los mil litros de leche por lote.

4.5 Elaboración del diagrama P&ID

Se elaborará el diagrama P&ID teniendo en cuenta los sistemas de control que posee el fermentador para el flujo de vapor y refrigerante, también para los sistemas de control que se proponen en este trabajo. Este diagrama es aborado en Visio Profesional 2013 de Microsoft Corporation utilizando las numerosas opciones de dicho software.

4.6 cinética de fermentación

Para el estudio de la cinética de fermentación se prepara un lote de yogurt en el fermentador siguiendo las formulaciones actuales de la empresa y se miden la lactosa y el ácido láctico presente a lo largo de tiempo hasta alcanzar el punto isoeléctrico de las caseínas.

El seguimiento del pH y del contenido de lactosa en el proceso de fermentación es medido con un ultrasonido LAC-S BOECO. para este análisis también se realiza un seguimiento a la producción de ácido láctico en el transcurso del proceso de fermentación el cual se define a continuación.

Teniendo estos datos se realizan los cálculos correspondientes al consumo de sustrato y la cinética de producción del ácido láctico a lo largo de la fermentación, por otra parte, se elaboran las gráficas correspondientes al modelo cinético que se presenta en la fermentación con los datos de consumo de lactosa y de producción de ácido láctico.

4.6.1 seguimiento del ácido láctico

Se toman muestras cada 30 minutos a lo largo del proceso de fermentación la cual dura aproximadamente 3 horas desde el momento de la adicción del cultivo hasta el momento de la refrigeración, para este seguimiento se realizan titulaciones con NaOH para conocer los grados dornic, ya que, con la correlación entre grados dornic y ácido láctico, podremos conocer la cantidad de ácido presente en las muestras; por otra parte se le hacen pruebas de

espectrofotometría a una longitud de onda de 340 nm para determinar los valores de ácido láctico presente y se comparan los resultados obtenidos entre la correlación y los valores arrojados por el espectrofotómetro.

Al conocer la curva de calibración se pueden obtener datos verídicos de la producción del ácido láctico en esta fermentación. Esta curva relaciona la concentración de al menos cinco soluciones estándar de concentraciones conocidas, con la absorbancia de cada uno de ellos a la longitud de onda máxima (λ Max). Una vez obtenida la gráfica, se determina la función matemática que presenta dicha recta a través del tratamiento estadístico de regresión de los mínimos cuadrados, la cual relaciona la absorbancia y la concentración del analito. Luego se mide la absorbancia de la solución problema y se interpolará su valor en la gráfica o se reemplazará en la ecuación que las relaciona. Para obtener el valor de concentración del analito, la concentración de la solución problema debe estar comprendida en el mismo rango de concentración que la curva de calibración, si la concentración de la solución problema es menor que la concentración del estándar más diluido, debe usarse el método de adición estándar, que consiste en adicionar un volumen determinado de un estándar concentrado a la solución problema, esto se hace antes de realizar la lectura, pues permite que esta esté dentro de las obtenidas para la curva de calibración. En el caso contrario, si la concentración del analito es mayor que la concentración del estándar más concentrado la solución problema, deberá ser diluida.

Para las corridas en el espectrofotómetro se utilizan 2 gramos de yogurt y se diluyen en 98 ml de agua destilada, y se toman los valores de la absorbancia cada 30 minutos hasta alcanzar una acidez de 50° Dornic el cual es el punto donde se refrigera el yogurt, al utilizar cultivo de post-acidificación se inhibe está por debajo de los 10° C para el caso del ABY-3 que se utiliza en la empresa.

5. Resultados y Análisis

5.1 Resultados parámetros bases

Los valores de los parámetros base se relacionan en la siguiente tabla organizadas por semanas los datos totales se pueden ver en el anexo A. estos valores se determinaron con el ultrasonido LAC-S BOECO. estos datos se tomaron en la ciudad de Tame -Arauca.



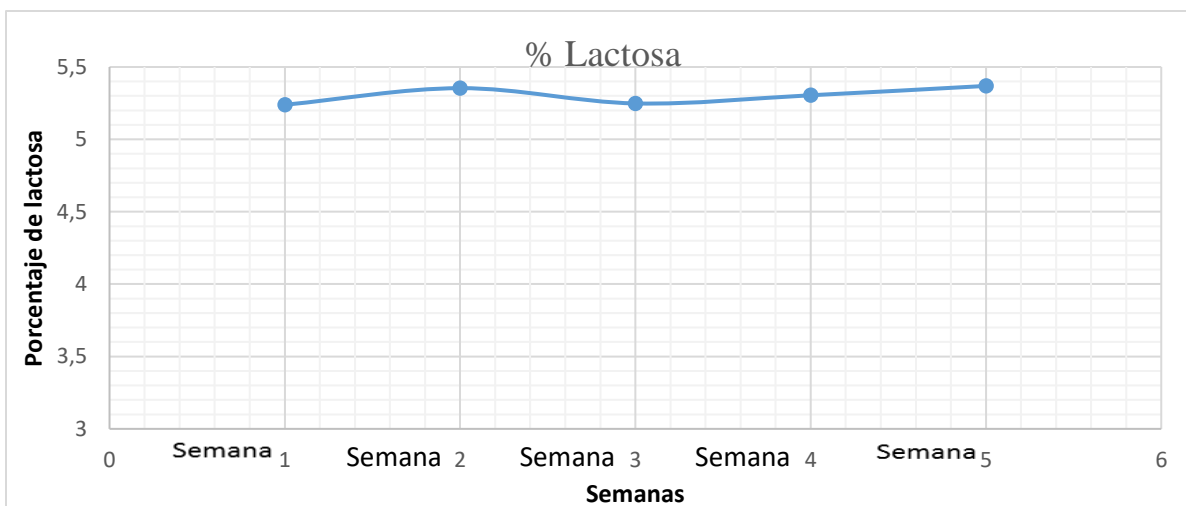
Fig.11. Ultrasonido LAC-S BOECO de la empresa Coolactame Ltda.

5.1.1 Porcentaje de Lactosa

El porcentaje de lactosa en la leche se determinó con el ultrasonido LAC-S BOECO por un periodo de 5 semanas, obteniendo los promedios semanales de lactosa, de la leche que ingresa a la empresa Coolactame Ltda. En la tabla 1 se presenta estos datos.

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Promedio	5,239	5,353	5,248	5,304	5,369
Máximo	5,65	5,89	5,71	5,78	5,83
Mínimo	4,84	4,78	4,8	4,99	5,21
Moda	5,2	5,34	5,22	5,22	5,22

Tabla 1. Relación semanal del porcentaje de Lactosa



Grafica 1. Variación del porcentaje de lactosa promedio, a lo largo de cinco semanas.

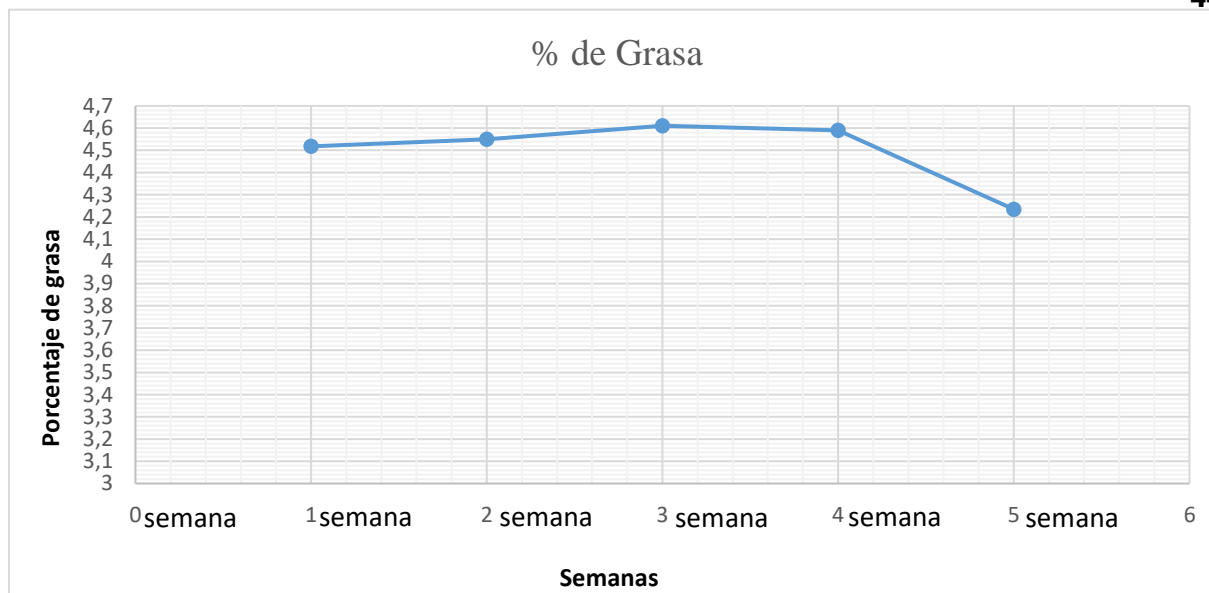
De acuerdo con la tabla 1 y la gráfica 1, se puede observar que el porcentaje de lactosa está entre los valores de 5,23 y 5,36, los cuales son valores óptimos para la fermentación láctica que se lleva a cabo en la producción de yogurt, estos valores de porcentaje de lactosa no presentaron variaciones significativas a lo largo de las 5 semanas de seguimiento que se llevó a cabo en la empresa Coolactame.

5.1.2 Porcentaje de grasa

El porcentaje de grasa en la leche se determinó con el ultrasonido LAC-S BOECO por un periodo de 5 semanas, obteniendo los promedios semanales de grasa de la leche que ingresa a la empresa Coolactame Ltda. En la tabla dos se presenta estos datos. (Los datos completos se pueden ver en el anexo A.

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Promedio	4,518	4,550	4,610	4,590	4,234
Máximo	5,84	5,83	6,32	5,81	5,12
Mínimo	2,48	2,64	3,07	3,22	3,32
Moda	4,73	5,7	5,22	5,01	5,01

Tabla 2. Porcentaje de grasa



Grafica 2. variación del porcentaje de grasa promedio, a lo largo de cinco semanas.

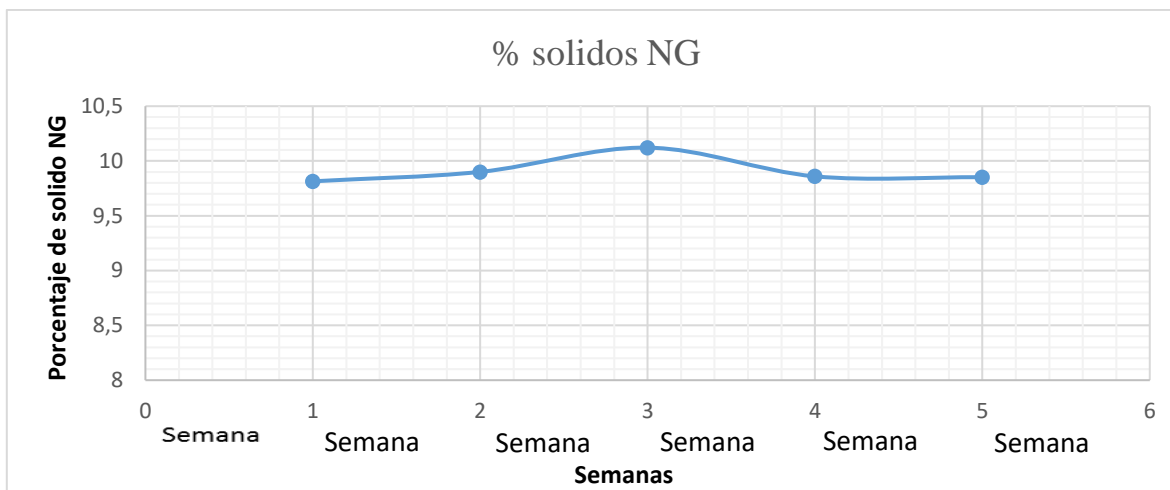
De acuerdo con la tabla 2 y la gráfica 2 se puede observar que el promedio semanal de grasa a estado bajando en las últimas semanas lo cual favorece la producción del yogurt porque esta variable afecta directamente el porcentaje de sinéresis que se presenta en el yogurt terminado (Hernández Carranza, 2004). Esto se puede deber al incremento de las lluvias en la zona y el ganado esta empezado a recibir pasto con mayor contenido de agua lo cual ayuda en la disminución del porcentaje de grasa que se presenta en la leche que llega a la empresa.

5.1. 3 Porcentaje de solidos no grasos

El porcentaje de solidos no grasos en la leche se determinó con el ultrasonido LAC-S BOECO por un periodo de 5 semanas, obteniendo los promedios semanales de grasa, de la leche que ingresa a la empresa Coolactame Ltda. En la tabla 3 se presenta estos datos. (Los datos completos se pueden ver en el anexo A.)

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Promedio	9,814	9,900	10,121	9,859	9,852
Máximo	10,35	10,73	10,87	10,51	10,51
Mínimo	9,26	9,09	8,98	8,34	8,69
Moda	9,79	9,65	10,01	9,89	9,77

Tabla 3. Porcentaje de solidos no grasos



Grafica 3. Variación del porcentaje de solidos NG promedio, a lo largo de cinco semanas.

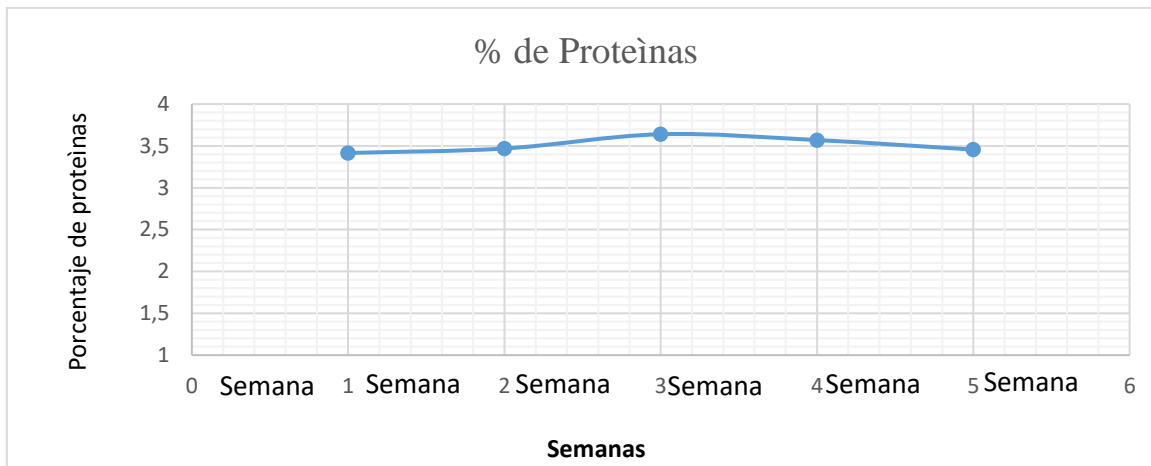
De acuerdo con la tabla 3 y la gráfica 3 se puede observar que el porcentaje de solidos totales de la leche que ingresa a la planta no ha variado mucho en relación a su promedio semanal, de acuerdo a estos resultados se puede ver que este valor está dentro de los parámetros óptimos para fabricación del yogurt entero ya que este parámetro afecta directamente las propiedades reológicas del producto terminado.

5.1.4 Porcentaje de proteína

El porcentaje de proteína en la leche se determinó con el ultrasonido LAC-S BOECO por un periodo de 5 semanas, obteniendo los promedios semanales de grasa, de la leche que ingresa a la empresa Coolactame Ltda. En la tabla 2 se presenta estos datos. (Los datos completos se pueden ver en el anexo A.)

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5
Promedio	3,415	3,468	3,639	3,569	3,455
Máximo	3,61	3,75	3,99	3,91	3,99
Mínimo	3,21	3,23	3,08	3,14	3,08
Moda	3,44	3,41	3,81	3,79	3,22

Tabla 4. Porcentaje de proteínas



Grafica 4. Variación del porcentaje de proteínas promedio, a lo largo de cinco semanas

De acuerdo con la tabla 4 y la gráfica 4 se puede observar el promedio semanal del porcentaje de nitrógeno de la leche que se recibe en la empresa Coolactame el cual no tiene variaciones significativas lo que indica un alto grado de homogeneidad en estos lotes ya que esta propiedad influye directamente en la coagulación del yogurt debido a las caseínas de las cual está compuesta mayormente las proteínas de la leche, al presentar un valor estable en el porcentaje de proteínas ayuda a que los distintos lotes de producción tengan una consistencia similar y no hallan variaciones importantes en este aspecto del producto terminado.

5.1.5. Porcentaje de nitrógeno total

El porcentaje de nitrógeno total fue analizado con el método de Kjeldahl, en los diferentes lotes de producción de la empresa Coolactame.

Para el análisis de nitrógeno total se utilizaron los siguientes reactivos

- H_2SO_4 con. p.a. (98%)
- Catalizador: K_2SO_4 o Na_2SO_4 anhidro + $\text{CuSO}_4 \cdot 5 \text{H}_2\text{O}$ p.a. (relación 10:1)
- NaOH 40%
- Solución H_3BO_3 4%
- Solución H_2SO_4 0,2 N
- Indicador Mortimer: 0,016% rojo de metilo, 0,083% verde de bromocresol en etanol

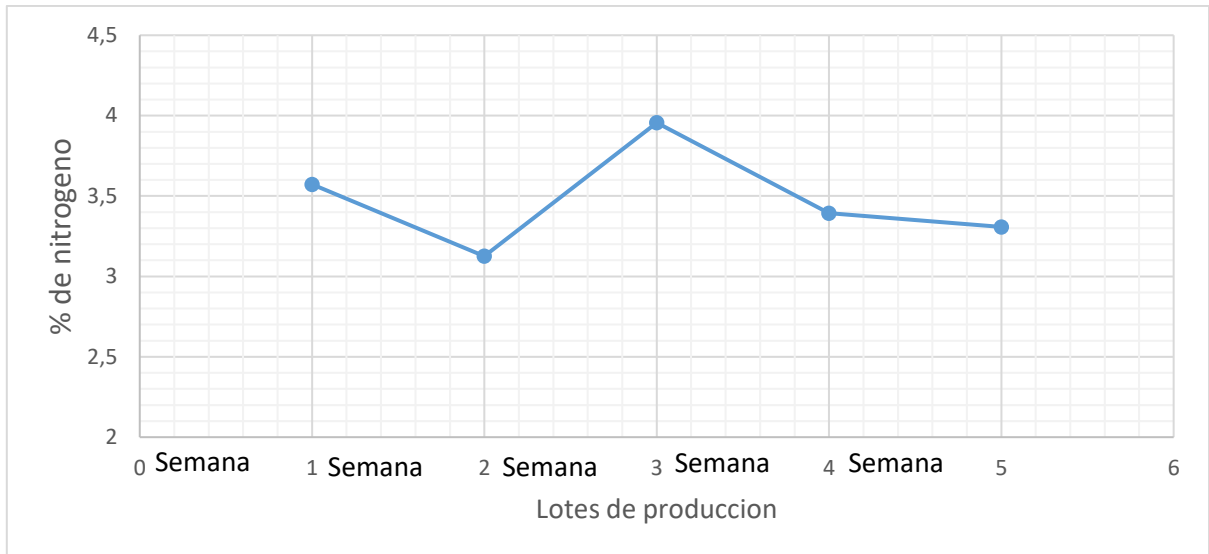
Para la determinación del nitrógeno total se utilizó la siguiente relación.

- Nitrógeno total % = $(V_{\text{Muestra}} - V_{\text{Blanco}}) \times N_{\text{Acido}} \times 0.014 \times F \times 100/g_{\text{Muestra}}$ [9]
- Siendo V_{Muestra} ml de ácido gastados en la valoración de la muestra
- V_{Blanco} ml de ácido gastados en la valoración del blanco
- N_{Acido} normalidad del ácido sulfúrico
- 0.014 peso del meq de nitrógeno, en g
- F factor de conversión de nitrógeno a proteína
- g_{muestra} peso en g de la muestra

En los cálculos para convertir nitrógeno a proteínas, usar el factor 6,25 para carnes, 5,7 para cereales y soja y 6,38 para leche y derivados. (ETSIAMN. Universidad Politécnica de Valencia, 2012). Los resultados se describen en la tabla 5. (Ver anexo B para ver datos totales.)

	% de nitrógeno total
Lote 1	3,572
Lote 2	3,126
Lote 3	3,956
Lote 4	3,394
lote 5	3,308

Tabla 5. Relación del porcentaje de nitrógeno en diferentes lotes de producción.



Grafica 5. Variación del porcentaje de nitrógeno total en relación con cada lote producido.

El valor del nitrógeno total en el yogurt terminado ayuda a conocer la consistencia del producto, aunque en la empresa Coolactame no se tiene definido.

5.1.6 Porcentaje de Sinéresis

Se determinó el porcentaje de sinéresis en diferentes lotes con diferentes tiempos de almacenamiento estos datos se tomaron durante 7 días desde el momento de elaboración de cada lote de yogurt Coolactame almacenado a una temperatura de 3°C en promedio, para el análisis se agitaron las muestras de yogurt por 2 minutos y, posteriormente, se centrifugaron a 1380 rpm, a temperatura ambiente por 10 minutos. Los datos obtenidos se trataron con la siguiente ecuación que relaciona la cantidad de líquido que se separa del yogurt, debido a la centrifugación con relación a la masa total que fue centrifugada.

$$S = \frac{M_2}{M_1} * 100 \quad [10]$$

S = Porcentaje de sinéresis

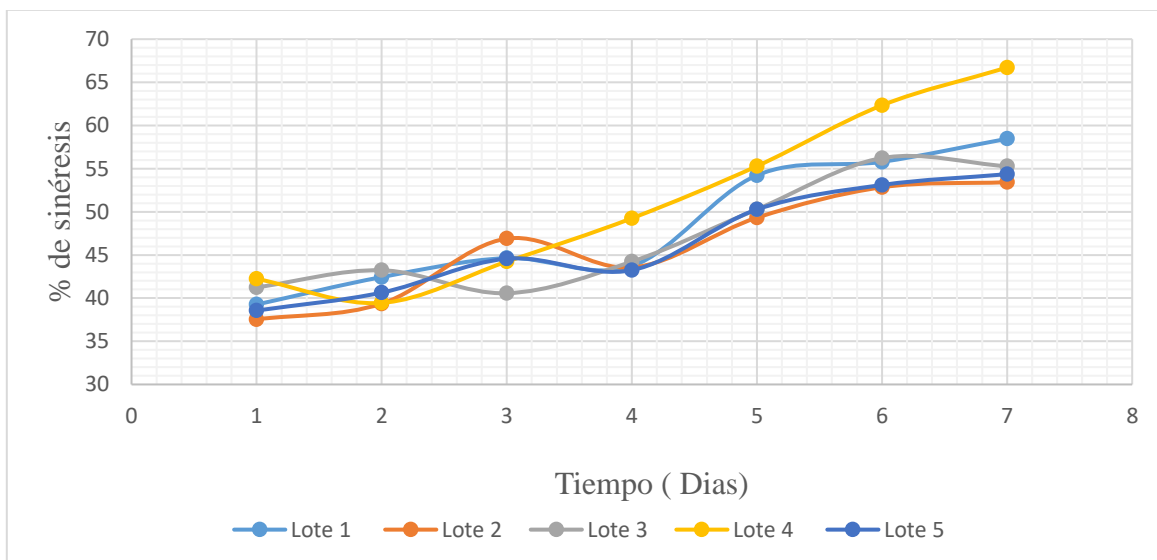
M_1 = Peso inicial de la muestra

M_2 = Pérdida de peso después de la centrifugación (Mora Barandiarán, Barraza Jáuregui, & Obregón Domínguez, 2013)

Estos datos se reflejan en la tabla 6 . ver Anexo C para conocer los datos totales.

Lote	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
1	39,26	42,436	44,64	43,71	54,23	55,789	58,46
2	37,543	39,36	46,896	43,546	49,321	52,846	53,43
3	41,25	43,23	40,57	44,23	50,29	56,23	55,278
4	42,23	39,45	44,23	49,25	55,29	62,34	66,71
5	38,56	40,64	44,57	43,24	50,277	53,11	54,36

Tabla 6. Porcentaje de sinéresis



Grafica 6. Variación del porcentaje de sinéresis, durante el almacenamiento a 3°C en sistemas de yogurt con más de 3 por ciento de grasa.



Fig.12. Centrifuga utilizada en el análisis de la sinéresis.

El análisis más importante que se puede extraer de estos datos de sinéresis es que está dentro de los parámetros de un yogurt elaborado con leche que presentan valores iguales o superiores a 3 por ciento en la cantidad de grasa y como se puede evidenciar en la gráfica 2 la leche que se recibe en la empresa Coolactame tiene un promedio superior al 4 por ciento de grasa lo cual desfavorece las propiedades reológicas del producto terminado.

También se puede apreciar que el lote 2 presenta una menor sinéresis que el resto de lotes analizados, este lote fue elaborado con el cultivo YAU-0432 de la marca Igea y presenta un valor muy bueno en cuanto a sinéresis, por otro lado se puede observar que el de mayor sinéresis es el lote numero 4 el cual fue elaborado con el cultivo ABY-3 de la marca Hansen el cual presenta valores elevados de sinéresis lo cual afecta la calidad del producto

5.2 Sistemas de control.

5.2.1 Control de impurezas

Para el desarrollo del sistema de control de impurezas se midieron el tamaño de las impurezas presentes en el azúcar adicionado tanto como en el yogurt base (sin adicción de pulpa de frutas), esto se hizo tomando una serie de mallas de diferentes tamaños y analizando las diferentes partículas que se presentan en el yogurt. Para esto se diseñó un filtro el cual fue dibujado en Soliwork y se puede observar el sistema de mallas a utilizar en dicho filtro.

El filtro actual que se tiene en la empresa Coolactame es el siguiente, este filtro no es nada eficiente para las necesidades de calidad de la empresa, pues tiene un diámetro de orificio muy grande para cumplir a cabalidad con el proceso de remoción de impurezas. Ya que presenta un diámetro de los orificios de 2 mm , con este tamaño se presenta problemas ya que las impurezas estan en el orden de 0,1 mm.



Fig.13. Vista general del filtro actual del fermentador batch de la empresa Coolactame.



Fig. 14. Vista interior del filtro actual.



Fig.15. Carcasa del filtro actual del fermentador

A continuación, se presenta el sistema propuesto en este trabajo.

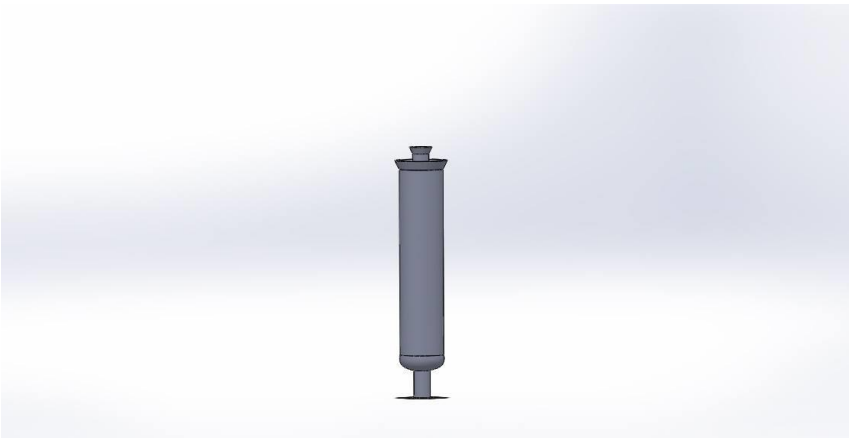


Fig. 16. Vista final del filtro propuesto para la empresa Coolactame.



Fig.17.Carcasa del filtro propuesto para loa recirculación.

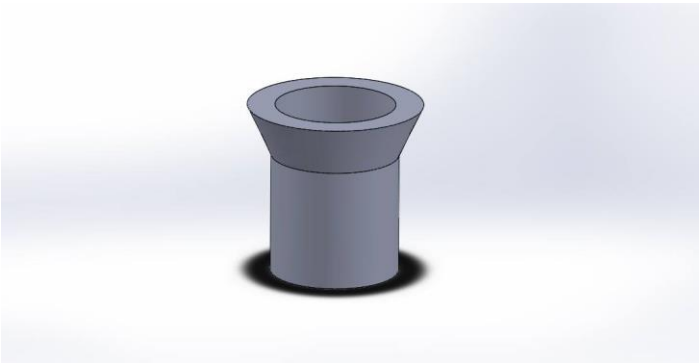


Fig. 18. Vista superior del filtro propuesto.

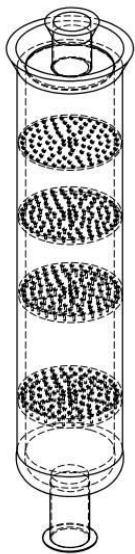


Fig.19. Esquema del filtro propuesto para la recirculación con proyección interior.

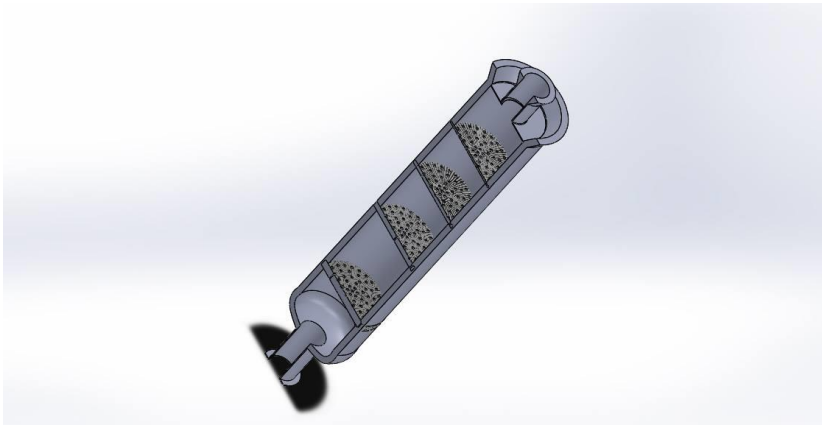


Fig.20. Vista interior del filtro propuesto para la recirculación.

Para el análisis del tamaño de las partículas presentes en el yogurt se utilizaron mallas estandarizadas por la Norma ASTM C136-1 encontrando que es necesario utilizar un tamaño de malla máximo de 200 para detener todas las impurezas presentes en el proceso de elaboración del yogurt Coolactame. Este nuevo modelo de filtro permite atrapar una serie de impurezas de diferentes tamaños utilizando el número de malla número 10 hasta la número 200 las cuales en mm va desde 2 mm hasta 0,074 mm.

Análisis de la caída de presión de en la recirculación: Se analizó la caída de presión en la recirculación debido a la instalación de un filtro como el que se propone en este trabajo ya que esto debe ser analizado para conocer el tiempo extra que se deba añadir al proceso.

5.2.2 Control de velocidad de agitación

Para el desarrollo del sistema de control en la velocidad de agitación se midió las revoluciones actuales del agitador y se propone la instalación de un variador de frecuencia para mantener las revoluciones por minuto en un máximo de 100 r.p.m que es la agitación pertinente en la elaboración del yogurt.



Fig.21. Tacómetro digital TACHOMETER DT-2234C+.

Valor actual de revoluciones 210 r.p.m por minuto las cuales se midieron con el tacómetro TACHOMETER DT-2234C+, con este resultado se observa que el valor actual está por encima del valor deseado por tanto se presenta a continuación el circuito que se propone utilizar en la empresa.

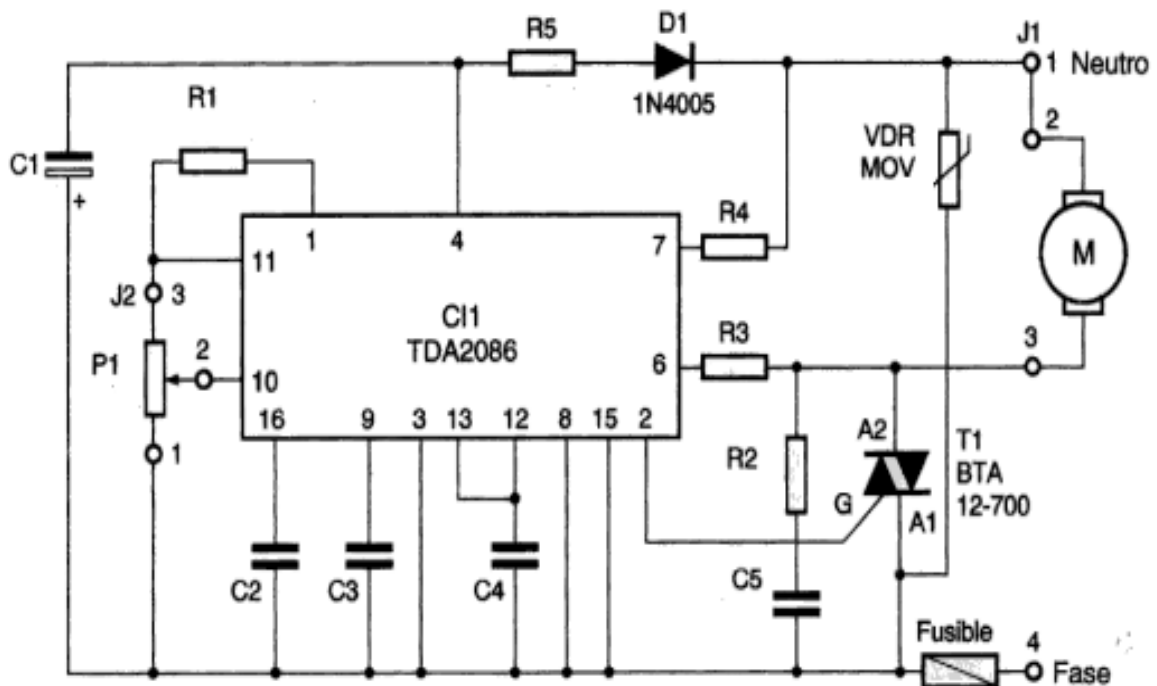


Fig.22. Esquema de un variador de velocidad TDA2086

Fuente: Modificado de Couëdic, M. (2016). Circuitos integrados para tiristores y triacs. 1st ed. Barcelona: Marcombo S.A, pp.95-100.

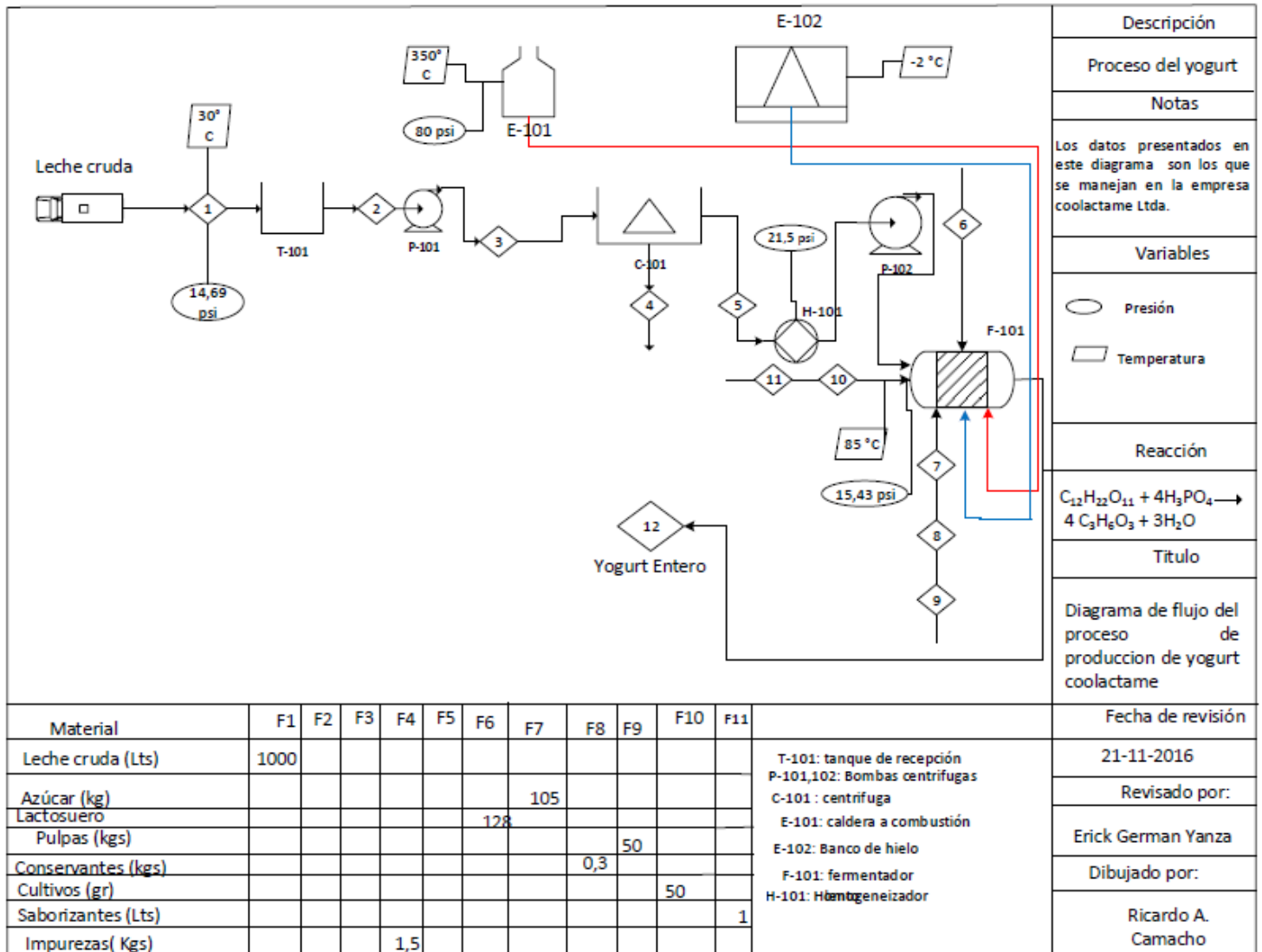
Se propone la utilización de un variador de frecuencia TDA2086 porque se ajusta a los parámetros necesarios en la empresa. También se analizaron otros variadores de frecuencia para reducir la velocidad entre ellos el U210B1 el cual es muy útil, pero maneja un solo valor estándar de disminución de velocidad, este regulador tiene la facultad de dejar pasar 7 amperios en un flujo constante de energía. Se decide, finalmente, utilizar este controlador por su versatilidad en el control y su economía ya que es relativamente más económico que los demás sistemas de control de velocidad analizados.

5.3 Diagrama PFD

Diagrama PFD del proceso de producción de yogurt en la empresa Coolactame Ltda.

Diagrama elaborado en Visio profesional 2013 con los valores respectivos de la empresa.

Fig.23. Diagrama de flujo del proceso de elaboración de yogurt.



5.3.1 Balance de materia y energía

En el balance de materia y energía se tomaron los datos en relación a un lote de 1000 Lts de leche cruda. (Ver anexo para conocer los cálculos totales del proceso.)

Balance de materia

- F1= leche cruda
- F4= impurezas
- F6= lactosuero
- F7= Azúcar

- F8= conservantes
- F9= Pulpas
- F10= cultivos
- F11=saborizantes
- F12= Yogurt

Balance global

$$F1+F6+F7+F8+F9+F10+F11= F4+F12$$

	F (L/día)	Densidad (Kg/L)	Flujo Másico (Kg/día)
F1	1000	1,033	1033
F6	128	1,00	128
F7			105
F8			0,3
F9			50
F10			0,05
F11	1	1,00	1
Total entradas			1317,35
F4			1,5
F12			1315,85
Total salidas			1317,35

Tabla 7. Balance de materia en el yogurt

$$\text{Rendimiento} = \frac{\text{Corriente de salida}}{\text{corriente de entrada}} * 100\% = \frac{1317,35 \text{ Kg}}{10333 \text{ Kg}} * 100\% = 127,526 \% \text{ [11]}$$

Operación	Materiales del proceso				característica de los insumos
	Entra	cantidad (Kg)	Sale	Cantidad (Kg)	
Recepción	Leche	1033	Leche	1033	Densidad 1,033, acidez 17 ° Th
Clarificación	Leche	1033	leche clarificada	1031,5	leche sin impurezas macroscópicas
Homogenización	Leche Clarificada	1031,5	Leche homogenizada	1031,5	leche con mejor distribución de grasas
Mezclado	Leche homogenizada	1031,5	Leche mezclada	1264,5	leche edulcorada
Pasteurización	Leche mezclada	1264,5	Leche pasteurizada	1264,5	
enfriamiento					
Inoculación	cultivos, conservantes	1264,5	Leche inoculada	1264,85	
Incubación		1264,85		1264,85	inicio de la fermentación láctica
Enfriamiento					
Saborización	saborizante, pulpas	1264,85		1315,85	
Envasado	Yogurt	1315,85			

Tabla 8. Modelo del proceso desde la materia prima.

El balance de materia presentado en este trabajo representa los valores que se utilizan en la elaboración de un lote estándar de yogurt en la empresa Coolactame, se toma como referencia un lote de 1000 Lts de leche cruda, en la pasteurización de la leche mezclada no se toma en cuenta el valor de agua evaporada ya que el fermentador esta operación está

completamente sellado y un porcentaje de esta agua evaporada se mantiene en el proceso por la condensación que se lleva a cabo dentro del mismo equipo.

Debido a esto en el balance global del proceso solo se toma en cuenta como salidas las impurezas que se obtienen de la clarificación de la leche cruda y el producto final.

5.3.1.2 Balance de energía

El balance de energía que se presenta en este trabajo está dado para un lote estándar de yogurt Coolactame, elaborado con 1000 Lts de leche fresca.

Operación	Clase de energía	Servicio industrial	Consumo
Recepción	Humana	Ninguno	Ninguno
Transporte a la clarificadora	Eléctrica	Energía eléctrica	1,12 Kw/h
Clarificación	Eléctrica	Energía eléctrica	7,46 Kw/h
Homogenización	Eléctrica	Energía eléctrica	7,46 Kw/h
Transporte al pasteurizador	Eléctrica	Energía eléctrica	1,12Kw/h
Aumento de temperatura	Térmica	Vapor	450520,18 KJ
Aumento de temperatura	Eléctrica	Energía eléctrica	5,0328 Kw/h
Mezclado	Eléctrica	Energía eléctrica	4,53 Kw/h
Disminución de temperatura	térmica	Agua fría	387695,69 KJ
Disminución de temperatura	Eléctrica	Energía eléctrica	67,71 Kw/h
Inoculación	Humana	Ninguno	Ninguno
Incubación	no hay	Ninguno	Ninguno
Refrigeración	Eléctrica	Energía eléctrica	33,55 Kw/h
saborizacion	Humana	Ninguno	Ninguno
envasado	Humana	Ninguno	Ninguno

Tabla 9. Balance de energía

En el proceso se tomó en cuenta la energía eléctrica requerida por cada equipo para funcionar en un tiempo determinado de elaboración, las intervenciones humanas en el proceso no se tomaron como gastos energéticos solo se plasmó para tenerlos en cuenta en el proceso.

De este balance de energía se pudo apreciar que el gasto energético en Kw/h para la elaboración de yogurt es 127,982 en cuanto a energía eléctrica se refiere.

En el aumento y disminución de temperatura se tomaron los valores en Kw/h requeridos por los motores eléctricos que entran en este proceso, además se determinaron los valores en KJ necesarios para llevar acabo el aumento o disminución de la temperatura.

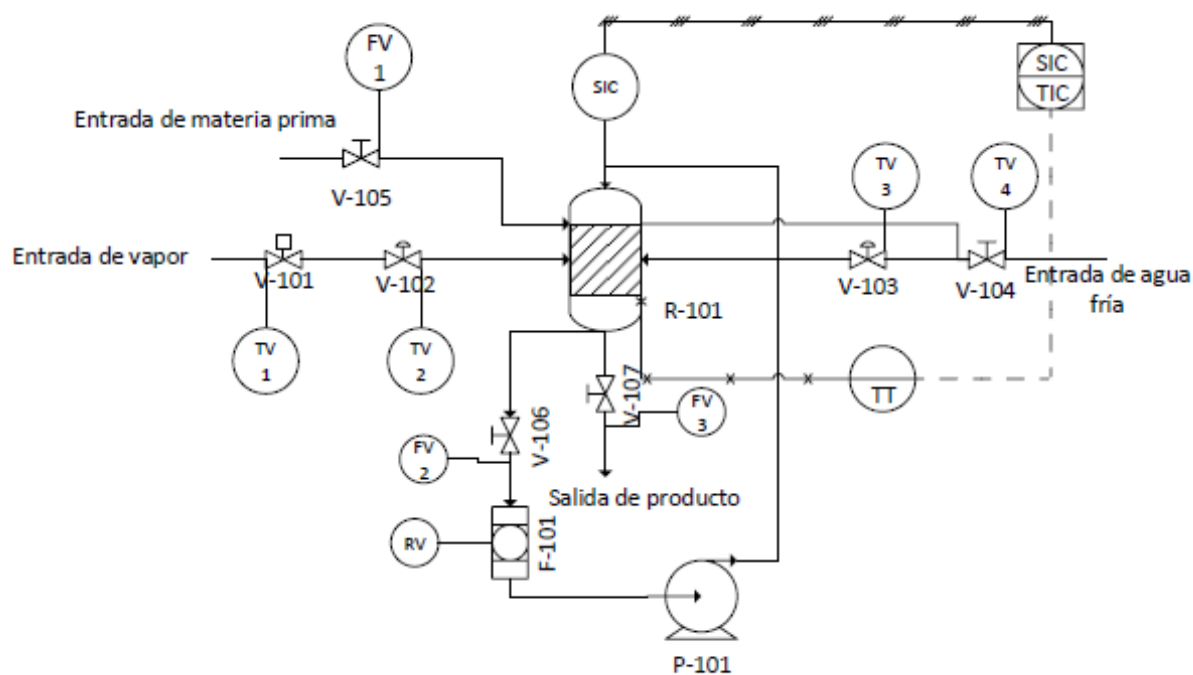
5.4 Diagrama P&ID



Fig.24. Fermentador lento de la empresa Coolactame Ltda.



Fig.25. Instrumento de control actual para impurezas.



Descripción

Proceso del yogurt

Notas

Los datos presentados en este diagrama son los que se manejan en la empresa coolactame Ltda.

Variables

TV	Control de temperatura
FV	Control de flujo
SIC	Controlador indicador de velocidad
SIC/TIC	Controlador de temperatura y velocidad
TT	Trasmisor de temperatura
RV	Control de impurezas

Titulo

Diagrama de Tuberías e Instrumentación (P&ID) . En el fermentador de la empresa coolactame Ltda

Fecha de revisión

01-12-2016

Revisado por:

Erick German Yanza

Dibujado por:

Ricardo A. Camacho

Fig.26. Diagrama P&ID del fermentador utilizado en la empresa Coolactame Ltda.

5.5 Cinética de fermentación láctica

5.5.1 Seguimiento del ácido láctico

Se realizó seguimiento del ácido láctico en la fermentación de 5 lotes de yogurt de la empresa Coolactame en la cual se utilizaron 3 cultivos diferentes uno el ABY-3 de la marca Hansen, el YAU-0432 y el YAU-0431 de la marca Igea los cuales presentaron tiempos de acidificación diferentes los datos se presentan a continuación.

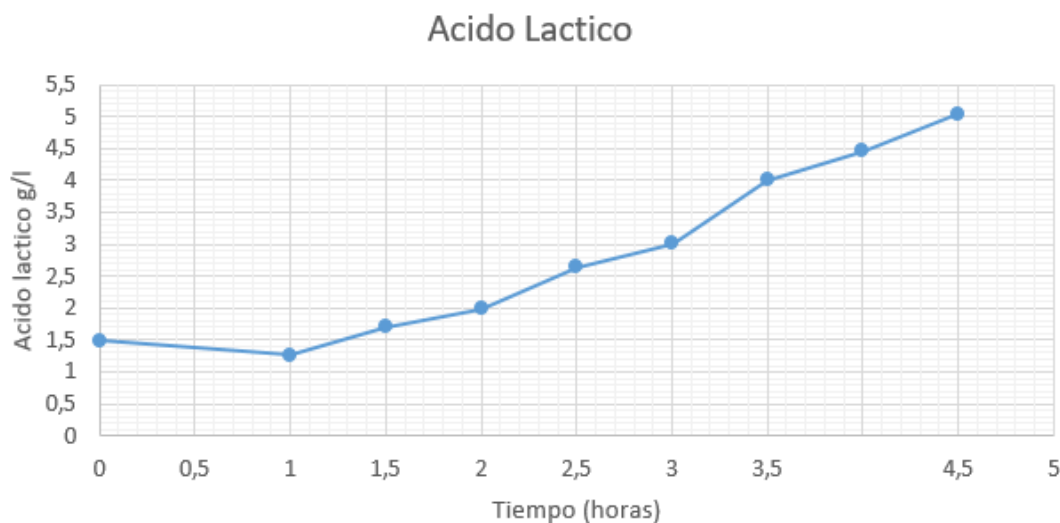
Estos datos se tomaron utilizando NaOH al 0,1N para obtener los grados Dornic a lo largo del tiempo y con esto utilizar la relación entre ácido láctico y grados Dornic el cual referencia que un grado Dornic equivale a 0,1 g/l de ácido láctico (Negri, 2005). Ver Anexo D para conocer los datos totales

Lote 1: Cultivo ABY-3



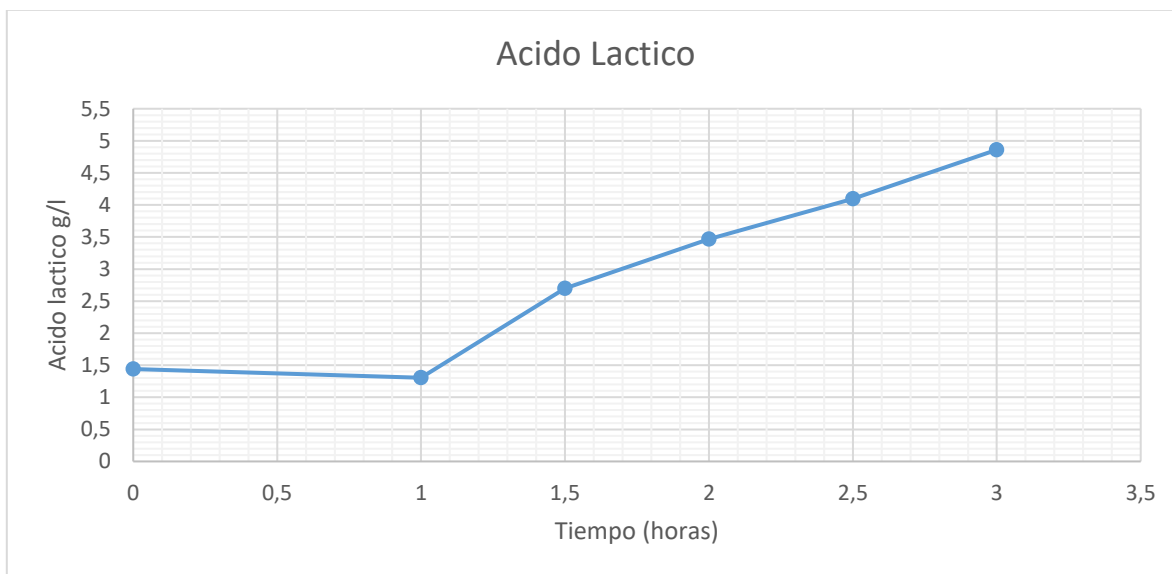
Grafica 7. Relacion entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 1 de la empresa Coolactame.

Lote 2. Cultivo YAU-0432



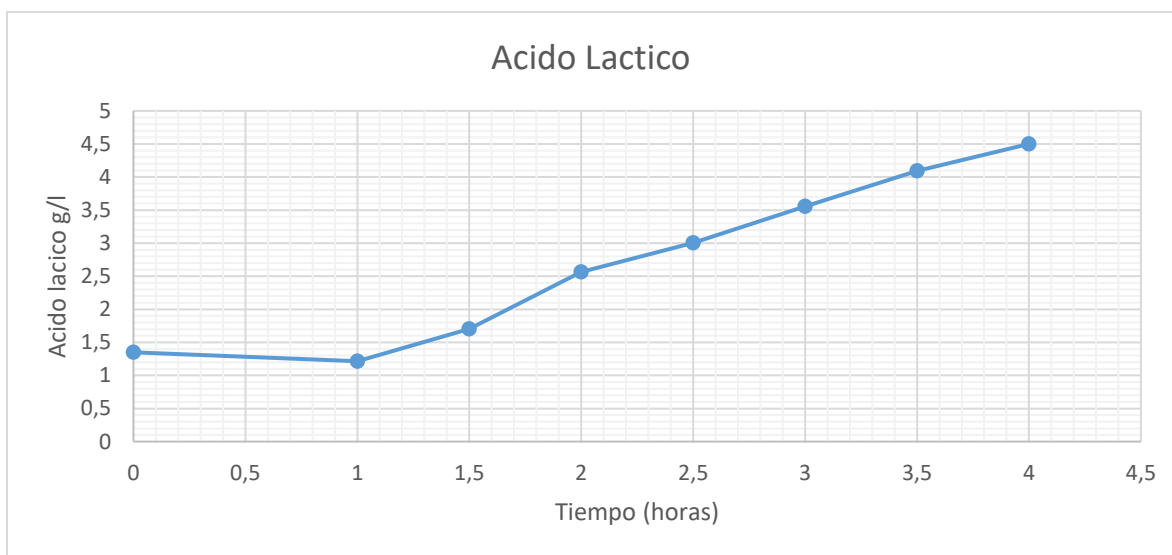
Grafica 8. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un determinado para el lote 2 de la empresa Coolactame.

Lote 3. Cultivo ABY-3



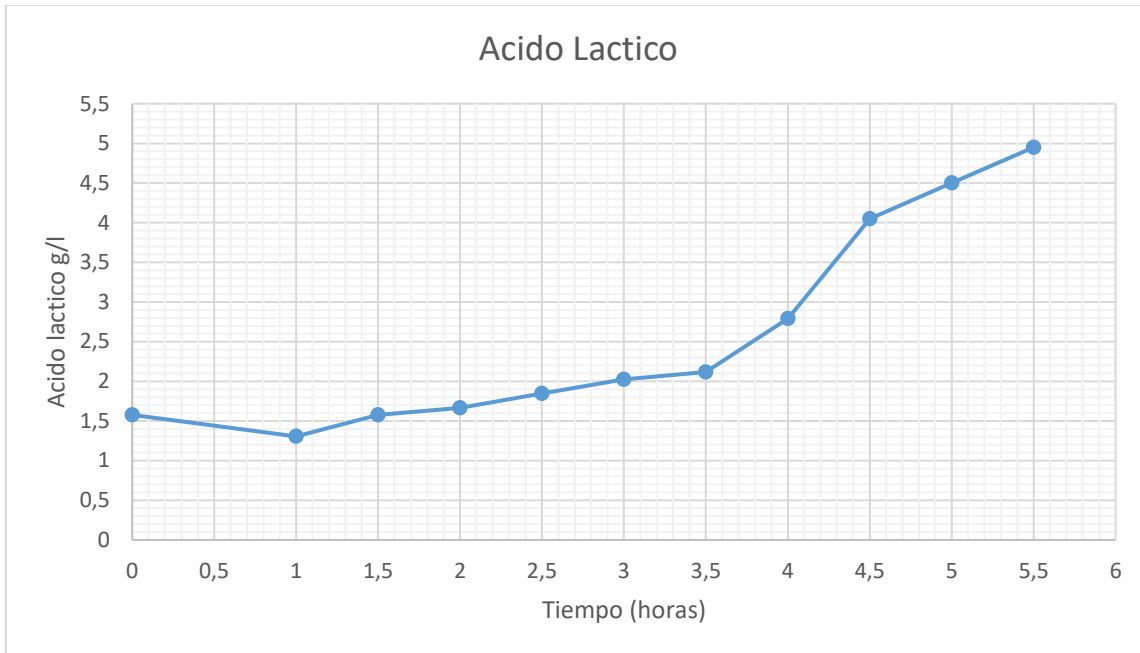
Grafica 9. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 3 de la empresa Coolactame.

Lote 4. Cultivo ABY-3

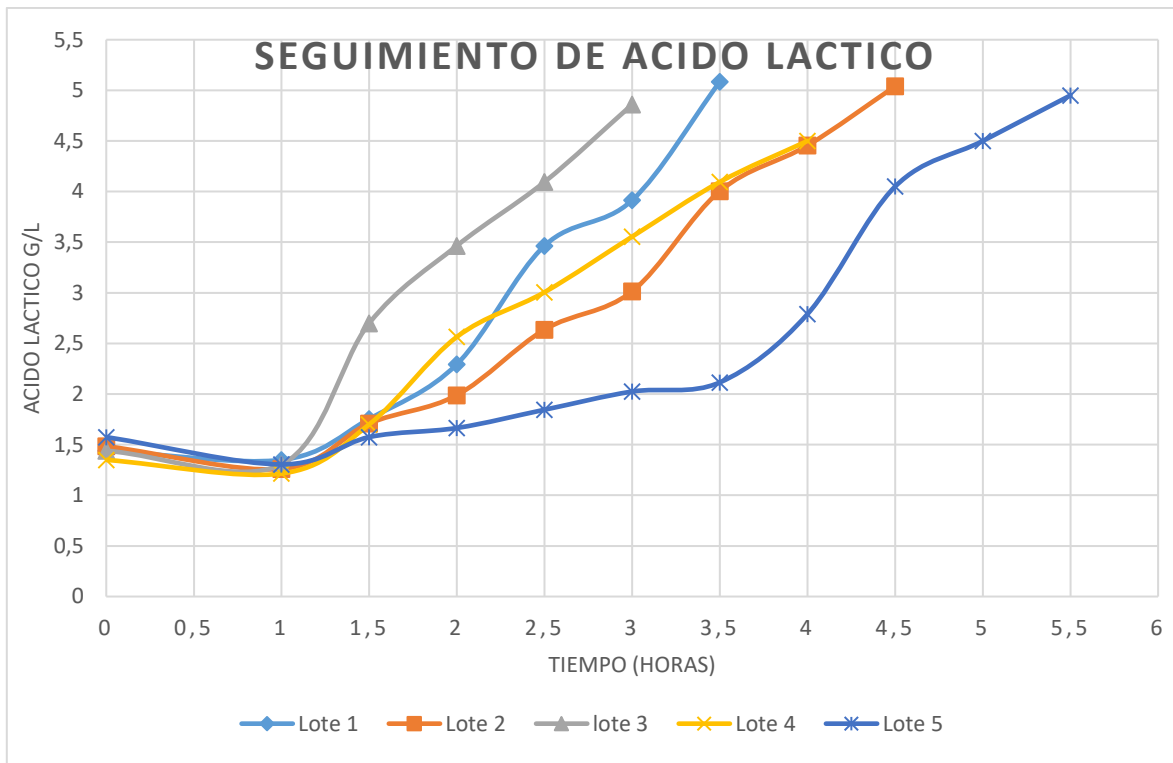


Grafica 10. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 4 de la empresa Coolactame.

Lote 5.Cultivo YAU-0431



Grafica 11. Relación entre la cantidad de ácido láctico producido en un tiempo determinado para el lote 5 de la empresa Coolactame.



Grafica 12. Comparativo entre los diferentes lotes con respecto a su velocidad de formación de ácido láctico a través de la fermentación láctica.

Para este estudio se tomó como valor estándar de incubación, una temperatura de 43°C la cual es la recomendada por cada proveedor en sus graficas de acidificación aunque esta temperatura se trata de controlar lo mejor posible pueden haber errores humanos o de los equipos de medición que se utilizan en el control de los procesos.

Estos valores obtenidos de la acidificación del yogurt con respecto al cultivo utilizado y a las proporciones de cada lote en especial ayuda a ver qué tan viable y que diferencia existe entre cada subespecie de *Lactobacillus* y *Streptococcus* también de acuerdo a cada una de las gráficas se evidencia una disminución de la acidez de la leche en la primera hora de fermentación y esto es debido a la mezcla con el lactosuero y la sacarosa que entra a jugar parte de la fermentación láctica del yogurt.

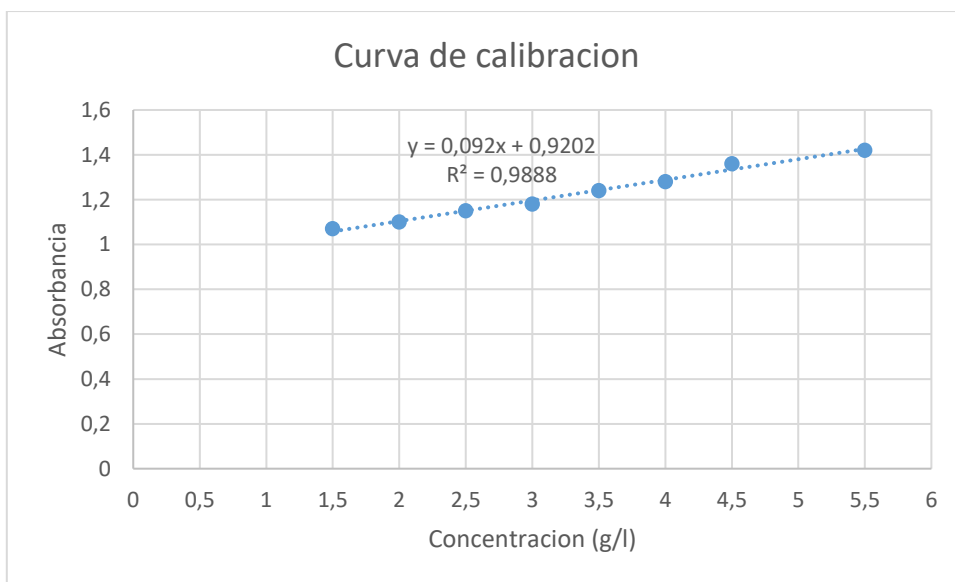
De acuerdo al análisis de cada cultivo se observa que el ABY-3 presenta una acidificación más rápida con respecto al YAU-0432 y al YAU-0431 lo que supone un control más constante de la acidez del lote, también se observa que en las primeras horas no hay un

aumento significativo de la acidez la cual empieza a para el ABY-3 a la hora de proceso y en cambio para los cultivos YAU-0432 y 0431 el aumento empieza en promedio a partir de las 2,5 horas.

De acuerdo a las gráficas que se presentan se puede observar que en los lotes con el mismo cultivo hay diferencias en los tiempos de fermentación y esto se debe a la temperatura del ambiente, el porcentaje de grasa, el porcentaje de lactosa; estos parámetros juegan un papel importante en la velocidad de la fermentación llevada a cabo en el proceso de elaboración de yogurt.

5.5.2 Análisis espectrofotométrico UV-visible

Para el análisis de ácido láctico por espectrometría de la curva de calibración para el ácido láctico, y de acuerdo a lo valores de ácido.



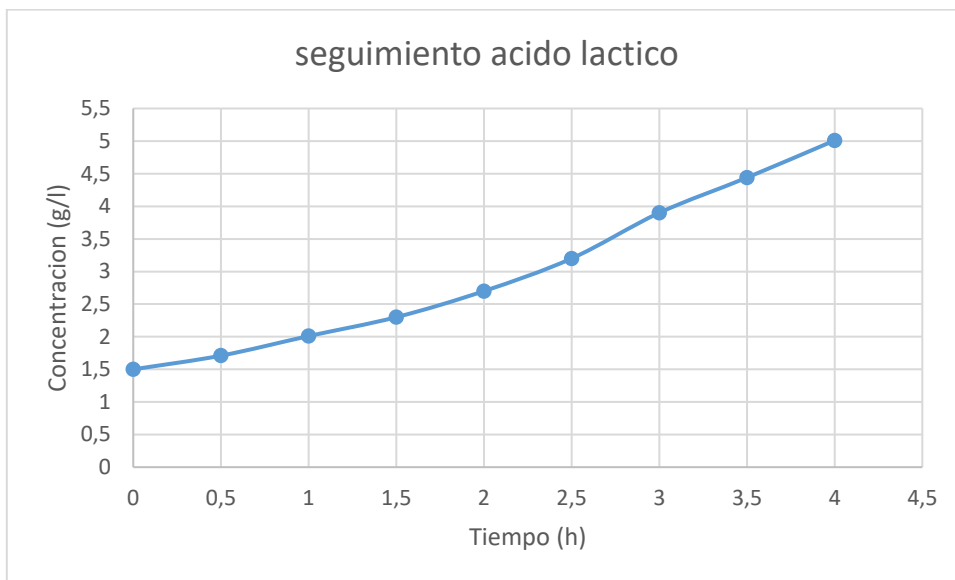
Grafica 13. Curva de calibración para el ácido láctico por espectrofotometría UV-vis.

Esta grafica se construyó tomando 8 muestras conocidas de ácido láctico y midiendo su absorbancia respectiva con el espectrofotómetro UV-vis marca HACH DR/4000U spectrophotometer utilizando una celda de cuarzo de 1 cm.



Fig.27. Espectrofotómetro HACH DR/4000U utilizado para el seguimiento del ácido láctico.

Posteriormente se le hizo un seguimiento al ácido láctico producido en la fermentación láctica:



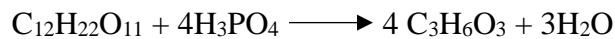
Grafica 14. Seguimiento del ácido láctico en la fermentación láctica a través del tiempo.

Para este análisis se tomaron las muestras cada 30 minutos haciendo diluciones con 2 gramos de solución a analizar (yogurt) y se diluyeron en 98 ml de agua destilada, esto se hizo hasta alcanzar una acidez de 50° Dornic el cual es el punto donde se refrigera el yogurt, al utilizar cultivo de post-acidificación este proceso se inhibe por debajo de los 10° C para el caso del ABY-3 que se utiliza en la empresa. Esta grafica confirma los valores ya obtenidos en el seguimiento que se le ha hecho, también se puede apreciar de acuerdo a esto que el tiempo necesario para alcanzar los 50 °D es de 4 horas con las condiciones establecidas en el anexo C.

En esta grafica se puede evidenciar que los datos obtenidos de la titulación con NaOH al 0,1 N tienen una gran similitud con lo que indica la correlación que define un grado Dornic como 0,1 g/l de ácido láctico (Negri, 2005).

5.5.3 Modelo cinético

Reacción principal de la fermentación láctica



(Ruales Guzman, 2012)

Para la realización del modelo cinético de la fermentación láctica llevada a cabo en el fermentador lento de la empresa coolactame se utilizaron las siguientes formulas:

- Rendimiento observado de sustrato en producto

$$Y'ps = \frac{\text{Gramos de acido lactico producidos}}{\text{Gramos de lactosa consumida}} \quad [12]$$

El rendimiento teórico de sustrato en producto está definido como los gramos de ácido láctico producidos sobre los gramos de lactosa consumida para la producción. (Suárez Zuluaga, 2007).

- Productividad volumétrica

$$Q = \frac{\text{Gramos de acido lactico producido}}{\text{Tiempo de fermentacion} * \text{volumen}} \quad [13]$$

- Rendimiento observado de sustrato en biomasa

$$Y_{XS} = \frac{\text{Gramos de biomasa obtenida}}{\text{Gramos de lactosa consumida}} \quad [14]$$

Obteniendo estos datos se puede proseguir a calcular el modelo cinético:

- Modo diferencial de crecimiento logístico:

$$\frac{dx}{dt} = X * \mu_{\max} * \left(1 - \frac{x}{x_m}\right)$$

Esta fórmula se puede integrar usando $x=x_0$ ($t=0$) dando así una variación de x como función del tiempo el cual se puede representar tanto la fase exponencial como la fase estacionaria. (Liu et al., 2003).

- Forma integrada del crecimiento logístico:

$$X = \frac{X_0 * X_m * e^{\mu_m * t}}{X_m - X_0 + X_0 * e^{\mu_m * t}} \quad [15]$$

X_m = Concentración de biomasa máxima

X_0 = Concentración inicial de biomasa.

μ_m = Velocidad específica máxima (Liu et al., 2003).

- Ecuación de Luedeking-Piret para la formación de ácido láctico

$$\frac{d_p}{d_t} = \alpha * \frac{d_x}{d_t} + \beta * X$$

Donde α (g/g) y β (g/g.h) representan la constante de producción de ácido láctico asociada y no asociada al crecimiento respectivamente. (Pauletti et al., 2004).

- Ecuación de consumo de lactosa.

$$S = S_0 - \frac{X_0}{\mu} \left[\left(\frac{\mu_m}{Y_{xs}} + ms \right) + \frac{\mu + \beta}{Y_{xs}} \right] (e^{\mu_x * t} - 1) \quad [16]$$

S_0 = Concentración inicial de la lactosa.

Y_{xs} = Rendimiento real de sustrato en biomasa (g/g)

ms = coeficiente de mantenimiento (g/g.h)

μ = velocidad específica de crecimiento (h^{-1}). (Islam et al., 2003).

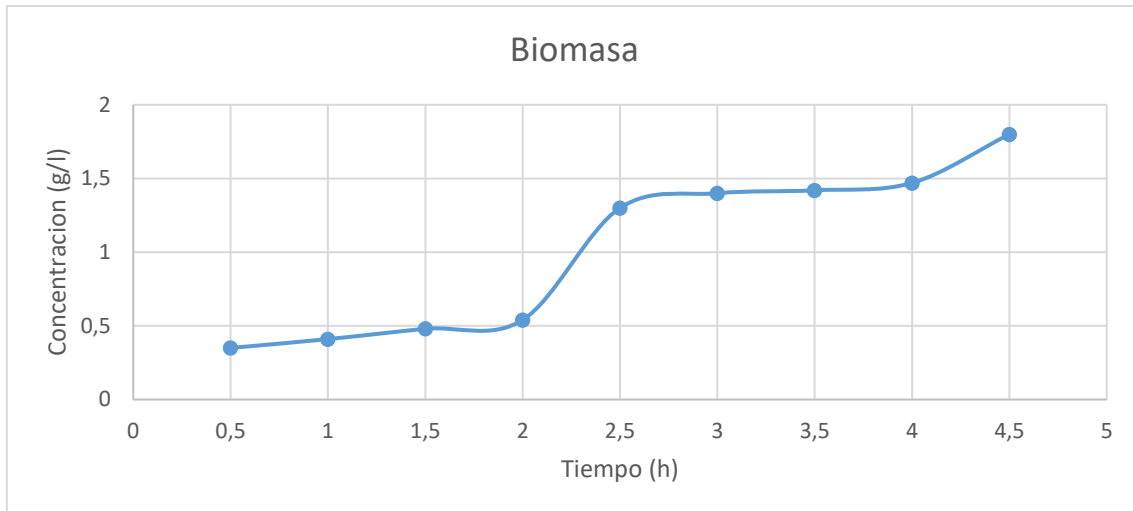
Teniendo las 3 ecuaciones definidas para la biomasa, formación de ácido láctico y consumo de lactosa se realizaron los cálculos en el software Polymath Educational 6.1 para obtener los parámetros cinéticos que fueron usados para realizar las simulaciones.

Este modelo se centra en la relación que existe entre la cantidad de lactosa de la leche con la acidez final que presenta el yogurt, debido a esto no se toma en cuenta la cantidad de sacarosa que se adiciona en el proceso de elaboración del yogurt.

También se tienen algunos datos proporcionados por los proveedores de los cultivos utilizados en este proceso, que relacionan que relacionan la velocidad de acidificación de las cepas utilizadas.

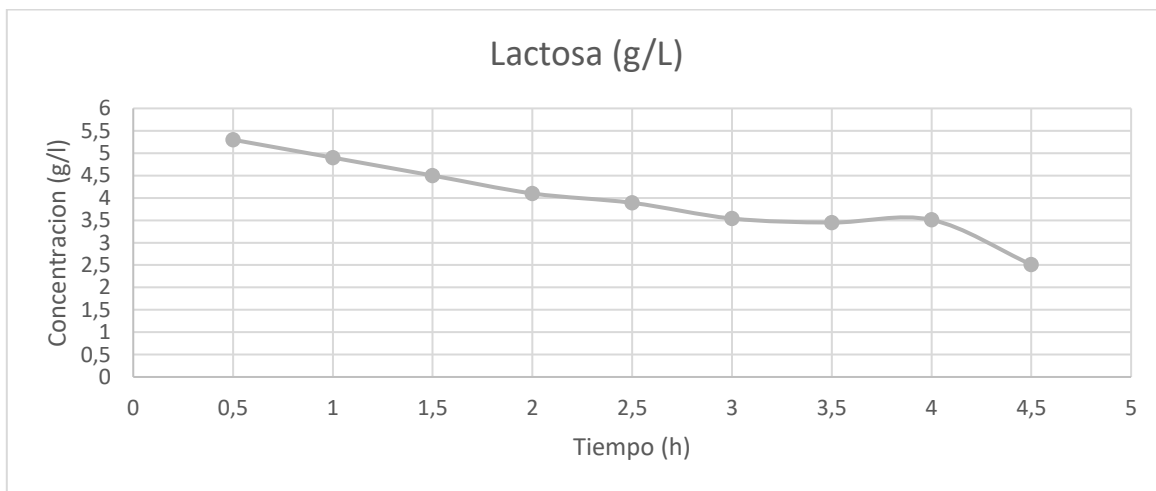
Parámetro	Valor
μ_m (h ⁻¹)	0,373
Y_{xs} (g/g)	0,067
β (g/g.h)	0,531
α (g/g)	12,46
X_0 (g/l)	0,35
m_s (g/g.h)	4,06
S_0 (g/l)	5,30
X_m	4,7

Tabla 10. Parámetros cinéticos obtenidos



Grafica 15. Formación de biomasa a lo largo del tiempo.

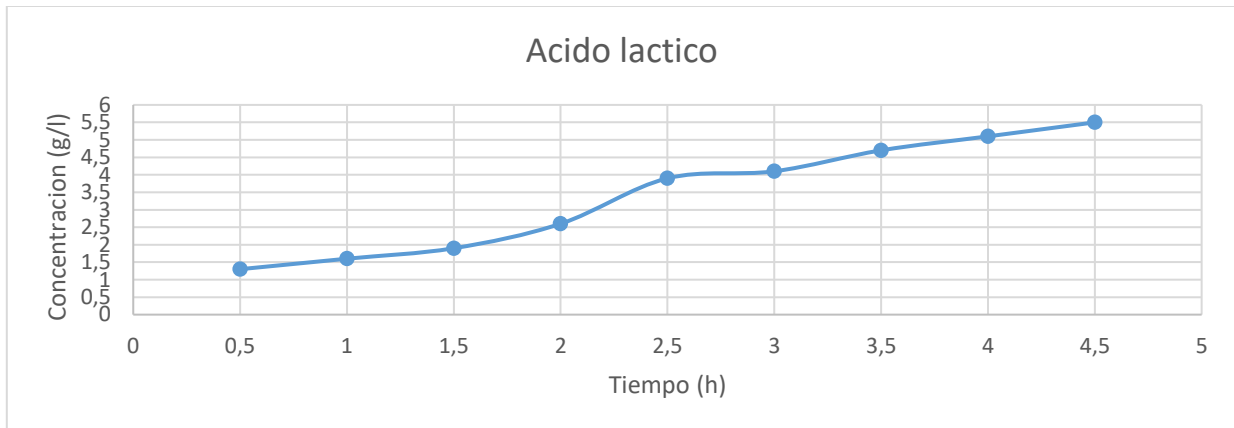
El valor obtenido para la constante de producción de ácido láctico no relacionada con el crecimiento (β) al ser diferente de cero, muestra una vez más que de acuerdo a las condiciones de fermentación evaluadas, la producción de este metabolito está parcialmente relacionada con el crecimiento celular de las cepas de *streptococcus thermophilus* y *lactobacillus bulgaricus*.



Grafica 16. Consumo de lactosa en la fermentación láctica.

Según lo estudiado la lactosa empieza a consumirse a un ritmo constante hasta las 3 horas luego tiene una pequeña pausa donde se empieza a disminuir la velocidad de formación del

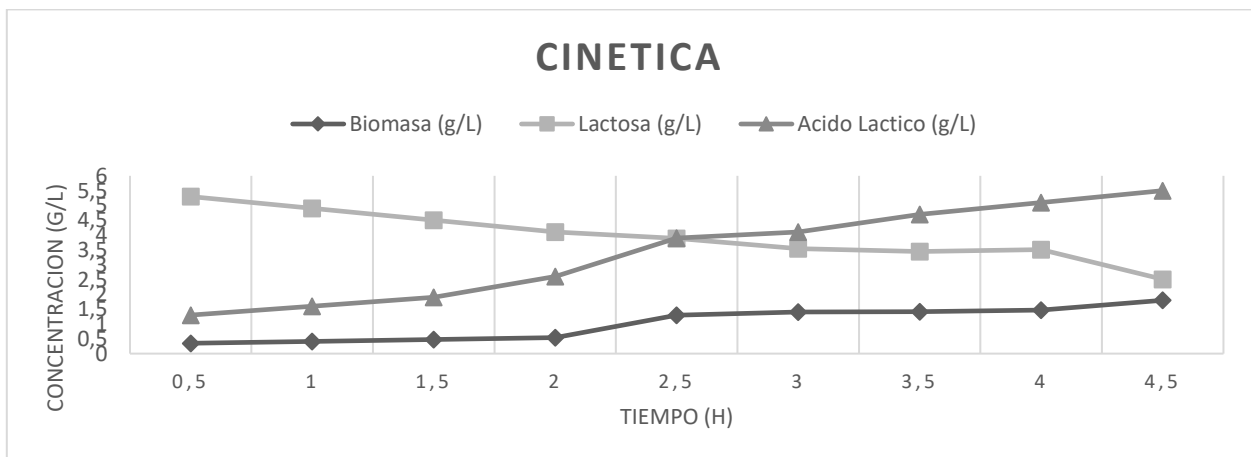
ácido láctico. Este seguimiento de la concentración de lactosa también se llevó a cabo con el ultrasonido LAC-S BOECO obteniendo valores muy similares en los dos casos.



Grafica.17. formación de ácido láctico como producto de la fermentación láctica.

Esta simulación del proceso se ajusta a lo que se han presentado en los datos experimentales lo que verifica los resultados obtenidos, estos datos también se puede verificar con los datos proporcionados por el proveedor de los cultivos utilizados en la empresa.

Estos datos no se presentan en este trabajo por razones de privacidad de los proveedores y razones legales de la empresa en la que se realizaron los análisis.



Grafica 18. Cinética de formación de Biomasa y ácido láctico vs consumos de lactosa en la fermentación.

Esta grafica representa la velocidad de formación de ácido láctico y Biomasa vs el consumo de lactosa en el proceso de fermentación láctica estos datos se; la concentración final de ácido láctico, el rendimiento observado de sustrato en producto y la productividad volumétrica obtenidos en el Biorreactor, fueron un 23.63%, 45% y 93.3% respectivamente, indicando un buen control en la agitación y temperatura que favorecen la producción de ácido láctico.

6. Conclusiones

De los valores de los parámetros base se puede concluir que la leche recibida en la empresa Coolactame presenta unos valores dentro de los estándares para una leche cruda, aunque si se presenta un porcentaje de grasa alto el cual favorece la sinéresis del producto final lo que es problema serio en tanto a calidad y consistencia de los lotes de yogurt producidos.

- Para el análisis de proteínas tanto en la leche como en el yogurt se puede ver un porcentaje optimo que ayuda a la coagulación de la leche mezclada del proceso de elaboración.
- El valor más importante de los parámetros base analizados en este trabajo es el porcentaje de lactosa el cual presente un promedio mayor al 5% lo que ayuda a tener una velocidad de fermentación láctica mucho más rápida lo cual favorece a la empresa en costos de operación.
- En cuanto a los valores de solidos no grasos presente en la leche recibida se puede concluir que está por encima de los valores promedio y esto favorece la agrupación de los coloides en el yogurt y mejora la calidad del producto final.
- La sinéresis del yogurt es valor muy importante en cuanto a calidad de producto final y de acuerdo a los datos obtenidos se puede apreciar que el yogurt Coolactame presenta valores por encima del promedio esto se puede deber a la temperatura de inoculación del producto ya que debido a temperaturas altas las caseína presente en la leche se divide en el coagulo y en el suero que se presenta; de estos datos también se puede concluir que el mejor cultivo de los que se tienen en la empresa en cuanto a porcentaje de sinéresis es el YAU-0432 el cual presenta un porcentaje de sinéresis a los 7 días de 53,43% el cual también presenta una consistencia mucho mejor a la que presentan los otros cultivos utilizados.

Los sistemas de control planteados en este proyecto apuntan al mejoramiento de la calidad del producto final.

- En el sistema para el control de la impurezas se puede ver que se presenta una disminución en la velocidad de paso por la recirculación de la leche mezclada ya que el tamaño de malla que se utilizara en el filtro disminuye considerablemente este valor, también podemos concluir que aunque se disminuye la velocidad de paso

por la recirculación no afecta considerablemente el proceso, y a su vez mejora la calidad y la pureza del producto final.

- En la propuesta de un controlador para la velocidad de agitación en el fermentador se buscó un sistema con un variación máxima de 10 rpm debido a que la velocidad de agitación en este proceso ayudan a definir tanto las características organolépticas como en las reológicas ya que afecta directamente todo el proceso por eso se propuso la instalación de una variador de frecuencia para el motor trifásico y poder controlar así las revoluciones por minuto a un valor máximo de 100 rpm.

Con la elaboración de los diagramas PFD y P&ID se pudo observar varios aspectos importantes:

- En el balance de materia se observó que de acuerdo a la formulación actual del yogurt en la empresa Coolactame, se tiene un rendimiento del 127,526% en relación a la cantidad de leche fresca que entra en el proceso y a la cantidad de yogurt que se obtiene.
- En el balance de energía se observaron aspectos importantes en cuanto a los valores de energía eléctrica utilizados, se analizó la utilización del banco de hielo y la conveniencia de este en los procesos, se pudo observar que para poner en funcionamiento el banco hielo se utilizan 67,71 Kw/h de energía para un lote de producción de 1000 Lts y con este valor de acuerdo al análisis termodinámico de la energía real necesaria para disminuir la temperatura desde 85°C a 43 °C es de 387695,69 KJ los cuales se pueden expresar en Kw/h obteniendo un valor de 107,693 Kw/h; esto demuestra que el gasto de energía eléctrica está por debajo del valor de energía térmica necesaria para el proceso.
- En el seguimiento de ácido láctico a través del tiempo de fermentación necesario para alcanzar en promedio los 49,5 °D se pudo observar la diferencia de la velocidad de formación de ácido láctico con respecto al tipo de lactocultivo utilizado en los diferentes lotes de producción de la empresa Coolactame.

- Los modelos presentados se ajustan a los valores experimentales obtenidos a lo largo del seguimiento de las variables, se puede concluir que el tiempo necesario para llegar a los 49,5°D es en promedio de 4 horas para los cultivos analizados.
- Como se puede apreciar en la gráfica 18 la lactosa no se consume en su totalidad al momento de alcanzar la acidez necesaria para tener un yogurt de calidad.

7. Recomendaciones

- De acuerdo a los análisis llevados a cabo en este trabajo se puede recomendar hacer un seguimiento especial a la cantidad de energía gastada en el banco de hielo ya que este se pone en funcionamiento en promedio 3 veces por semana y se evidencio que hay un desperdicio de energía considerable ya que este equipo sobre pasa por mucho la cantidad de agua fría necesaria en los procesos de la empresa.
- Algo importante que se debe tener en cuenta en la empresa es la estandarización de sus procesas ya que como se evidencio en este trabajo se trabajan diferentes cultivos lo que lleva a que no se tenga homogeneidad en los lotes de yogurt producidos, según los análisis llevados a cabo se propone trabajar con el YAU- 0432 de la marca Igea ya que presenta valores de sinéresis menores que los otros cultivos analizados, y de acuerdo al seguimiento del ácido láctico llevado a cabo en los distintos lotes se evidencio que puede mantener una acidez aceptable a lo largo del tiempo aumentando su vida útil.
- Se recomienda la ejecución de los diseños propuestos en lo que respecta a los sistemas de control ya que permitirán tener productos con una calidad mucho mayor.
- De acuerdo a los datos obtenidos se recomienda hacer un control detallado de acidez en cada lote de produccion de yogurt dela empresa ya que como se aprecia en las gráficas de seguimiento de ácido láctico no es un proceso constante por la condición de temperatura ambiental que se presenta y por la destreza del operario al momento de realizar el control de la temperatura de inoculación.

Bibliografía

1. Acevedo, D., Rodríguez, A. & Fernández, A. (2010). Efecto de las Variables de Proceso sobre la Cinética de Acidificación, la Viabilidad y la Sinéresis del Suero Costeño Colombiano. *Información tecnológica*, 21(2) ,29-33.
2. Aghababaie, M., Khanahmadi, M. & Beheshti, M. (2015). Developing a detailed kinetic model for the production of yogurt starter bacteria in single strain cultures. *Food and Bioproducts Processing*, 94,657-667.
3. Briones C., M. (2010). validación del modelo matemático para planta de filtrado de concentrado de cobre (pregrado). Pontificie universidad católica de valparaiso.
4. Cadena Ríos, A. (2008). Selección de un filtro para clarificar y abrillantar cerveza, a partir del comparativo entre un filtro de placas verticales y un filtro de candelas (pregrado). instituto politécnico nacional.
5. Calixto Ortiz, M., Gómez olmedo, J., peralta Galicia, C., Sánchez Orduña, Y. and Sangabriel Jiménez, C. (2016). Regulación sanitaria y calidad microbiológica del yogurt no pasteurizado, que se expende en la ciudad de Xalapa. licenciatura en química clínica. universidad veracruzana.
6. Carrillo Paz, A. (2011). *Sistemas Automáticos de Control Fundamentos Básicos de Análisis y Modelado* (2nd ed., pp. 20-29). Santa Rita: UNERMB.
7. Castillo, M., Borregales, C. & Sánchez, M. (2004). Influencia de la pectina sobre las propiedades reológicas del yogur. *Revista de la facultad de farmacia*, 46(2), 33-35.
8. Castillo, m., Borregales, c. and Sánchez, m. (2004). influencia de la pectina sobre las propiedades reológicas del yogur. *revista de la facultad de farmacia*, 46(2), p.34.
9. Chevallier, M., Riaublanc, A., Lopez, C., Hamon, P., Rousseau, F. and Croguennec, T. (2016). Aggregated whey proteins and trace of caseins synergistically improve the heat stability of whey protein-rich emulsions. *Food Hydrocolloids*, 61, 487-495.
10. Couëdic, M. (2016). *Circuitos integrados para tiristores y triacs*. 1st ed. Barcelona: Marcombo S.A, pp.95-100.
11. Esener, A.A., Roels, J.A., Kossen, N.W.F., 1981. The Influence of temperature on the maximum specific growth rate of *Klebsiella pneumoniae*. *Biotechnology And Bioengineering* ,23, 1401–1405

12. Espinosa-Solares, T., Hernández-Montes, A., Bautista-Reyes, B., Cruz-Pioquinto, L., Santos-Moreno, A. & Valle-Guadarrama, S. (2014). Performance of two mixing systems on stirred yogurt production. *Ingeniería agrícola y biosistemas*, 6(2), 61-75.
13. ETSIAMN. Universidad Politècnica de Valencia, (2012). Determinación de proteínas de un alimento por el método Kjeldahl. Valoración con un ácido fuerte. (pp. 1-6). valencia, España.
14. Ferrandini, E., Castillo, M., López, M. & Laencina, J. (2006). Modelos estructurales de la micela de caseína. *Anales de Veterinaria de Murcia*, 22, 6-8
15. Gil Horán, R., Domínguez Espinosa, R. & Pacho Carrillo, J. (2008). Bioproducción de ácido láctico a partir de residuos de cáscara de naranja: Procesos de separación y purificación. *Tecnol. ciencia Ed (IMIQ)*, 23(2) ,79-90.
16. Gonzales Berrios, A. (2006). Establecimiento de una curva de acidificación del yogurt Zamorano (pregrado). universidad de zamorano.
17. He, Y., Tian, J., Liu, M. & Yan, B. (2014). Symbiosis Mechanisms of Lactic Acid Bacteria and Yeasts in Inner Mongolian Traditional Fermentative Milk Products. *New Biotechnology*, 31,144-145
18. Hernández Carranza, P. (2004). Evaluación de las propiedades fisicoquímicas y reológicas de yogurt bajo en grasa enriquecido con fibra y calcio de yogurt (Tesis Maestría). Universidad de las Américas Puebla.
19. Hernández Rojas, M. & Vélez Ruiz, J.F (2014). suero de leche y su aplicación en la elaboración de alimentos funcionales. *temas selectos de ingeniería de alimentos*, 8(2),13-22.
20. Hernández, A., Alfaro, I. & Arrieta, R. (2003). *Microbiología industrial*. san José, costa Rica: Universidad Estatal a Distancia, 72-73.
21. Islam R, Biazara J, Tangob B, Babolianc E. (2003). Solution of the kinetic modeling of lactic acid fermentation using Adomian decomposition method. *Applied Mathematics and Computation*. 144: 433– 439.
22. Lasik, A., Pikul, J., Majcher, M., Lasik-Kurdyś, M. and Konieczny, P. (2016). Characteristics of fermented ewe's milk product with an increased ratio of natural whey proteins to caseins.

23. Liu J, Ji L, Weng L, Zhang Q, Xu H. (2003) A mathematical model for gluconic acid fermentation by *Aspergillus niger*. *Biochemical Engineering Journal*. 14: 137–141.
24. Martín Castillo, J. & García García, M. (2009). *Automatismos industriales* (1st ed., pp. 208-212). Madrid: Editex.
25. Monteros Cárdenas, J. (2012). selección de la unidad de separación mecánica solido-líquido para un sistema de tratamiento de lodos procedentes del desarenado de los separadores de producción de petróleo, (pregrado). Escuela politécnica Nacional.
26. Mora Barandiarán, F., Barraza Jáuregui, G., & Obregón Domínguez, J. (2013). Sinéresis, características reológicas y consistencia sensorial de salsa de alcachofa (*Cynara scolymus* L.). *Scientia Agropecuaria*, 4, 163-172.
27. Narváez Toro, E., Vinazco Isaza, L., Torres Muñoz, G., & Guerrero Bueno, J. (2014). Optimización simultánea en filtros rotatorios al vacío para reducción del contenido de sacarosa y humedad en cachaza. *Sennova*, 1(1), 46-63.
28. Negri, L. (2005). el pH y la acidez de la leche. *Manual de Referencias técnicas para el logro de leche de calidad*. Buenos Aires: INTA.
29. Ogata, K. (2003). *Ingeniería de control moderna* (4th ed., pp. 3-7). Madrid: Prentice Hall.
30. Pauletti, M., Cruz, L., Mazza, G., Rozycki, S., Sabbag, N., & Costa, S. (2004). fabricación de yogur con bacterias inmovilizadas yogurt manufacture with immobilized cells fabricación de iogur con bacterias inmovilizadas. *Ciencia Y Tecnología Alimentaria*, 4(3), 190-196.
31. Pérez Vidal, A., Díaz Gómez, J., & González Rojas, G. (2014). Estudio comparativo de dos sistemas de filtración casera para el tratamiento de agua para consumo humano. *Ingenium*, 8(22), 12-17.
32. Pineda Santos, A. (2005). Estudio del tratamiento de un agua con alto contenido en silicatos de zirconio mediante Microfiltración y Ultrafiltración (Doctorado). Universidad Politécnica de Valencia.
33. Ratkowsky, D., Lowry, R., Mcmeekin, T. & Chandler, R. (1983). Model for bacterial culture growth rate throughout the entire biokinetic temperature Range. *Journal of bacteriology*, 154(3), 1222-1226.

34. Reyes Tello, C. (2008). Propuesta para tecnificar la producción artesanal de yogur probiótico. Pregrado. Universidad de San Carlos de Guatemala.
35. Reyes, J. & Ludeña, F. (2015). Evaluación de las Características Físico-Químicas, Microbiológicas y Sensoriales de un Yogur Elaborado con Sucralosa y Estevia. *Revista Politécnica*, 36(2), 5-7.
36. Roy, D., Leduy, A., & Goulet, J. (1987). Kinetics of Growth and Lactic Acid Production from Whey Permeate by *Lactobacillus helveticus*. *The Canadian journal of chemical engineering*, 65, 597-602.
37. Ruales Guzman, B. (2012). seguimiento de la producción del aroma del yogurt durante la fermentación *ácido láctica mediante nariz electrónica y evaluación sensorial*. Magister en Ciencia y Tecnología de Alimentos. Universidad Nacional de Colombia.
38. Ruales Guzmán, B. (2012). seguimiento de la producción del aroma del yogurt durante la fermentación ácido láctica mediante nariz electrónica y evaluación sensoria (magister). Universidad nacional de Colombia.
39. Schepers, A., Thibault, J., & Lacroix, C. (2001). *Lactobacillus helveticus* growth and lactic acid production during pH controlled batch cultures in whey permeate/yeast extract medium. Part I. multiple factor kinetic analysis. *Enzyme and microbial technology*, 30, 176–186.
40. Servicio Nacional de Aprendizaje. (1987). Acidez de la leche y determinación de adulteraciones (pp. 7-10). Bogotá D.C: SENA.
41. Shahani, k. and Sommer, h. (1951). The protein and non-protein nitrogen fractions in milk. i. methods of analysis. *Journal of dairy science*, 34(10), pp.1003-1009.
42. Suárez Zuluaga, D. (2007). evaluación y simulación de la producción de ácido láctico con *Lactobacillus casei* atcc 7469. pregrado. universidad Eafit.
43. Superintendencia de industria y comercio, (2012). Análisis del Mercado de la Leche y Derivados Lácteos en Colombia. Bogotá D.C: Delegatura de Protección de la Competencia, 3-6.
44. Torres, J. (2015). Señalización de fallas de drives de prensa 1 en el área de laminación (pregrado). Universidad tecnológica de Querétaro.
45. Veisseyre, R. (1985). *Lactología técnica*. 2nd ed. Zaragoza (España): Acribia, 32-33.

46. Ventosilla, J. (2014). Selección de filtro prensa y optimización de medios filtrantes para concentrados, relaves y lodos de neutralización. *RIIGEO*, 17(34), 117-119.
47. Weber, W. (1979). Control de la calidad del agua. Procesos fisicoquímicos (1st ed., pp. 173-179). Barcelona: Reverté.

ANEXOS

Anexo A. Registro físico-químico de la leche recibida en la empresa Coolactame Ltda. Por un periodo de 5 semanas. (Los datos presentados en este anexo son solo una pequeña parte de los totales).

# Muestra	% Grasa (m/v)	% solidos NG	% Solidos T	% Densidad (g/mg)	% Proteína
1	3,89	9,31	13,2	1,032	3,21
2	5,41	9,38	14,79	1,032	3,26
3	5,49	9,77	15,26	1,033	3,41
4	4,32	9,53	13,85	1,033	3,36
5	5,49	9,62	15,11	1,033	3,36
6	4,86	9,67	14,53	1,033	3,36
7	3,79	9,76	13,55	1,033	3,39
8	5,03	9,86	14,89	1,034	3,44
9	2,48	9,96	12,44	1,034	3,44
10	4,42	9,6	14,02	1,033	3,33
11	3,91	9,51	13,42	1,032	3,29
12	3,72	9,75	13,47	1,033	3,38
13	3,87	9,62	13,49	1,033	3,33
14	4,71	9,67	14,38	1,033	3,36
15	3,8	9,72	13,52	1,033	3,37
16	4,52	9,77	14,29	1,033	3,4
17	4,11	10,25	14,36	1,035	3,58
18	4,37	9,79	14,16	1,033	3,4
19	4,82	9,64	14,46	1,033	3,36
20	4,79	9,78	14,57	1,033	3,41
21	5,51	9,65	15,16	1,033	3,37
22	4,05	9,85	13,9	1,034	3,42
23	4,41	9,57	13,98	1,033	3,32
24	4,61	9,8	14,41	1,033	3,41
25	4,3	9,78	14,08	1,033	3,4
26	4,47	10,04	14,51	1,034	3,5
27	4,94	10,03	14,97	1,033	3,51
28	4,55	9,66	14,21	1,033	3,4
29	4,97	9,84	14,81	1,033	3,43
30	2,78	9,81	12,59	1,033	3,39
31	4	9,91	13,91	1,033	3,44
32	4,89	9,64	14,53	1,033	3,35
33	5,42	9,82	15,24	1,033	3,43

34	4,21	9,83	14,04	1,033	3,42
35	4,1	9,97	14,07	1,034	3,47
36	4,69	10,04	14,73	1,034	3,31
37	5,03	9,79	14,82	1,033	3,42
38	3,21	9,921	13,131	1,034	3,44
39	4,46	10,05	14,51	1,034	3,51
40	4,14	9,74	13,88	1,033	3,38
41	4,18	9,77	13,95	1,033	3,39
42	4,73	9,8	14,53	1,033	3,41
43	3,74	9,44	13,18	1,032	3,26
44	4,88	9,86	14,74	1,033	3,44
45	4,73	9,82	14,55	1,033	3,42
46	4,97	9,44	14,41	1,032	3,28
47	4,06	10,26	14,32	1,035	3,58
48	3,74	9,68	13,42	1,033	3,35
49	4,81	10	14,81	1,034	3,49
50	4,5	9,76	14,26	1,033	3,39
51	4,41	9,87	14,28	1,034	3,44
52	4,63	9,82	14,45	1,033	3,42
53	4,79	9,66	14,45	1,032	3,36
54	4,7	10,07	14,77	1,033	3,52
55	4,81	10,12	14,93	1,032	3,54
56	5,26	9,97	15,23	1,034	3,49
57	4,99	9,78	14,77	1,033	3,41
58	4,28	9,88	14,16	1,033	3,47
59	4,36	9,8	14,16	1,033	3,41
60	5,36	9,79	15,15	1,033	3,48
61	4,44	9,79	14,23	1,033	3,41
62	4,51	10,05	14,56	1,034	3,51
63	2,89	9,96	12,85	1,034	3,45
64	4,02	9,93	13,95	1,034	3,45
65	5,31	10,03	15,34	1,034	3,51
66	5,84	10,26	16,1	1,035	3,61
67	4,32	10,35	14,67	1,034	3,52
68	4,33	10,09	14,42	1,034	3,52
69	5,47	9,92	15,39	1,033	3,49
70	4,72	10,08	14,8	1,034	3,52
71	5,09	10,09	15,18	1,034	3,53
72	5,62	10,07	15,69	1,034	3,53
73	4,51	9,26	13,77	1,03	3,27
74	4,01	9,63	13,64	1,032	3,34

Anexo B. Cálculos para la determinación del porcentaje total de nitrógeno en cinco lotes de yogurt en la empresa Coolactame Ltda.

$$\text{Nitrógeno total \%} = (V_{\text{Muestra}} - V_{\text{Blanco}}) \times N_{\text{Acido}} \times 0.014 \times F \times 100/g_{\text{Muestra}}$$

Siendo V_{Muestra} ml de ácido gastados en la valoración de la muestra

V_{Blanco}	ml de ácido gastados en la valoración del blanco
N_{Acido}	normalidad del ácido sulfúrico
0.014	peso del meq de nitrógeno, en g
F	factor de conversión de nitrógeno a proteína
g_{muestra}	peso en g de la muestra

En los cálculos para convertir nitrógeno a proteínas, usar el factor 6,25 para carnes, 5,7 para cereales y soja y 6,38 para leche y derivados. (ETSIAMN. Universidad Politécnica de Valencia, 2012)

➤ Lote 1

$$g_{\text{muestra}} = 0,3 \text{ gr}$$

$$V_{\text{Blanco}} = 0,2 \text{ ml}$$

$$F = 6,38$$

$$N_{\text{Acido}} = 0,2 \text{ N}$$

$$V_{\text{Muestra}} = 0,8 \text{ ml}$$

$$\% \text{ Nitrógeno total} = (0,8 \text{ ml} - 0,2 \text{ ml}) \times 0,2 \text{ N} \times 0,014 \times 6,38 \times 100/0,3 \text{ gr}$$

$$\% \text{ Nitrógeno total} = 3,572 \%$$

➤ Lote 2

$$g_{\text{muestra}} = 0,4 \text{ gr}$$

$$V_{\text{Blanco}} = 0,2 \text{ ml}$$

$$F = 6,38$$

$$N_{\text{Acido}} = 0,2 \text{ N}$$

$$V_{\text{Muestra}} = 0,9 \text{ ml}$$

$$\% \text{ Nitrógeno total} = (0,9 \text{ ml} - 0,2 \text{ ml}) \times 0,2 \text{ N} \times 0,014 \times 6,38 \times 100/0,4 \text{ gr}$$

% Nitrógeno total = 3,126 %

➤ Lote 3

$g_{\text{muestra}} = 0,7 \text{ gr}$

$V_{\text{Blanco}} = 0,2 \text{ ml}$

$F = 6,38$

$N_{\text{Acido}} = 0,2 \text{ N}$

$V_{\text{Muestra}} = 1,75 \text{ ml}$

% Nitrógeno total = $(1,75 \text{ ml} - 0,2 \text{ ml}) \times 0,2 \text{ N} \times 0,014 \times 6,38 \times 100 / 0,7 \text{ gr}$

% Nitrógeno total = 3,956 %

➤ Lote 4

$g_{\text{muestra}} = 0,5 \text{ gr}$

$V_{\text{Blanco}} = 0,2 \text{ ml}$

$F = 6,38$

$N_{\text{Acido}} = 0,2 \text{ N}$

$V_{\text{Muestra}} = 1,15 \text{ ml}$

% Nitrógeno total = $(1,15 \text{ ml} - 0,2 \text{ ml}) \times 0,2 \text{ N} \times 0,014 \times 6,38 \times 100 / 0,5 \text{ gr}$

% Nitrógeno total = 3,394 %

➤ Lote 5

$g_{\text{muestra}} = 0,5 \text{ gr}$

$V_{\text{Blanco}} = 0,2 \text{ ml}$

$F = 6,38$

$N_{\text{Acido}} = 0,2 \text{ N}$

$V_{\text{Muestra}} = 0,7 \text{ ml}$

% Nitrógeno total = $(0,7 \text{ ml} - 0,2 \text{ ml}) \times 0,2 \text{ N} \times 0,014 \times 6,38 \times 100 / 0,27 \text{ gr}$

% Nitrógeno total = 3,30

Anexo C. Cálculos para el porcentaje de sinéresis

$$S = \frac{M_2}{M_1} \times 100$$

S = Porcentaje de sinéresis

M_1 = Peso inicial de la muestra

M_2 = Pérdida de peso después de la centrifugación

➤ Lote 1

El lote 1 hace referencia al Lote 10-09-2016 de la empresa coolactame en cual se utilizaron:

Leche fresca	1200 Lts
Azúcar	126 Kgr
Lactosuero	153 Lts
Lactocultivo	FD-DVS ABY-3 Probio-Tec marca Hansen

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
M_1	18,163	18,273	19,263	18,676	18,314	19,214	18,792
M_2	7,13	7,754	8,599	8,163	9,931	10,719	10,985
S	39,26	42,436	44,64	43,71	54,23	55,789	58,46

➤ Lote 2

El lote 2 hace referencia al Lote 22-09-2016 de la empresa coolactame en cual se utilizaron:

Leche fresca	1000 Lts
Azúcar	105 Kgr
Lactosuero	100 Lts
Lactocultivo	YAU- 0432 marca Igea

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
M_1	17,798	18,987	18,798	19,217	18,621	18,725	17,898

M₂	6,682	7,473	8,816	8,368	9,184	9,895	9,563
S	37,543	39,36	46,896	43,546	49,321	52,846	53,43

➤ Lote 3

El lote 3 hace referencia al Lote 30-09-2016 de la empresa coolactame en cual se utilizaron:

Leche fresca	1000 Lts
Azúcar	105 Kgr
Lactosuero	128 Lts
Lactocultivo	FD-DVS ABY-3 Probio-Tec marca Hansen

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
M₁	19,792	18,927	18,071	17,18	18,631	18,792	19,05
M₂	8,1642	8,182	7,331	7,579	9,369	10,567	10,53
S	41,25	43,23	40,57	44,23	50,29	56,23	55,278

➤ Lote 4

El lote 4 hace referencia al Lote 19-10-2016 de la empresa coolactame en cual se utilizaron:

Leche fresca	1000 Lts
Azúcar	105 Kgr
Lactosuero	128 Lts
Lactocultivo	FD-DVS ABY-3 Probio-Tec marca Hansen

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
M₁	19,171	17,891	18,323	19,21	18,971	18,121	19,03
M₂	8,096	7,058	8,103	9,46	10,489	11,296	12,694
S	42,23	39,45	44,23	49,25	55,29	62,34	66,71

➤ Lote 5

El lote 5 hace referencia al Lote 01-11-2016 de la empresa coolactame en cual se utilizaron:

Leche fresca	1000 Lts
Azúcar	105 Kgr
Lactosuero	128 Lts
Lactocultivo	YAU- 0431 marca Igea

	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6	Día 7
M₁	17,971	18,791	19,076	18,333	18,432	18,07	18,736
M₂	6,98	7,637	8,502	7,927	9,267	9,597	10,185
S	38,56	40,64	44,57	43,24	50,277	53,11	54,36

Anexo D. Balance de materia y energía

➤ Balance de energía

Para la determinación del consumo en Kw por tiempo de operación se utilizó la relación de conversión con los caballos de fuerza de cada motor que entra en el proceso y se multiplico en valor obtenido en Kw por el tiempo de operación del equipo, obteniendo la energía requerida por proceso.

1 hp= 745,7 Watts/1000=0,7457 Kw * Tiempo de operación= energía requerida por hora

Transporte a la clarificadora		
caballos de fuerza	tiempo de operación (horas)	conversión
3	0,5	1 hp= 745,7 Watts
Watts	Kwatts	Energía requerida (Kw/h)
2237,1	2,2371	1,11855

Clarificación		
caballos de	tiempo de operación (horas)	conversión

fuerza		
15	0,667	1 hp= 745,7 Watts
Watts	Kwatts	Energía requerida (Kw/h)
11185,5	11,1855	7,4607285

Homogenización		
caballos de fuerza	tiempo de operación (horas)	conversión
15	0,667	1 hp= 745,7 Watts
Watts	Kwatts	Energía requerida (Kw/h)
11185,5	11,1855	7,4607285

Transporte al pasteurizador		
caballos de fuerza	tiempo de operación (horas)	conversión
3	0,5	1 hp= 745,7 Watts
Watts	Kwatts	Energía requerida (Kw/h)
2237,1	2,2371	1,11855

Caldera		
caballos de fuerza	tiempo de operación (horas)	conversión
9,5	0,833	1 hp= 745,7 Watts
Watts	kwatts	Energía requerida (Kw/h)
7084,15	7,08415	5,90109695

Agitación en el fermentador		
caballos de fuerza	tiempo de operación (horas)	conversión
3	2,025	1 hp= 745,7 Watts
Watts	Kwatts	Energía requerida (Kw/h)
2237,1	2,2371	4,5301275

Requerimiento energético banco de hielo		
caballos de fuerza	tiempo de operación (horas)	conversión
10	9	1 hp= 745,7 Watts
Watts	Kwatts	Energía requerida (Kw/h)
7457	7,457	67,113

Bomba banco de hielo		
caballos de fuerza	tiempo de operación (horas)	conversión
4,8	0,167	1 hp= 745,7 Watts
Watts	Kwatts	Energía requerida (Kw/h)
3579,36	3,57936	0,59775312

Estos valores dados en cada tabla expresan el gasto en energía eléctrica (Kw/h)

A continuación se manejan los valores en cuanto a KJ necesarios para el aumento y disminución de la temperatura.

Aumento de la temperatura para pasteurizar

Presión del vapor suministrado por la caldera 30 Psi T= 121 °C

De acuerdo a esto:

$$H_f = 218,9 \frac{BTU}{Lb}$$

$$H_g = 1164 \frac{BTU}{Lb}$$

$$-Q_{\text{vapor}} = Q_{\text{leche}}$$

$$-mv*(H_f - H_g) = m*cp*(T_2 - T_1)$$

$$-mv*(218,9 - 1164) \frac{BTU}{Lb} = 1033 \text{ Kg} * 3,894 \frac{KJ}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * (85 - 29) ^\circ\text{C}$$

$$-mv*(-945,1) \frac{BTU}{Lb} * 1137 \frac{KJ}{1BTU} * 1 \frac{Lb}{0,453 \text{ Kg}} = 225260,112 \text{ KJ}$$

$$mv*2372,13 \frac{KJ}{\text{Kg}} = 225260,112 \text{ KJ}$$

$$m_v = 94,961 \text{ Kg}$$

$$Q_{\text{vapor}} = m_v * \lambda_{\text{Vapor}}$$

$$Q_{\text{vapor}} = 94,961 \text{ Kg} * 2372,13 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}}$$

$$Q_{\text{vapor}} = 225259,84 \text{ KJ}$$

$$Q_{\text{leche calentada}} = m * c_p * \Delta T$$

$$Q_{\text{leche calentada}} = 1033 \text{ Kg} * 3,894 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * (85 - 29) ^\circ\text{C} = 225260,112 \text{ KJ}$$

$$Q_{\text{total}} = \Sigma Q = 450520,186 \text{ KJ}$$

➤ Disminución de la temperatura previo a inoculación:

$$m * c_{p_{\text{agua}}} * (T_2 - T_1) = m * c_{p_{\text{mezcla}}} * (T_1 - T_2)$$

Para hallar el cp de la mezcla se utilizó:

$$C_{p_{\text{mezcla}}} = (m_{\text{azúcar}} * c_{p_{\text{azúcar}}}) + (m_{\text{leche}} * c_{p_{\text{leche}}}) + (m_{\text{Lactosuero}} * c_{p_{\text{Lactosuero}}})$$

$$C_{p_{\text{mezcla}}} = (0,085 * 1,26 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}}) + (0,811 * 3,894 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}}) + (0,1038 * 4,061 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}})$$

$$C_{p_{\text{mezcla}}} = 3,65 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}}$$

$$m_{\text{agua}} = (4,186 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * 2^\circ\text{C}) = 1264,5 \text{ Kg} * 3,65 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * (43 - 85) ^\circ\text{C}$$

$$m_{\text{agua}} = 8,372 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg}} = 193847,85 \text{ KJ}$$

$$m_{\text{agua}} = 23154,306 \text{ Kg}$$

$$Q_{\text{agua}} = m * c_p * (T_2 - T_1)$$

$$Q_{\text{agua}} = 23154,306 \text{ Kg} * 4,186 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * 2^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{agua}} = 193847,849 \text{ KJ}$$

$$-Q_{\text{mezcla enfriada}} = 1264,5 \text{ Kg} * 3,65 \frac{\text{KJ}}{\text{Kg} * ^\circ\text{C}} * (43 - 85) ^\circ\text{C}$$

$$-Q_{\text{mezcla enfriada}} = 193847,85 \text{ KJ}$$

$$Q_{\text{total}} = \Sigma Q = 387695,69 \text{ KJ}$$

Anexo E. Cálculos del seguimiento de la producción de ácido láctico en la fermentación del yogurt Coolactame.

Los datos presentados en este anexo relacionan los grados thornier con los Dornic, un grado Dornic es igual (9/10) de un grado Thornier (Servicio Nacional de Aprendizaje, 1987), y un grado Dornic es equivalente a 0,1 g/l de ácido láctico. (Negri, 2005).

$$^{\circ}\text{D} = (9/10) * ^{\circ}\text{Th}$$

$$1^{\circ}\text{D} = 0,1 \text{ g/l de ácido láctico}$$

Lote 1

El lote 1 hace referencia al Lote 10-09-2016 de la empresa Coolactame que se describe en el anexo C.

Tiempo	$^{\circ}\text{Th}$	$^{\circ}\text{D}$	g/l ácido láctico
0	16	14,4	1,44
1	15	13,5	1,35
1,5	19,5	17,55	1,755
2	25,5	22,95	2,295
2,5	38,5	34,65	3,465
3	43,5	39,15	3,915
3,5	56,5	50,85	5,085

Lote 2

Tiempo	Th°	D°	g/l ácido láctico
0	16,5	14,85	1,485

1	14	12,6	1,26
1,5	19	17,1	1,71
2	22,1	19,89	1,989
2,5	29,3	26,37	2,637
3	33,5	30,15	3,015
3,5	44,5	40,05	4,005
4	49,5	44,55	4,455
4,5	56	50,4	5,04

Lote 3

Tiempo	Th°	D°	g/l ácido láctico
0	16	14,4	1,44
1	14,5	13,05	1,305
1,5	30	27	2,7
2	38,5	34,65	3,465
h2,5	45,5	40,95	4,095
3	54	48,6	4,86

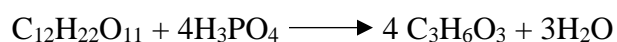
Lote 4

Tiempo	Th°	D°	g/l ácido láctico
0	15	13,5	1,35
1	13,5	12,15	1,215
1,5	18,9	17,01	1,701
2	28,5	25,65	2,565
2,5	33,4	30,06	3,006
3	39,5	35,55	3,555
3,5	45,5	40,95	4,095
4	50	45	4,5

Lote 5

Tiempo	Th°	D°	g/l ácido láctico
0	17,5	15,75	1,575
1	14,5	13,05	1,305

1,5	17,5	15,75	1,575
2	18,5	16,65	1,665
2,5	20,5	18,45	1,845
3	22,5	20,25	2,025
3,5	23,5	21,15	2,115
4	31	27,9	2,79
4,5	45	40,5	4,05
5	50	45	4,5
5,5	55	49,5	4,95



ANEXO F. Modelado cinético

Tabla para curva de calibracion.

concentración (g/l)	absorbancia
1,5	1,07
2	1,1
2,5	1,15
3	1,18
3,5	1,24
4	1,28
4,5	1,36
5,5	1,42

Tabla para seguimiento de acido lactico por espectrofometria.

absorbancia	concentración	tiempo
1,07	1,5	0
1,078	1,71	0,5
1,109	2,01	1
1,132	2,3	1,5
1,168	2,7	2
1,215	3,2	2,5
1,28	3,9	3
1,328	4,44	3,5
1,381	5,01	4

