

# **SIMULACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DEL LAVADO DE PASTEURIZADORES DE LECHE**

## **SIMULATION AND OPTIMIZATION OF CLEANING OF MILK PASTEURIZATION EQUIPMENTS**

**Gilberto Tierrablanca<sup>1</sup>, Alejandro Guzmán-Zazueta<sup>2</sup>, Ahuiztolt de J. Joaquín-Ramos<sup>1</sup>,  
Richart Vázquez-Román<sup>3</sup>, Christian O. Díaz-Ovalle<sup>1,\*</sup>, Florianne Castillo-Borja<sup>4</sup>**

(1) Tecnológico Nacional de México-Roque, Departamento de Ingenierías, (2) Departamento de Informática,  
Carretera Celaya-Juventino Rosas Km 8, Celaya, Guanajuato, 38110 México

(3) Tecnológico Nacional de México en Celaya, Departamento de Ingeniería Química, Av. Tecnológico y Antonio García Cubas  
s/n, Celaya, Guanajuato, 38010 México

(4) TecNM/Instituto Tecnológico de Aguascalientes, Departamento de Ingeniería Química, Av. Adolfo López Mateos 1801 Ote.,  
Aguascalientes, Aguascalientes, 20256 México

\*autor de contacto (e-mail: chdiaz@itroque.edu.mx)

*Recibido: 21/11/2017 - Evaluado: 10/01/2018 - Aceptado: 01/02/2018*

### **RESUMEN**

El ensuciamiento de pasteurizadores de leche es un problema que impacta en los costos de producción, y este es reducido con adecuadas condiciones de operación y sistemas de lavado. El sistema de lavado CIP (cleaning-in-place) es el más recomendado para pasteurizadores de leche. En este trabajo, este método de lavado es modelado considerando ciclos para calcular la reducción de la proteína desnaturalizada. Esto es posible a través de dos propuestas. La primera estrategia consiste en la simulación de la limpieza bajo la reducción del ensuciamiento y la proteína desnaturalizada, esto bajo modelos dinámicos ya establecidos. La segunda estrategia es una formulación matemática para minimizar el costo de limpieza a través de la selección de un sistema CIP óptimo, esto bajo modelos no lineales y disyuntivos. Ambas estrategias están contenidas en el software FCIPDYNAMICS, realizado en Visual C# y ligado a GAMS. Un caso de estudio fue planteado para demostrar la aplicabilidad de esta propuesta, y los resultados indicaron la viabilidad de usar FCIPDYNAMICS.

### **ABSTRACT**

The fouling in milk pasteurization equipments impacts on the production costs, and it is reduced by suitable operating conditions and cleaning systems. The CIP (cleaning-in-place) washing system is the most recommended method for pasteurization equipments. In this work, CIP system is modeling by considering cleaning cycles to compute the reduction of denaturalized protein. This is achieved by two approaches. The first approach simulates cleaning by reducing the fouling thickness and denaturalized protein simultaneously; this is supported by dynamic models. The second approach is a mathematical formulation to minimize the cost of cleaning by selecting an optimal CIP system; this involves a disjunctive nonlinear programming. The software FCIPDYNAMICS was developed to contain both strategies in a Visual C# code linked to GAMS. This was applied on a case of study, and the results indicated the valuable applicability of FCIPDYNAMICS.

Palabras clave: programación disyuntiva, ensuciamiento, limpieza, modelado

Keywords: disjunctive programming, fouling, cleaning, modelling

## INTRODUCCIÓN

El procesamiento térmico de la leche genera una costra indeseable conocida como ensuciamiento, la cual: i) reduce la eficiencia térmica del equipo, ii) aumenta el riesgo microbiológico en el producto, iii) requiere inversión para su eliminación, e iv) incrementa alteraciones de la calidad en el producto. El fenómeno de ensuciamiento proviene de las características bioquímicas de la leche. Lalande *et al.* (1984), mencionaron un conjunto de investigaciones relevantes sobre el impacto de la composición de la leche en el ensuciamiento como: a) los ácidos grasos generados en la lipólisis durante el almacenamiento reducen el ensuciamiento (Burton, 1966), b) la  $\beta$ -caseína reduce el ensuciamiento (Burdett, 1974) y c) el fosfato de calcio y la  $\beta$ -lactoglobulina ( $\beta$ -lg) son la fuente principal de ensuciamiento. Sin embargo, las características de los productos lácteos convencionales no permiten modificaciones en la composición de la leche, por lo cual el fenómeno de ensuciamiento solo puede ser mitigado con óptimas condiciones de operación y eliminado por limpieza.

Las principales investigaciones sobre ensuciamiento en la industria láctea se han enfocado en el modelado (Jun & Puri, 2005) y los factores que lo ocasionan (Petit *et al.*, 2013). Gómez Orozco y Capera Urrego (2016), resumieron los modelos de ensuciamiento más importantes. En general, el análisis de ensuciamiento ha incluido tópicos como: cinética de desnaturalización de proteínas (Fryer & Slatter, 1985), modelado de formación de ensuciamiento (Paterson & Fryer, 1988), modelado de la cinética de desnaturalización de la  $\beta$ -lg (de Jong *et al.*, 1992; de Jong *et al.*, 1993), efecto del flujo y temperatura sobre la formación de ensuciamiento (Belmar-Beiny *et al.*, 1993), análisis de los factores involucrados en el ensuciamiento (de Jong, 1997), análisis en 2D de la formación de ensuciamiento (Jun & Puri, 2006), diseño óptimo y modelado de intercambiadores de calor con ensuciamiento (Delplace & Leuliet, 1995; Georgiadis & Macchietto, 2000; Georgiadis *et al.*, 1998a; Georgiadis *et al.*, 1998b), comparación de ensuciamiento por leche y suero (Robbins *et al.*, 1999), análisis de ensuciamiento en evaporadores de película descendente (Díaz-Ovalle *et al.*, 2017a; Paramalingam *et al.*, 2000), efecto de los minerales sobre el ensuciamiento por suero (Christian *et al.*, 2002), efecto de la concentración de proteína sobre ensuciamiento (Fickak *et al.*, 2011), análisis del efecto interfacial sobre los mecanismos de crecimiento por ensuciamiento (Jimenez *et al.*, 2013), análisis detallado de las etapas del ensuciamiento por  $\beta$ -lg (Petit *et al.*, 2013) y equivalencia del espesor de ensuciamiento con la desnaturalización de  $\beta$ -lg (Molina-Pérez *et al.*, 2015).

El ensuciamiento en equipos de procesamiento de lácteos es contrarrestado por las acciones físicas y químicas de la limpieza (Dresch *et al.*, 2001). En la práctica, existen varios tipos de limpieza, sin embargo para equipos de transferencia de calor el más recomendable es lavar sin desmontar. Esta técnica conocida como CIP (Cleaning-In-Place) garantiza altos niveles de limpieza; además, el CIP puede ser automatizado con un conjunto de secuencias de enjuague y recicle de soluciones de limpieza (Memisi *et al.*, 2015; Stanga, 2010). La eficiencia de un sistema CIP depende de sus condiciones operativas (Palmowski *et al.*, 2005): tiempo de contacto, temperatura, intensidad de la turbulencia, características del agente de limpieza y su concentración. Por este motivo, los factores de la limpieza han sido analizados con: a) dinámica de fluidos en sistemas de lavado (Hankinson & Carver, 1968), b) modelado de la eficiencia de lavado respecto a los tiempos de lavado y enjuague (Tissier *et al.*, 1982), y c) experimentos de remoción en base a la concentración de detergente, temperatura y tiempo de lavado (Bird & Bartlett, 1995).

El lavado por sistema CIP consume tiempo de operación y servicios y no garantiza una eliminación total de los depósitos de ensuciamiento (Liu *et al.*, 2006). Gillham *et al.* (1999), definieron que un sistema CIP mostrará alta eficiencia si: a) las zonas de alto ensuciamiento son reducidas y b) las condiciones óptimas de operación son determinadas. Ambos puntos han sido analizados experimentalmente en los trabajos de Timperley y Smeulders (1988), Bird y Fryer (1991), Jeurnink y Brinkman (1994), Dürr y Graßhoff (1999), van Asselt *et al.* (2002), Hooper *et al.* (2006), Liu *et al.* (2006) y Schöler *et al.* (2012). No obstante, el planteamiento teórico de esto puntos ha permitido el desarrollo de modelos matemáticos y la aplicación de técnicas numéricas. La determinación de las zonas de ensuciamiento ha sido posible bajo simulación de dinámica computacional de fluidos (CFD, por sus siglas en inglés), como lo demuestran Jensen y Friis (2005), Jun y Puri (2006) y Asteriadou *et al.* (2007). Por otra parte, la determinación de las condiciones de operación incluye los modelos cinéticos de

la remoción de la proteína desnaturalizada (Gallot-Lavallee *et al.*, 1984; Lelièvre *et al.*, 2002; Schöler *et al.*, 2012) y sólidos de grasa (Jurado Alameda *et al.*, 2009).

La optimización de limpieza de equipos inició con la demostración de la dependencia lineal del tiempo de lavado con el costo en sistemas bajo ciclos (Ma & Epstein, 1981). Georgiadis *et al.* (1999), presentaron una estrategia para optimizar la limpieza de ciclos de lavado en redes de intercambio de calor bajo un costo fijo de limpieza. Similarmente, Smaïli *et al.* (1999) plantearon la optimización de sistemas de intercambiadores de calor en el proceso de azúcar, en el cual la función objetivo consideró los escenarios sin limpieza. Markowski y Urbaniec (2005), presentaron una estrategia para optimizar la limpieza en redes de intercambio de calor evitando la pérdida de energía por efecto de la resistencia térmica de la suciedad. Posteriormente, Rodríguez y Smith (2007), optimizaron las condiciones de operación para mitigar el ensuciamiento en redes de intercambio de calor. Por otra parte, Ishiyama *et al.* (2011), presentaron una estrategia para determinar el ciclo de lavado óptimo para distintos tipos de suciedad, y Pogiatis *et al.* (2012), presentaron una estrategia para determinar el tiempo e intensidad de lavado. En el procesamiento de leche, Bird y Espig (1994) definieron que los costos de un sistema de limpieza deben considerar: tiempo de lavado, cantidad de químicos, temperatura de agua de lavado y el diseño del intercambiador. Esto fue considerado por Georgiadis *et al.* (1998c), quienes presentaron un trabajo que incluyó el diseño del intercambiador de calor con ensuciamiento por leche y se caracterizó por: a) la optimización dinámica de la limpieza bajo parámetros de Bird y Espig (1994) y b) la reducción del espesor de ensuciamiento bajo el modelo de Bird y Fryer (1992). Naimsuwan *et al.* (2011), presentaron una estrategia para analizar dinámicamente la limpieza de un pasteurizador de leche bajo CIP, pero el modelo no incluyó la formación de ensuciamiento. Posteriormente, Piepiórka-Stepuk *et al.* (2016) realizaron la poli-optimización de modelos de grado de limpieza provenientes de datos experimentales, los resultados indicaron que la calidad de limpieza y la cantidad de energía consumida son criterios opuestos en la optimización.

Este trabajo presenta una estrategia para simular y optimizar la limpieza y ensuciamiento de un equipo de transferencia de calor considerando: a) ciclos de lavado con variación de la composición del detergente, flujo, temperatura y tiempo de lavado, b) relación entre espesor de ensuciamiento y proteína desnaturalizada, y c) selección del ciclo óptimo de lavado. Una estrategia así no ha sido presentada con anterioridad. El contenido de este trabajo incluye el modelado de ensuciamiento, limpieza y optimización y la estrategia de solución bajo un paquete computacional.

## PLANTEAMIENTO MATEMÁTICO

Este trabajo plantea la simulación y optimización de un equipo de transferencia de calor como estrategias independientes entre sí. La simulación considera al equipo bajo ensuciamiento en estado transitorio, en el cual se aplican balances de materia y energía. La optimización considera un conjunto de lavados a seleccionar minimizando el costo de limpieza. Las siguientes sub-secciones describen detalladamente los modelos empleados.

### Modelado de ensuciamiento

El fenómeno de ensuciamiento está ligado totalmente al cambio de temperatura, la cual es simulada a través de un balance de energía e incluida en el modelo de ensuciamiento. El balance de energía en estado transitorio fue desarrollado para un proceso continuo e involucra la desnaturalización de proteína  $\beta$ -lg:

$$\rho C_p V \frac{dT}{dt} = -F \int_{T_0}^T C_p dT + U_c A_c (T_w - T_{prom}) + VC_n \Delta H_r \quad (1)$$

donde  $V$  el volumen del alimento dentro del equipo,  $C_p$  la capacidad calorífica del alimento,  $\rho$  la densidad del alimento,  $t$  el tiempo,  $T$  la temperatura de salida,  $T_w$  la temperatura en la pared,  $T_0$  la temperatura de entrada,

$T_{prom}$  la temperatura promedio entre  $T$  y  $T_0$ ,  $F$  es el flujo másico,  $A_c$  el área de transferencia de calor,  $\Delta H_r$  la entalpía de reacción de la proteína nativa bajo el modelo:  $-0.001198e^{0.05T}$  (Burgos *et al.*, 2012),  $C_n$  la concentración molar de la proteína nativa, y  $U_c$  el coeficiente global de transferencia de calor corregido con ensuciamiento, el cual se define como:

$$U_c = \left( \frac{h_o + h_i}{h_o h_i} + \frac{\delta}{\kappa_e} \right)^{-1} \quad (2)$$

donde  $h_i$  y  $h_o$  son los coeficientes de película para el fluido interno y el medio de calefacción respectivamente,  $\delta$  es el espesor de ensuciamiento y  $\kappa_e$  su conductividad térmica, 0.27 W/m·K (Riverol & Napolitano, 2005). Los coeficientes de película corresponden a aquellos propios de la geometría y se pueden obtener de la literatura. El espesor de ensuciamiento es obtenido bajo el modelo de Fryer y Slatter (1985), el cual fue adecuado para alimentos con propiedades variables como (Molina-Pérez *et al.*, 2015):

$$\frac{d\delta}{dt} = \frac{\kappa_d \kappa_e}{U_o Re} \exp \left[ \frac{-E}{R} \cdot \frac{\kappa_e + \delta U_o}{T_w \kappa_e + \delta T U_o} \right] - \delta \kappa_r - \frac{\delta}{U_o} \frac{dT}{dt} \left( \frac{dU_o}{dT} \right) \quad (3)$$

donde  $Re$  es el número de Reynolds,  $E$  la energía de activación, 89000 J/mol,  $R$  la constante universal de los gases, 8.3167 J/molK,  $\kappa_d$  y  $\kappa_r$  son parámetros de la velocidad de ensuciamiento,  $4.85 \times 10^{13} \text{ s}^{-1}$  y  $1.3 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$  respectivamente (Fryer, 1989).

#### Modelado de materia de ensuciamiento

El modelado cinético de formación de proteína desnaturalizada siguió los mecanismos: a) la proteína nativa (n) produce proteína desnaturalizada (u), b) la proteína desnaturalizada (u), en paralelo, produce las proteínas agregada (a) y depositada (d) (de Jong *et al.*, 1992). El modelo de reacción corresponde a un sistema bajo flujo continuo representado por:

$$\left. \begin{aligned} \frac{dC_n}{dt} &= \frac{FX_p}{PmV} - k_u C_n - \frac{FC_n}{V\rho} \\ \frac{dC_u}{dt} &= k_u C_n - k_a C_u^2 - k_d C_u - \frac{FC_u}{V\rho} \\ \frac{dC_a}{dt} &= k_a C_u^2 - \frac{FC_a}{V\rho} \\ \frac{dC_d}{dt} &= k_d C_u - \frac{FC_d}{V\rho} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Donde  $C$  es la concentración de la proteína  $\beta$ -lg en los distintos mecanismos de reacción (u, n, a),  $Pm$  el peso molecular de la proteína  $\beta$ -lg,  $X_p$  la composición másica de la proteína  $\beta$ -lg en el flujo de entrada y  $k$  el parámetro de velocidades en los distintos mecanismos de reacción (u, n, a). El parámetro  $k$  es formulado bajo un modelo de Arrhenius:  $k_0 \exp(E_a/RT)$ . Así, los valores de los parámetros,  $k_0$  y  $E_a$ , son propios para cada estado de  $\beta$ -lg: a) desnaturalizada (u):  $k_0 = 2.37E37 \text{ s}^{-1}$ ,  $E_a = 261 \text{ kJ/mol}$ , b) agregada (a)  $k_0 = 1.36E43 \text{ s}^{-1}$ ,  $E_a = 312 \text{ kJ/mol}$ , y c) depositada (d):  $k_0 = 0.51 \text{ s}^{-1}$ ,  $E_a = 45.1 \text{ kJ/mol}$ . Estos valores provienen de referencias citadas por Molina-Pérez *et al.* (2015).

#### Modelado de lavado

Gallot-Lavallee *et al.* (1984), propusieron un modelo de reducción de ensuciamiento bajo la variable masa de proteína desnaturalizada por unidad de área:

$$-\frac{dm}{dt} = k_L m \quad (5)$$

Donde  $m$  es la masa de ensuciamiento por unidad de área y  $k_L$  es la constante de velocidad de limpieza de la reacción que se obtiene como:

$$\log k_L = -1.01 + 0.271X_T + 0.2X_M + 0.16X_F - 0.67m \quad (6)$$

Donde  $X$  corresponde al valor normalizado de los factores de limpieza con los subíndices de: T, temperatura, M, composición peso de agente de limpieza y F, flujo másico. Esta normalización involucra a los valores promedio y máximo como:

$$X_j = (Vf_j - Vp_j) / (Vm_j - Vp_j) \quad (7)$$

donde  $Vf$  es el valor del factor de ensuciamiento  $j$ ,  $Vm$  es el valor máximo del factor  $j$  y  $Vp$  es el valor promedio del factor  $j$  e  $j$  es el índice de los factores (T: temperatura, M: concentración peso de agente de limpieza y F: flujo másico).

Los modelos numerados del (1) al (7) son un conjunto de ecuaciones diferenciales, cuya solución representa un ciclo de ensuciamiento-lavado.

#### Optimización de ciclos de lavado

Esta sección describe la estrategia para determinar un lavado óptimo a partir de un conjunto de posibles lavados. En este caso, cada lavado tiene como parámetros la temperatura, la concentración del agente de limpieza y el flujo másico. La formulación inicia con las definiciones generales: un conjunto de posibles lavados  $I \in I$  donde cada lavado tiene su concentración (%),  $C^*_i$ , flujo másico,  $F^*_i$ , temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T^*_i$ , las variables seleccionadas como óptimas de los conjuntos de lavados:  $CC$ ,  $TT$  y  $FF$ . El lavado tiene los parámetros: costo de componente químico (\$/kg),  $C_{\text{CHEM}}$ , costo de energía térmica (\$/J),  $C_{\text{THERM}}$ , costo de energía de bombeo (\$/J),  $C_{\text{PUMP}}$ , costo de agua consumida (\$/kg),  $C_{\text{WATER}}$ , y costo de penalización por no lograr una alta eficiencia en el lavado (\$),  $C_{\text{HYG}}$ . El tiempo del lavado seleccionando,  $t$ , será obtenido para minimizar el costo total,  $C_T$ .

La selección de un lavado a partir de un conjunto corresponde a la disyunción:

$$\bigvee_{i \in I} \begin{bmatrix} Y_i \\ CC = C^*_i \\ TT = T^*_i \\ FF = F^*_i \end{bmatrix} \quad (8)$$

Donde  $Y_i$  es una variable booleana (verdadero o falso). La programación matemática propone técnicas de disgregación para adecuar las disyunciones a sistemas de ecuaciones (Balas, 1998), como el caso de utilizar la técnica de cono convexo o "convex-hull". Esta técnica fue aplicada en síntesis de procesos (Lee & Grossmann, 2003) y reformula el problema al uso de una variable binaria,  $y_i \in \{0,1\}$ . La variable binaria garantiza la selección de un elemento de la disyunción a través de la sumatoria:  $\sum y_i = 1$ . En este caso, la disyunción (8) es reformulada a:

$$\left. \begin{aligned} C &= \sum_{i \in I} C_i y_i \\ T &= \sum_{i \in I} T_i y_i \\ F &= \sum_{i \in I} F_i y_i \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

La penalización por un mal lavado está relacionado con la eficiencia,  $\eta$ , la cual corresponde a:  $(m_0 - m)/m$ , donde  $m_0$  es la masa de ensuciamiento inicial. Gallot-Lavallee *et al.* (1984), propusieron un modelo cinético para aproximar la eficiencia, este modelo aproxima una solución a la ecuación (5) como:

$$\eta = 1 - k'_L \exp(-k'_L t) \quad (10)$$

Donde  $k'_L$  corresponde a la constante de velocidad de limpieza de la ecuación (6). Este parámetro está restringido a parámetros normalizados de -1 a 1, lo cual genera resultados no factibles en optimización. Por este motivo, la expresión (6) fue aproximada a un polinomio con los valores usados por Gallot-Lavallee *et al.* (1984):

$$k'_L = \exp(-8.067 + 0.051T + 0.52C + 0.779F / (Ap)) \quad (11)$$

donde  $A$  es el área transversal al flujo.

La penalización por un mal lavado tiene relación con el tiempo y la eficiencia de lavado. Esta penalización garantiza una eficiencia alta, de lo contrario la optimización tendería a los costos menores de energía y con eficiencia baja. El costo por esta penalización corresponde a:

$$C_H = C_{HYG} / (t\eta) \quad (12)$$

donde  $C_H$  es el costo total de lavado durante el tiempo total.

El costo del agente de limpieza empleado corresponde a la masa utilizada por el agente durante todo el tiempo de lavado, esto es:

$$C_C = t \cdot F \cdot C_{CHEM} C / 100 \quad (13)$$

donde  $C_C$  es el costo del químico total empleado durante el tiempo total de lavado.

El costo de energía involucra al costo por energía térmica y al costo por bombeo durante el tiempo de lavado. El costo de energía térmica es la energía necesaria de calentar la masa de fluido durante el tiempo de lavado, lo cual puede ser calculado con un balance de energía, considerando que el líquido ingresa a una temperatura de 25°C y  $C_p$  de 1-C/100. El costo de energía por bombeo puede aproximarse a la energía cinética. De esta manera:

$$C_E = C_{THERM} F t (T - 25)(1 - C / 100) + C_{PUMP} t (F / (Ap))^2 / 2 \quad (14)$$

donde  $C_E$  es el costo total de energía.

El costo de agua empleada corresponde a:

$$C_W = C_{WATER} t \cdot F \cdot (1 - C / 100) \quad (15)$$

donde  $C_W$  es el costo total de agua.

La función objetivo corresponde al costo total o la suma de todos los costos, de tal forma que el problema es:

$$\min(C_E + C_W + C_C + C_H). \quad (16)$$

## METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Las dos propuestas de análisis son resueltas bajo los métodos correspondientes a su naturaleza matemática. La primera es un conjunto de ecuaciones diferenciales, cuya solución fue posible con el método de Runge-Kutta de 4to. orden. La segunda es una programación matemática mixta entera no-lineal (MINLP por sus siglas en inglés), que se puede descomponer en sub-problemas (mixta entero, lineal y no-lineal), así esta formulación es resuelta bajo algoritmos definidos en la plataforma GAMS (DICOPT, CPLEX y CONOPT para cada sub-problema respectivamente). La plataforma de optimización fue descargada de la página de GAMS y ejecutada como software demostrativo.

El uso de software es válido para simular ensuciamiento-limpieza en equipos de transferencia de calor (Tamime, 2008); sin embargo, los paquetes computacionales de simulación para intercambiadores de calor, como HTRI y S&THex, no incluyen la formación de ensuciamiento y la aplicación de lavado. No obstante, el software para simular pasteurización, desarrollado por Welte-Chanes *et al.* (2004), fue usado para cuantificar la formación de ensuciamiento a través del modelo predictivo de Dannenberg (Maldonado-Centeno, 2008).

La predicción de ensuciamiento-limpieza no ha sido incluida, por lo cual en este trabajo el software FCYPDYNAMIC (Díaz-Ovalle *et al.*, 2017b) fue desarrollado para resolver las dos propuestas. El software tiene una estructura orientada a objetos realizada en C# de *Microsoft Visual Studio 2010*, lo cual hace al programa compatible con las plataformas de *Windows*. La primer estrategia es resuelta como: a) el usuario indica las características del sistema y las propiedades del alimento, b) la simulación sin limpieza es generada bajo la acción "Solve Fouling", c) la parametrización del modelo de equivalencia, como lo plantearon Molina-Pérez *et al.* (2015), es desarrollada por la acción "Fitting", d) la simulación de los ciclos de limpieza corresponde a la acción "Solve cleaning". Estas acciones están descritas en el diálogo principal del software. La segunda estrategia parte de la comunicación directa con la plataforma GAMS, esto es posible bajo la escritura del modelo de optimización de forma directa en GAMS y la instrucción de solución. Esta estrategia fue aplicada anteriormente para lenguaje C++ por Díaz-Ovalle *et al.* (2013) y Galván-Ángeles *et al.* (2015). La Figura 1 muestra el dialogo principal del paquete desarrollado en este trabajo.



Fig. 1: Software para la limpieza de equipos lácteos.

FCYPDYNAMIC permite al usuario definir las propiedades del alimento como valores constantes, variables con la temperatura o bajo los modelos de Choi y Okos (1986). Los sistemas predeterminados son intercambiadores de placas y doble tubo, pero el usuario puede personalizar el cálculo de los coeficientes de película. Los valores de flujo de entrada, inicialización de ensuciamiento y control numérico (tamaño del paso de integración y número de iteraciones) deben ser definidos por el usuario. Adicionalmente, el paquete calcula la equivalencia de espesor de ensuciamiento-cantidad de proteína desnaturalizada (Molina-Pérez *et al.*, 2015) con tres modelos (lineal, logarítmico y exponencial), donde el paquete selecciona el modelo con el valor mayor del parámetro de Pearson. Los ciclos de lavado son propuestos para diversas concentraciones, flujo y temperaturas, igualmente los costos de cada factor. Los resultados de la simulación ensuciamiento-limpieza son mostrados en una gráfica.

## CASO DE ESTUDIO

Este caso de estudio describe un sistema convencional de un intercambiador de calor de placas para el procesamiento de leche. El flujo de alimentación de leche fueron 8000 kg/h a 22°C y el medio de calefacción mantuvo la pared a 96°C. El intercambiador contó con 45 placas de 35 cm de ancho por 1.2 m de largo y 2 mm de espesor. Las propiedades de la leche fueron determinadas por la correlación propuesta por Choi y Okos (1986), con la composición: proteína 3.5%, grasa 3.5%, carbohidratos 4.9%, cenizas 0.7%, (sólidos totales 12.6%) y agua 87.4%. La viscosidad siguió el modelo (kg/m·h):  $10.955e^{-0.021T}$ , con T en °C. El tiempo de producción entre lavados fue de 8 horas. Los datos de limpieza se muestran en la Tabla 1, donde todos los casos contaron con el mismo tiempo de lavado y enjuague (6 minutos).

Tabla 1: Datos del sistema de lavado.

| Lavado                  | CIP1  | CIP2  | CIP3  | CIP4  | CIP5  | CIP6  | CIP7  | CIP8  |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Agente limpieza (kg/lt) | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.003 | 0.002 | 0.003 |
| Flujo másico (kg/h)     | 800   | 800   | 1000  | 1000  | 800   | 800   | 1000  | 1000  |
| Temperatura (°C)        | 57    | 57    | 57    | 57    | 87    | 87    | 87    | 87    |

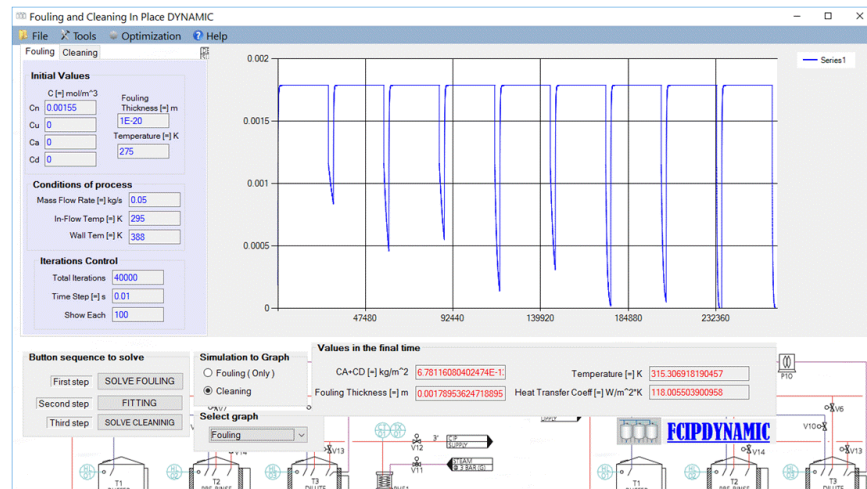


Fig. 2: Resultado de los ciclos de lavado del caso de estudio.

La solución de este caso provino del paquete FCIPDYNAMIC. Primero, el ensuciamiento fue ajustado al modelo de equivalencia:  $-\ln(C_f) = 2.2614\ln(-\ln(\delta)) - 0.0114\ln(\delta) - 0.4324$ . Segundo, los ciclos de lavado fueron aplicados al sistema. Esta simulación tomó 15 min en una computadora con procesador Intel® i7-2.6 GHz con 8 GB de RAM. Los resultados mostraron una reducción del ensuciamiento para los distintos lavados. La Figura 2 muestra los resultados por FCIPDYNAMIC y la Figura 3 el comportamiento dinámico de los lavados. El CIP8 redujo en casi en su totalidad el espesor de ensuciamiento, este lavado contó con los valores mayores de los parámetros de limpieza. La Tabla 2 indica los resultados obtenidos para los 8 lavados.

Tabla 2: Resultados del sistema de lavado.

| Lavado                                            | CIP1   | CIP2   | CIP3   | CIP4  | CIP5   | CIP6   | CIP7   | CIP8  |
|---------------------------------------------------|--------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Espesor de ensuciamiento (mm).                    | 0.79   | 0.38   | 0.54   | 0.13  | 0.23   | 0.03   | 0.04   | 0.01  |
| Concentración de proteína desnaturalizada (g/lt). | 0.0196 | 0.0158 | 0.0172 | 0.012 | 0.0139 | 0.0086 | 0.0092 | 0.007 |
| Reducción de espesor (%).                         | 55.6   | 62.7   | 70     | 92.7  | 87.1   | 98.3   | 97.8   | 99.5  |
| Reducción de proteína (%).                        | 23.2   | 25.3   | 31.4   | 52.9  | 45.7   | 66     | 63.9   | 72.6  |

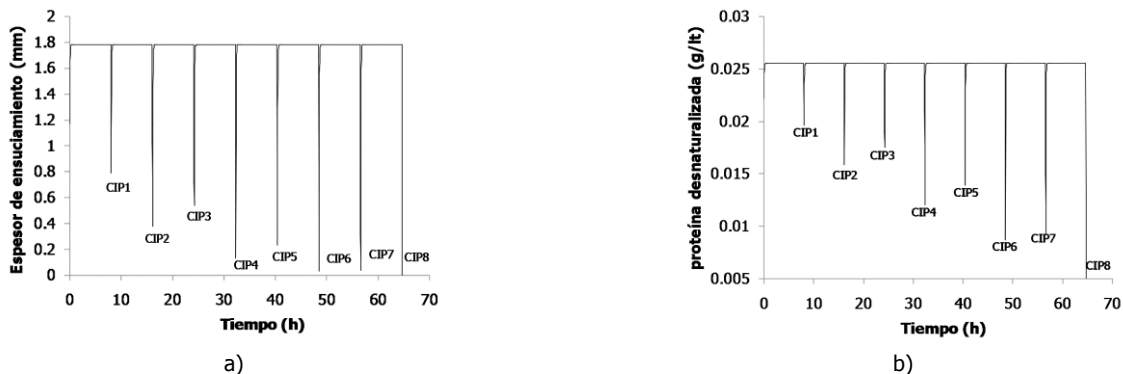


Fig. 3: Comportamiento dinámico de los lavados: a) espesor de ensuciamiento y b) concentración de proteína desnaturalizada.

La optimización de los sistemas de lavado consideró los siguientes costos: a) agente químico, 1 \$/ kg, b) energía térmica, 0.1\$/J, c) energía eléctrica (bombeo), 0.5 /J, d) agua de lavado, 1\$/kg y e) penalización higiénica, 700\$. Los valores propuestos se aproximan a los obtenidos de una industria láctea de la región (Celaya, Guanajuato, México). El modelo de optimización planteó 11 ecuaciones con 19 variables. La solución del problema involucró a los resolvers CONOPT y DICOPT para la parte no-lineal y mixta entera respectivamente y la versión de GAMS fue demo. Los resultados indicaron que el CIP5 fue el seleccionado, el tiempo de lavado óptimo y el costo total fueron 0.125 h y 11188.58 \$ respectivamente. El desglose de costos fue: costo de penalización 5596.58 \$ y costo operativo 5592 \$ (energía 5494.88 \$, agente químico 0.2 \$ y agua 96.92 \$).

Los valores obtenidos de las variables de salida (espesor de ensuciamiento y concentración de proteína desnaturalizada) fueron tratados estadísticamente bajo un ANOVA multifactorial sin réplicas y colapsado con nivel de significancia del 95%. Esta estrategia permite desprestigiar los factores de entrada (temperatura, flujo másico y concentración del agente químico) sin efecto sobre las variables de salida, con el fin de realizar una ANOVA con los factores restantes. La temperatura tuvo el mayor efecto sobre las dos variables de salida, y fue seguida de la concentración del agente químico. El resultado indicó que no hay efecto de las interacciones dobles y triples de la combinación de los factores de entrada. Por otra parte, el CIP5 fue considerado el óptimo y estadísticamente el CIP4 y CIP5 no fueron significativamente diferentes por el efecto del factor temperatura.

## CONCLUSIONES

La estimación de condiciones óptimas en el lavado de equipos ha sido un problema abordado con anterioridad. Este trabajo ha presentado una aportación que involucra la predicción dinámica de la reducción de ensuciamiento y la obtención de condiciones óptimas bajo MINLP. En este caso, el software FCIPDYNAMIC fue desarrollado y utilizado en la solución del caso de estudio. Los resultados indicaron que el software propuesto es una herramienta útil en la solución de este problema. Los resultados del caso de estudio indicaron que la temperatura es el factor de mayor significancia en el lavado y que el lavado óptimo no necesariamente debe ser con valores altos de temperatura, flujo y agente químico.

## NOMENCLATURA

- $A_c$  área de transferencia de calor.
- $C$  concentración molar de la proteína  $\beta$ -lg en sus distintos estados.
- $C^*$  composición másica del agente de limpieza de un lavado candidato.
- $C_p$  capacidad calorífica del alimento.
- $E$  energía de activación de la formación de ensuciamiento.
- $E_a$  energía de activación para la formación de los distintos estados de  $\beta$ -lg.

|              |                                                                                                              |
|--------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $F$          | flujo másico.                                                                                                |
| $F^*$        | flujo másico de un lavado candidato.                                                                         |
| $\Delta H_r$ | entalpía de reacción molar de la proteína nativa.                                                            |
| $h_i$        | coeficiente de película para el fluido interno.                                                              |
| $h_o$        | coeficiente de película para el medio de calefacción.                                                        |
| $I$          | conjunto de lavados.                                                                                         |
| $k$          | parámetro de velocidad de reacción para la formación de los distintos estados de $\beta$ -lg.                |
| $k_o$        | parámetro pre-exponencial del modelo de Arrhenius para la formación de los distintos estados de $\beta$ -lg. |
| $k_L$        | constante de velocidad de limpieza.                                                                          |
| $m$          | masa de ensuciamiento por unidad de área.                                                                    |
| $R$          | constante universal de los gases.                                                                            |
| $Re$         | número de Reynolds.                                                                                          |
| $t$          | tiempo.                                                                                                      |
| $T$          | temperatura de salida.                                                                                       |
| $T^*$        | temperatura de un lavado candidato.                                                                          |
| $T_{prom}$   | temperatura promedio entre $T$ y $T_o$ .                                                                     |
| $T_o$        | temperatura de entrada.                                                                                      |
| $T_w$        | temperatura de la pared.                                                                                     |
| $U_c$        | coeficiente global de transferencia de calor corregido con ensuciamiento.                                    |
| $V$          | volumen del alimento dentro del equipo.                                                                      |
| $V_f$        | valor del factor de ensuciamiento $j$ .                                                                      |
| $V_m$        | valor máximo del factor de ensuciamiento $j$ .                                                               |
| $V_p$        | valor promedio del factor de ensuciamiento $j$ .                                                             |
| $X$          | valor normalizado de los factores de limpieza.                                                               |
| $X_p$        | composición másica de la proteína $\beta$ -lg en el flujo de entrada.                                        |

#### Letras griegas

|          |                                          |
|----------|------------------------------------------|
| $\delta$ | espesor de ensuciamiento.                |
| $K_d$    | parámetro de velocidad de ensuciamiento. |
| $K_e$    | conductividad térmica del ensuciamiento. |
| $K_r$    | parámetro de velocidad de ensuciamiento. |
| $\rho$   | densidad del alimento.                   |

#### Subíndices

|     |                                                                           |
|-----|---------------------------------------------------------------------------|
| $a$ | estado de $\beta$ -lg como agregada.                                      |
| $d$ | estado de $\beta$ -lg como depositada.                                    |
| $F$ | índice del parámetro de limpieza flujo másico.                            |
| $i$ | índice de los lavados candidatos.                                         |
| $j$ | índice de los parámetros de limpieza.                                     |
| $M$ | índice del parámetro de limpieza composición peso del agente de limpieza. |
| $n$ | estado de $\beta$ -lg como nativa.                                        |
| $T$ | índice del parámetro de limpieza temperatura.                             |
| $u$ | estado de $\beta$ -lg como desnaturalizada.                               |

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo brindado por el CONACyT a través del SNI.

## REFERENCIAS

1. Asteriadou, K., Hasting, T., Bird, M. & Melrose, J. (2007). Predicting cleaning of equipment using computational fluid dynamics. *Journal of Food Process Engineering*, 30 (1), 88-105.
2. Balas, E. (1998). Disjunctive Programming: Properties of the convex hull of feasible points. *Discrete Applied Mathematics*, 89, 3-44.
3. Belmar-Beiny, M.T., Gotham, S.M., Paterson, W.R., Fryer, P.J. & Pritchard, A.M. (1993). The effect of Reynolds number and fluid temperature in whey protein fouling. *Journal of Food Engineering*, 19 (2), 119-139.
4. Bird, M.R. & Bartlett, M. (1995). CIP optimisation for the food industry: relationships between detergent concentration, temperature and cleaning time. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, 73, 63-70.
5. Bird, M.R. & Espig, S.W.P. (1994). Cost optimisation of dairy cleaning in place (CIP) cycles. *Transaction of the IChemE: Chemical Engineerin Research and Design*, 72, 17-20.
6. Bird, M.R. & Fryer, P.J. (1991). An experimentla study of the cleaning of surfaces fouled by whey proteins. *Transactions of the Institute of Chemical Engineers*, 69, 13-21.
7. Bird, M.R. & Fryer, P.J. (1992). An analytical model for the cleaning of food process plant. *IChemE Symposium Ser.*, 126, 325.
8. Burdett, M. (1974). The effect of phosphates in lowering the amount of deposit formation during the heat treatment of milk. *Journal of Dairy Research*, 41, 123-129.
9. Burgos, I., Dassie, S.A., Villarreal, M.A. & Fidelio, G.D. (2012). Thermodynamic and structural analysis of homodimeric proteins: Model of  $\beta$ -lactoglobulin. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA) - Proteins and Proteomics*, 1824 (2), 383-391.
10. Burton, H. (1966). A comparison between a hot-wire laboratory apparatus and a plate heat exchanger for determining the sensitivity of milk to deposit formation. *Journal of Dairy Research*, 33 (3), 317-324.
11. Choi, C.Y., & Okos, M.R. (1986). "Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods." En: *Food Engineering and Process Aplicacions: Transport Phenomena*, Maguer, M. L. and Jelen, P., eds., Elsevier Applied Science, London.
12. Christian, G.K., Changani, S.D. & Fryer, P.J. (2002). The Effect of Adding Minerals on Fouling from Whey Protein Concentrate: Development of a Model Fouling Fluid for a Plate Heat Exchanger. *Food and Bioproducts Processing*, 80 (4), 231-239.
13. de Jong, P. (1997). Impact and control of fouling in milk processing. *Trends in Food Science & Technology*, 8 (12), 401-405.
14. de Jong, P., Bouman, S. & van der Linder, H.J. (1992). Fouling of heat transfer equipment in relation to the denaturation of B-lactoglobulin. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 45, 3-8.
15. de Jong, P., Waalewijn, R. & van Der Linder, H.J.L.J. (1993). Validity of a kinetic fouling model for heat-treatment of whole milk. *Lait*, 73, 293-302.

16. Delplace, F. & Leuliet, J.C. (1995). Modelling fouling of a plate heat exchanger with different flow arrangements by whey protein solutions. *Food and Bioproducts Processing*, 73, 112-120.
17. Díaz-Ovalle, C., Vázquez-Román, R., de Lira-Flores, J., & Mannan, M.S. (2013). A model to optimize facility layouts with toxic releases and mitigation systems. *Computers & Chemical Engineering*, 56, 218-227.
18. Díaz-Ovalle, C.O., González-Alatorre, G. & Alvarado, J.F.J. (2017a). Analysis of the dynamic response of falling-film evaporators considering fouling. *Food and Bioproducts Processing*, 104, 124-136.
19. Díaz-Ovalle, C.O., Guzmán-Zazueta, A. & Tierrablanca-Peña, G. (2017b). México Registro No. 03-2017-031313172900-01. "SEP-TcNM".
20. Dresch, M., Daufin, G. & Chaufer, B. (2001). Integrated membrane regeneration process for dairy cleaning-in-place. *Separation and Purification Technology*, 22-23, 181-191.
21. Dürr, H. & Graßhoff, A. (1999). Milk Heat Exchanger Cleaning: Modelling of Deposit Removal. *Food and Bioproducts Processing*, 77(2), 114-118.
22. Fickak, A., Al-Raisi, A. & Chen, X.D. (2011). Effect of whey protein concentration on the fouling and cleaning of a heat transfer surface. *Journal of Food Engineering*, 104, 323-331.
23. Fryer, P.J. (1989). The uses of fouling models in the design of food process plant. *International Journal of Dairy Technology*, 42(1), 23-29.
24. Fryer, P.J. & Slatter, N.K.H. (1985). A direct simulation procedure for chemical reaction fouling in heat exchangers. *Chemical Engineering Journal*, 31, 97-107.
25. Gallot-Lavallee, T., Lalande, M. & Corrieu, G. (1984). Cleaning kinetics modeling of holding tubes fouled during milk pasteurization. *Journal of Food Process Engineering*, 7(2), 123-142.
26. Galván-Ángeles, E., Díaz-Ovalle, C.O., González-Alatorre, G., Castrejón-González, E.O., & Vázquez-Román, R. (2015). Effect of thermo-compression on the design and performance of falling-film multi-effect evaporator. *Food and Bioproducts Processing*, 96, 65-77.
27. Georgiadis, M.C. & Macchietto, S. (2000). Dynamic modelling and simulation of plate heat exchangers under milk fouling. *Chemical Engineering Science*, 55, 1605-1619.
28. Georgiadis, M.C., Papageorgiou, L.G. & Macchietto, S. (1999). Optimal cyclic cleaning scheduling in heat exchanger networks under fouling. *Computers & Chemical Engineering*, 23, Supplement(0), S203-S206.
29. Georgiadis, M.C. Rotstein, G.E. & Macchietto, S. (1998a). Modeling and simulation of shell and tube heat exchangers under milk fouling. *AIChE Journal*, 44, 959-971.
30. Georgiadis, M.C., Rotstein, G.E. & Macchietto, S. (1998b). Modelling and simulation of complex plate heat exchanger arrangements under milk fouling. *Computers & Chemical Engineering*, 22, Supplement 1 (0), S331-S338.
31. Georgiadis, M.C., Rotstein, G.E. & Macchietto, S. (1998c). Optimal design and operation of heat exchangers under milk fouling. *AIChE Journal*, 44(9), 2099-2111.

32. Gillham, C.R., Fryer, P.J., Hasting, A.P.M. & Wilson, D.I. (1999). Cleaning-in-Place of Whey Protein Fouling Deposits: Mechanisms Controlling Cleaning. *Food and Bioproducts Processing*, 77(2), 127-136.
33. Gómez Orozco, L. & Capera Urrego, A.I. (2016). Modelos de ensuciamiento en intercambiadores de calor tubulares en sistemas indirectos en procesos UHT en la industria láctea. *Publicación e investigación*, 10, 95-114.
34. Hankinson, D.J. & Carver, C.E. (1968). Fluid dynamic relationships involved in circulation cleaning. *Journal of Dairy Science*, 51, 1761-1767.
35. Hooper, R.J., Paterson, W.R. & Wilson, D.I. (2006). Comparison of Whey Protein Model Foulants for Studying Cleaning of Milk Fouling Deposits. *Food and Bioproducts Processing*, 84(4), 329-337.
36. Ishiyama, E.M., Paterson, W.R. & Ian Wilson, D. (2011). Optimum cleaning cycles for heat transfer equipment undergoing fouling and ageing. *Chemical Engineering Science*, 66(4), 604-612.
37. Jensen, B.B.B. & Friis, A. (2005). Predicting the cleanability of mix-proof valves by use of wall shear stress. *Journal of Food Process Engineering*, 28(2), 89-106.
38. Jeurnink, T.J.M. & Brinkman, D.W. (1994). The cleaning of heat exchangers and evaporators after processing milk or whey. *International Dairy Journal*, 4, 347-368.
39. Jimenez, M., Delaplace, G., Nuns, N., Bellayer, S., Deresmes, D., Ronse, G., *et al.* (2013). Toward the understanding of the interfacial dairy fouling deposition and growth mechanisms at a stainless steel surface: A multiscale approach. *Journal of Colloid and Interface Science*, 404(0), 192-200.
40. Jun, S. & Puri, V.M. (2005). Fouling models for heat exchangers in dairy processing: a review. *Journal of Food Process Engineering*, 28(1), 1-34.
41. Jun, S. & Puri, V.M. (2006). A 2D dynamic model for fouling performance of plate heat exchangers. *Journal of Food Engineering*, 75(3), 364-374.
42. Jurado Alameda, E., Bravo Rodriguez, V., Bailón Moreno, R., Núñez Olea, J. & Altmajer, D. (2009). Fatty soils removal from hard surfaces in a clean-in-place system. *Journal of Food Process Engineering*, 34(4), 1053-1070.
43. Lalande, M., Tissier, J. P. & Corrieu, G. (1984). Fouling of a plate heat exchanger used in ultra-high-temperature sterilization of milk. *Journal of Dairy Research*, 51, 557-568.
44. Lee, S. & Grossmann, I. E. (2003). Global optimization of nonlinear generalized disjunctive programming with bilinear equality constraints: applications to process networks *Computers & Chemical Engineering*, 27(11), 1557-1575.
45. Lelièvre, C., Antonini, G., Faille, C. & Bénézech, T. (2002). Cleaning-in-Place: Modelling of Cleaning Kinetics of Pipes Soiled by Bacillus Spores Assuming a Process Combining Removal and Deposition. *Food and Bioproducts Processing*, 80(4), 305-311.
46. Liu, W., Fryer, P.J., Zhang, Z., Zhao, Q. & Liu, Y. (2006). Identification of cohesive and adhesive effects in the cleaning of food fouling deposits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 7(4), 263-269.

47. Ma, R.S.T. & Epstein, N. (1981). Optimum Cycles For Falling Rate Processes. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, 59 (5), 631-633.
48. Maldonado-Centeno, J.C. (2008). *Aplicación de modelo matemático predictivo para la determinación de incrustaciones en pasteurizadores a placas en la industria láctea*. Tesis de Grado. Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/12230/2/MALDONADO%20CENTENO%20JUAN%20CARLOS.pdf>. Consultada: 08/Marzo/2017.
49. Markowski, M. & Urbaniec, K. (2005). Optimal cleaning schedule for heat exchangers in a heat exchanger network. *Applied Thermal Engineering*, 25 (7), 1019-1032.
50. Memisi, N., Moracanin, S.V., Milijasevic, M., Babic, J. & Djukic, D. (2015). CIP Cleaning Processes in the Dairy Industry. *Procedia Food Science*, 5, 184-186.
51. Molina-Pérez, H., Cano-Gómez, J.J., Díaz-Ovalle, C. & Castillo-Borja, F. (2015). Equivalencia del espesor de ensuciamiento con b-lg desnaturalizada en el calentamiento de leche [Equivalency of fouling thickness with denatured b-lg in heating of milk]. *Avances en Ciencias e Ingeniería*, 6 (1), 49-62.
52. Niamsuwan, S., Kittisupakorn, P. & Mujtaba, I.M. (2011). Minimization of water and chemical usage in the cleaning in place process of a milk pasteurization plant. *Songklanakarin Journal of Science Technology*, 33 (4), 431-440.
53. Palmowski, L., Wilson, H. & Watson, B. (2005). "Clean in Place-A review of current technology and its use in the food and beverage industry". Deakin University.
54. Paramalingam, S., Winchester, J. & Marsh, C. (2000). On the fouling of falling film evaporators due to film break-up. *Food and Bioproducts Processing*, 78 (2), 79-84.
55. Paterson, W.R. & Fryer, P.J. (1988). A reaction engineering approach to the analysis of fouling. *Chemical Engineering Science*, 43 (7), 1714-1717.
56. Petit, J., Six, T., Moreau, A., Ronse, G. & Delaplace, G. (2013).  $\beta$ -lactoglobulin denaturation, aggregation, and fouling in a plate heat exchanger: Pilot-scale experiments and dimensional analysis. *Chemical Engineering Science*, 101 (0), 432-450.
57. Piepiórka-Stepuk, J., Diakun, J. & Mierzejewska, S. (2016). Poly-optimization of cleaning conditions for pipe systems and plate heat exchangers contaminated with hot milk using the cleaning in place method. *Journal of Cleaner Production*, 112 (Part 1), 946-952.
58. Pogiatis, T.A., Wilson, D.I. & Vassiliadis, V.S. (2012). Scheduling the cleaning actions for a fouled heat exchanger subject to ageing: MINLP formulation. *Computers & Chemical Engineering*, 39 (0), 179-185.
59. Riverol, C. & Napolitano, V. (2005). Estimation of fouling in a plate heat exchanger through the application of neural networks. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 80 (5), 594-600.
60. Robbins, P.T., Elliott, B.L., Fryer, P.J., Belmar, M.T. & Hasting, A.P.M. (1999). A Comparison of Milk and Whey Fouling in a Pilot Scale Plate Heat Exchanger: Implications for Modelling and Mechanistic Studies. *Food and Bioproducts Processing*, 77 (2), 97-106.

61. Rodriguez, C. & Smith, R. (2007). Optimization of Operating Conditions for Mitigating Fouling in Heat Exchanger Networks. *Chemical Engineering Research and Design*, 85 (6), 839-851.
62. Schöler, M., Föste, H., Helbig, M., Gottwald, A., Friedrichs, J., Werner, C., *et al.* (2012). Local analysis of cleaning mechanisms in CIP processes. *Food and Bioproducts Processing*, 90 (4), 858-866.
63. Smaïli, F., Angadi, D.K., Hatch, C.M., Herbert, O., Vassiliadis, V.S.& Wilson, D.I. (1999). Optimization of Scheduling of Cleaning in Heat Exchanger Networks Subject to Fouling: Sugar Industry Case Study. *Food and Bioproducts Processing*, 77 (2), 159-164.
64. Stanga, M. (2010). *CIP (Cleaning in Place)*. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA.
65. Timperley, D.A., & Smeulders, C.N.M. (1988). Cleaning of dairy HTST plate heat exchangers, comparison of single and two-stage procedures. *Journal of the Society of Dairy Technology*, 41, 4-7.
66. Tissier, J.-P., Corrieu, G.& Lalande, M. (1982). General and kinetic aspects of pre-rinse and cleaning of a milk storage tank. *Journal of Food Process Engineering*, 6 (1), 37-53.
67. van Asselt, A.J., van Houwelingen, G. & te Giffel, M.C. (2002). Monitoring system for improving cleaning efficiency of cleanin-in-place processes in dairy environments. *Food and Bioproducts Processing*, 80, 276-280.
68. Weltri-Chanes, J., Vergara-Balderas, F., Ruíz-Medina, A.L., Laserna-Figueroa, F. & Ramírez-Juárez, J. L. (2004). *Simulación y optimización de procesos de pasteurización en intercambiadores de placas: jugos y bebidas de frutas*. IX Taller de Herramientas de Cálculo en Ingeniería de Alimentos. Valencia, España, J1-J18.

