

APLICACIÓN DE LA MDP (METODOLOGÍA DE DISEÑO DE PROYECTOS-UPC): MÉTODO PARA OPTIMIZAR PARÁMETROS REOLÓGICOS EN FLUIDOS MANEJADOS A BAJAS TEMPERATURAS.

Freddy Belén

Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología.

Agueda García-Carrillo

Departamento de Proyectos de Ingeniería.

Mercè Raventós

Departamento de Ingeniería Agroalimentaria y Biotecnología.

Universitat Politècnica de Catalunya

Abstract:

The rheological behavior of fluid food is very important for design of process and for the equipment selection, especially when freeze concentration technology is used. Freeze concentration minimizes the loss of organoleptic properties and prevents undesirable chemical and biochemical changes. One of its applications in the food industry is to concentrate fruit juices and recover substances in wastewater treatment. Designing a project with this technology leads to the designer to have a desired system to a real system offered or operating unit, capable of providing an objective (product, service or information) that resolves a conflict. This work aims to systematize a method of optimizing food rheological fluids at close to freezing temperatures, at different concentrations, using the PDM. Tests were made with pineapple juice of 12.3, 18.4, 36.2, 49.6 and 54.0 °Brix in the temperature range of -10 ° C to 4 ° C. The data analysis was done with the Software Job Manager RheoWin © 2.91. The result is a tool, which describes the rheological behavior of fluid depending on the temperature and concentration and this provide information to optimize process design and selection of equipment for freeze concentration of liquid food.

Keywords: *Freeze concentration; Management; Viscosity; Juices; Optimization*

Resumen:

El comportamiento reológico de los fluidos alimentarios es primordial en el área de diseño de procesos y selección de equipos, en particular cuando se utiliza la tecnología de criocentración, que minimiza las pérdidas de propiedades organolépticas y evita cambios químicos y bioquímicos indeseables. Una de sus aplicaciones en la industria alimentaria es concentrar zumos de fruta y recuperar sustancias en el tratamiento de efluentes. Diseñar proyectos con esta tecnología, lleva al proyectista a pasar un sistema deseado a un sistema real ofrecido o unidad operativa, capaz de proporcionar un objetivo (producto, servicio u información) que resuelve un conflicto. Este trabajo persigue sistematizar un método de *optimización de parámetros reológicos en fluidos alimentarios manejados a temperaturas cercanas a la congelación*, a diferentes concentraciones, aplicando la MDP. Se realizaron ensayos con zumos de piña a 12,3; 18,4; 36,2; 49,6 y 54,0° Brix, en el intervalo de temperatura

de -10°C a 4°C. El análisis de los datos se hizo con el Software RheoWin Job Manager® 2,91; y como resultado se obtiene una herramienta, que describe el comportamiento reológico del fluido en función de la temperatura y concentración, que ofrece información para optimizar el diseño de procesos y selección de equipos para crioconcentrar alimentos líquidos.

Palabras clave: Crioconcentración; Manejo; Viscosidad; Zumos; Optimización

1. Introducción

En la actualidad, el desplazamiento óptimo de fluidos de sustancias estructuralmente complejas a través de tubos, membranas o geometrías de interés tecnológico no está optimizado. La reología es el marco disciplinario que intenta dar respuesta a esta dificultad, mediante el desarrollo de estudios, al someter una muestra de material a deformación y condiciones de flujo. Obteniendo así información cualitativa y cuantitativa que permite caracterizar la sustancia y definir parámetros reológicos como viscosidad, tixotropía, consistencia, propiedades elásticas, etc. Esto permite, entre otras cosas, diseñar y seleccionar equipos de procesamiento industrial para el uso de tecnologías existentes o nuevas. La complejidad de la estructura en los fluidos alimentarios, en combinación con la tecnología que desea usarse para su procesado y la optimización de su manejo, amerita estudios preliminares que soporten la etapa de diseño y selección de los equipos. Esta es una parte importante en la demostración de la factibilidad técnica de cualquier proceso que involucre el uso de una tecnología.

La viscosidad de los fluidos alimentarios, juega un papel importante, ya que es uno de los factores que provocan el desarrollo de pérdidas en el manejo de fluidos tanto en canales abiertos y cerrados; y en flujos sobre o alrededor de superficies como ocurre en el proceso de crioconcentración. Esta propiedad es medida mediante el factor de proporcionalidad que existe entre la relación esfuerzo cortante y la tasa de deformación angular para un flujo de un fluido.

En el uso de la tecnología de crioconcentración, un aspecto importante es conocer el comportamiento a bajas temperaturas de los fluidos que se desean concentrar. Esta información será de gran importancia para su desarrollo industrial y para el manejo de los productos obtenidos. En la búsqueda de mayores ventajas competitivas, menor consumo energético y coste ambiental; la crioconcentración presenta una gran perspectiva para la industria alimentaria. Las ventajas que ofrece esta tecnología en la obtención de productos poco procesados, con gran valor nutricional, mejores propiedades organolépticas y la recuperación de sustancias de interés provenientes de efluentes la hacen interesante para su estudio y desarrollo en aplicaciones industriales. Este trabajo persigue sistematizar un método de optimización de parámetros reológicos en fluidos alimentarios manejados a temperaturas cercanas a la congelación (evitando la formación de cristales de hielo) a diferentes concentraciones, usando para ello el enfoque sistemático de desarrollo de proyectos MDP-UPC (García-Carrillo, A. et al., 2007 y Gracia, S. et al., 2009).

Descripción de la MDP.

La MDP se desarrolla con un enfoque que sistematiza la determinación de las entradas y salidas asociadas con el sistema solución y las interrelaciones de los sistemas involucrados siguiendo las etapas y objetivos mostrados en la Tabla 1. Esto lleva al proyectista a desarrollar un proceso creativo que pasa del análisis del sistema a proyectar al sistema proyectado. Los enfoques utilizados para el desarrollo de la

MDP se encuentran sustentados en trabajos realizados en los ámbitos de: el proceso de aprendizaje, la conducta del individuo, el manejo de la información y el aprendizaje basado en el diseño de proyectos. Actualmente parece más apropiado desarrollar sistemas de evaluación orientados hacia procesos. De este modo se pueden introducir mejoras constantes en el proceso de aprendizaje, constituyendo uno de los motivos por los que el concepto evaluación formativa o continua ha ido ganando terreno hasta convertirse en el centro del proceso de evaluación, más cercano a los enfoques constructivistas (Gracia, S. et al., 2009).

El desarrollo de proyectos basado en el aprendizaje es un modelo en donde se planean, implementan y evalúan proyectos. Es una aplicación en el mundo real donde

Tabla 1: Etapas de la MDP y herramientas instruccionales usadas durante su desarrollo

Etapas	Objetivos que persigue	Herramientas instruccionales ^(a)
I. Análisis del problema	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción del problema y definición de límites: (Uso de herramientas de análisis de sistemas, detección y análisis de problemas, etc.). • Descripción de la situación actual: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Identificación de conflictos. ✓ Aproximación a situación sin conflictos (posible situación con contricciones y posibles tecnologías a usar). • Análisis de las personas y las cosas que se verán afectadas por el proyecto: <ul style="list-style-type: none"> • Descripción grafica con enfoque de sistema de la posible solución indicando entradas y salidas, sub sistemas involucrados y afectados señalando posibles usuarios satisfacciones o molestias. • Descripción de la situación propuestas (ideal): <ul style="list-style-type: none"> ✓ Establecimiento de los requisitos del servicio en función de la satisfacción de los usuarios. ✓ Identificar constricciones tecnológicas para cumplir con los requisitos ✓ Identificar constricciones del entorno para cumplir con los requisitos ✓ Selección de requisitos a incluir o excluir de la solución técnica del problema. 	1, 2 y 3
II. Preparación del sistema solución/modelización.	<ul style="list-style-type: none"> • Descripción en forma detallada de las transformaciones y diagramas de funcionamiento del sistema propuesto (Uso de diferentes herramientas de Ingeniería industrial diagramas, figuras, formatos, etc.) • Descripción del puesto de trabajo, actividades, tareas, operaciones, equipos a usar, calificación de los operadores, condiciones de seguridad-requisitos. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Introducción de posibles ajustes al modelo del sistema propuesto. • Medir e Identificar la calidad y seguridad de las operaciones del sistema propuesto: Identificar y medir riesgos inherentes del sistema propuesto y determinar la seguridad a conseguir con la solución: <ul style="list-style-type: none"> ✓ Uso de árbol de falla u otras herramientas para medir confiabilidad de sistemas. • Establecimiento de las funciones y prestaciones definitivas del sistema propuesto discriminando las especificaciones y elementos del sistema humano y el sistema máquina. <ul style="list-style-type: none"> ✓ Descripción completa del sistema propuesto discriminando: Objetivos que se persiguen, Requisitos de diseño técnico, ambiental y económico del sistema y Ventajas y desventajas. 	4, 5, 6, 7 y 8
III. Presentación del sistema propuesto	<ul style="list-style-type: none"> • Preparación y exposición del sistema propuesto mediante formatos visuales explicando: características que justifican su factibilidad y operativa, técnica, económica-ambiental y sostenible como solución conveniente del problema analizado. 	9

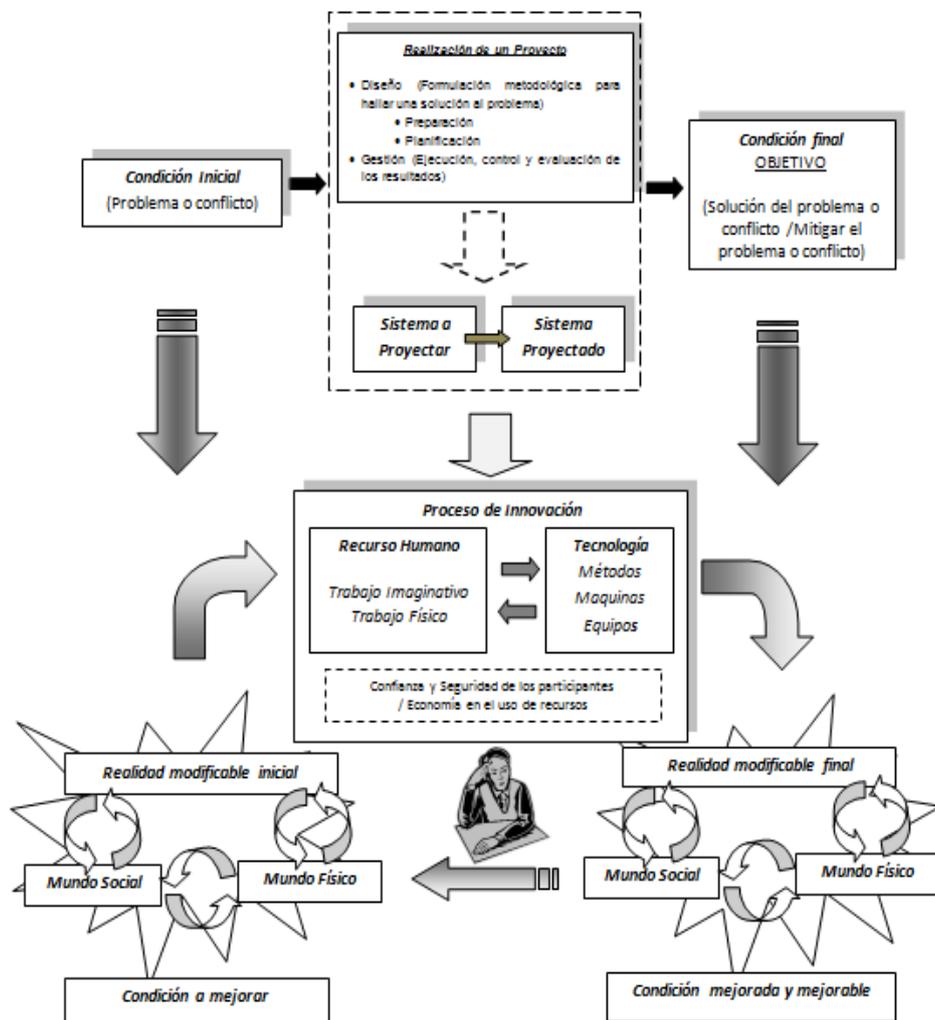
Nota: (a) García-Carrillo, A. et al., 2007 y Gracia, S. et al., 2009.

se desarrollan actividades interdisciplinarias de largo plazo. Sustentadas en el resultado de construcciones mentales y donde los seres humanos aprenden construyendo nuevas ideas o conceptos en base a conocimientos actuales y previos - *Know How*- (Jonassen et al., 1999; Blank, W. 1997; Harwell, S. 1997 y Dickinson, K.P. et al., 1998).

La MDP también se sirve de la propiedad que exhiben los sistemas para representar un objeto o situación (modelos conceptuales o lógicos) y de su dependencia tanto de la organización entre las partes como del orden entre ellas. Otro elemento que se conjuga en el diseño de proyectos es la necesidad que tienen los individuos de pensar de forma crítica e independiente para estimular el pensamiento original como parte del aprendizaje global mediante el estudio interdisciplinario de experiencias que facilitan la comprensión, la reflexión y las respuestas creativas (Karlín, M. & Viani, N. 2001).

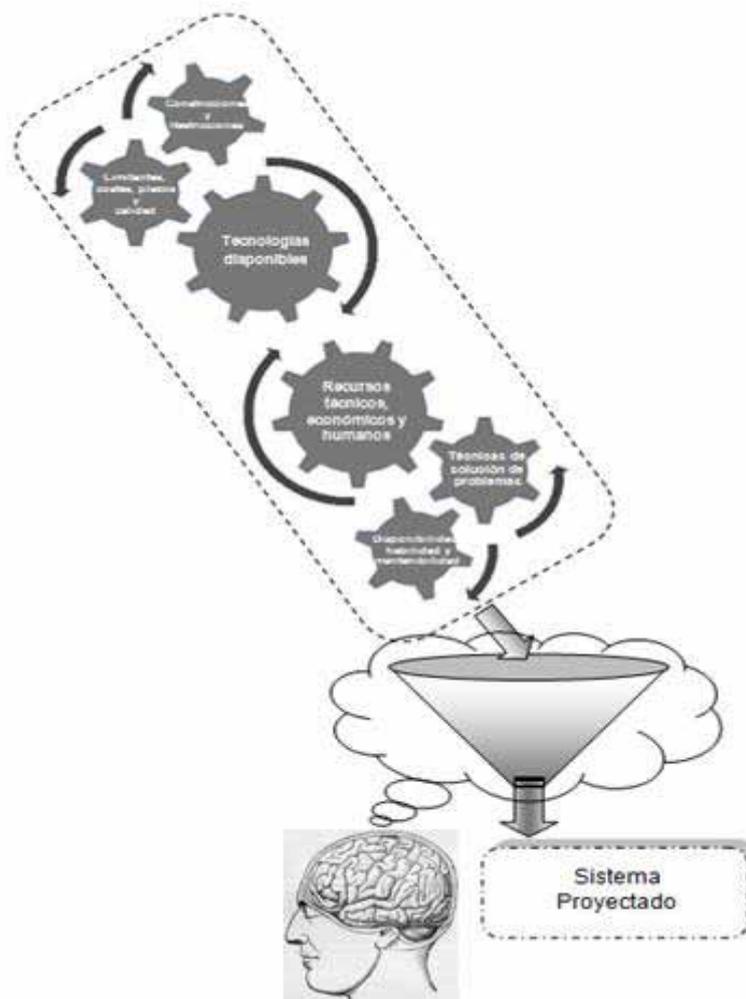
Domínguez, C. et al. (1994) y French, H.T. et al. (2007), concluyen en sus investigaciones que la continua extracción de información del entorno, la integración de esta información con el *Know How* para hacerse una idea mediante un modelo mental coherente y hacer de este una herramienta para la comprensión de las percepciones conlleva a tomar mejores decisiones para anticiparse así a las necesidades futuras. La Figura 1, muestra el esquema de la conceptualización del diseño de proyectos usado por la MDP. Aquí se considera que las condiciones inicial (Problema o conflicto) y final (objetivo/solución) son realidades modificables que se encuentran afectadas por las constantes interacciones recíprocas que ocurren entre ellas y el mundo físico y social.

Figura 1: Conceptualización del diseño de proyecto mediante la MDP



Los aspectos que desarrolla la MDP, para pasar del sistema a proyectar al sistema proyectado, consideran factores propios de los sistemas involucrados en el problema o de los sistemas que contribuyen con su consecución. Estos son: el sistema técnico, las personas y cosas involucradas en la resolución del problema, el análisis del suministro y la suministración, el servicio deseado y las condiciones de prestación, el árbol de funciones técnicas, la ergonomía y psicología; y el impacto ambiental del proyecto. Analizados en conjunto crean la transformación creativa del modelo de funciones del sistema proyectado (ver Figura 2). De esta manera se obtiene un modelo que garantice la combinación óptima de tecnologías existentes, prestaciones, coste y nivel de satisfacción del cliente en un sistema real interconectado.

Figura 2: Aspectos involucrados en el proceso de obtención del sistema proyectado



2. Desarrollo de la MDP: caso de estudio.

El caso de estudio desarrolla el proceso de la MDP (etapas de *Análisis del problema*, *Preparación del sistema solución/modelización* y *Presentación del sistema propuesto*), mediante la obtención y análisis de información, a través de las herramientas instruccionales correspondientes. Los resultados de la secuencia del análisis de la información y el proceso de toma de decisiones realizado se muestran en la Figura 3. A través de esta secuencia se facilita y gestiona el conocimiento de manera paulatina,

logrando que vaya adquiriendo valor durante su desarrollo, manteniendo siempre un proceso de feedback entre las etapas de *Análisis del problema* y *Preparación del sistema solución/modelización* hasta llegar a la presentación de la propuesta. A continuación se presenta el desarrollo de cada etapa.

2.1. Análisis del problema.

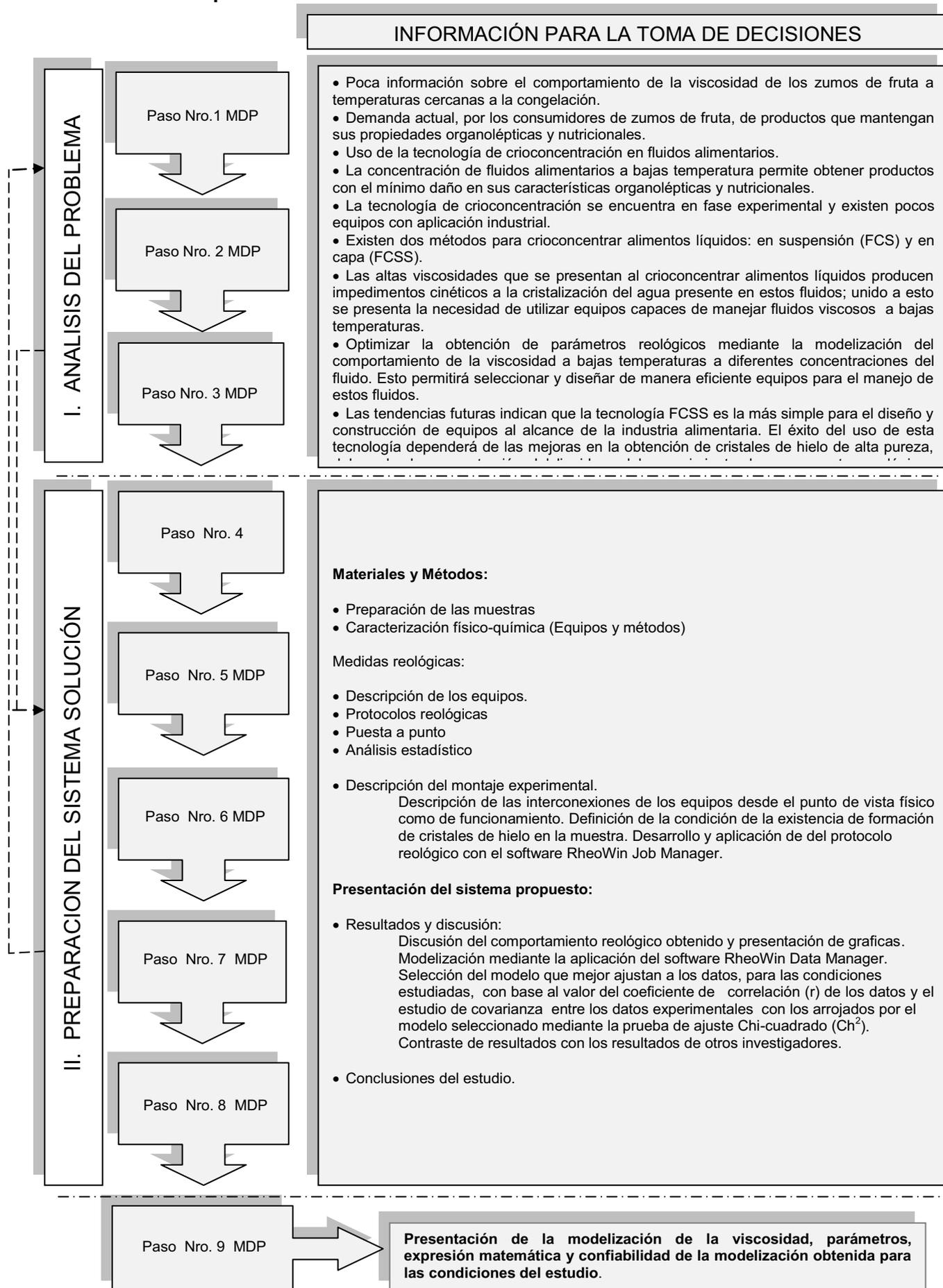
La actual demanda de alimentos de alta calidad organoléptica y nutricional, inducida por las nuevas exigencias del consumidor, ha llevado a la búsqueda de nuevas o mejores tecnologías para el procesamiento de alimentos. En el caso de la concentración de alimentos líquidos, el uso de los procesos convencionales de concentración, como la evaporación, permite llegar a mayores niveles de concentración de fluidos en comparación con las técnicas de concentración por congelación o membrana. Sin embargo, la técnica de concentración por congelación tiene la ventaja de que la calidad del producto obtenido es mayor, debido a las bajas temperaturas utilizadas en el proceso, que la convierte en una tecnología muy adecuada para el procesamiento de jugos de frutas. Durante su procesamiento, los zumos son sometidos a diferentes operaciones como el transporte a través de tuberías, el almacenamiento en frío o congelación y la concentración. Esta última operación se realiza con el fin de disminuir costes de transporte y aumentar su vida útil (French, H.T. et al., 2007).

En estos momentos, la crioconcentración es usada en la industria alimenticia para concentrar zumos de fruta, obtener extractos de café, vino y cerveza, entre otros. Se trata de una operación que permite la eliminación de agua de una solución mediante el enfriamiento de ésta hasta la formación y separación de cristales de hielo de alta pureza, que permiten obtener un fluido concentrado. De acuerdo con diversos investigadores (Ruiz, Y. et al., 2010; Müller, M. y Sekoulov, I. 1992; Flesland, O. 1995 y Chen, P. et al., 1998) hay dos métodos básicos para la formación de cristales de hielo en las soluciones. La primera, se conoce como cristalización en suspensión (Miyawaki, O. 2001 y Huige, N.J.J. y Thijssen, H.A.C. 1972), que consiste en una fase inicial de formación de núcleos de hielo (nucleación), también llamada cristalización, seguido de una segunda fase, que implica el crecimiento de los núcleos de hielo en la solución (Figura 4 (a)). El segundo método, consiste en la cristalización del agua presente en la solución en forma de una capa de hielo sobre una superficie fría (Ruiz, Y. et al., 2010 y Müller, M. y Sekoulov, I. 1992) como se observa en la Figura 4 (b).

Los métodos básicos para la concentración de soluciones por congelación son: por suspensión y por congelación en película. Los equipos que trabajan en sistemas de concentración por suspensión (FCS) ya están operando en la industria de los alimentos, mientras que los equipos que trabajan con el sistema de concentración en película (FCSS), también llamados sistemas de cristalización en capas, se encuentra todavía en fase experimental (Hartel, R.W. y Espinel, L.A. 1993).

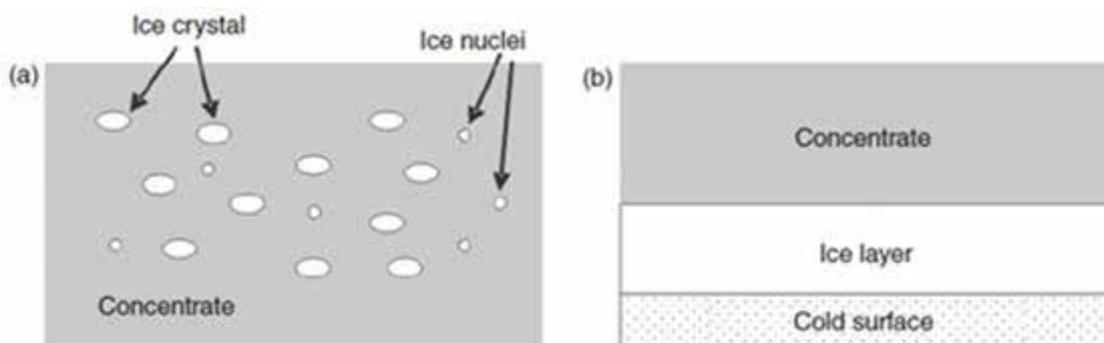
Las tendencias futuras sugieren mejoras para el desarrollo de esta tecnología y en las publicaciones más recientes se señala a la FCSS como la tecnología más simple para el diseño, desarrollo y construcción de equipos al alcance de la industria alimentaria. El uso de este sistema a futuro dependerá de las mejoras que se puedan realizar en términos de la obtención de la mayor pureza del hielo y el grado del líquido a concentrar. Por ello, es necesario avanzar en los estudios del uso de los sistemas de cristalización en películas, obteniendo más información y centrándose en aspectos como: (a) el mantenimiento de altos regímenes hidráulicos de operación, con la mayor turbulencia posible, en los conductos circulares y sobre la superficie de enfriamiento durante el transporte del líquido que se desea concentrar. Para ello se debe mantener

Figura 3: Secuencia del proceso de obtención y análisis de la información para el proceso de toma de decisiones en el uso de la MDP



un $Re > 2500$, trabajando con velocidades de más de 1 m/s; y (b) En el diseño de equipos que permitan reducir el consumo energético (KW/T) del agua retirada (Sánchez J., et al., 2009).

Figura 4: Formación de cristales de hielo en la concentración de soluciones por congelación



Fuente: Sánchez J., et al., (2009).

La caracterización reológica de las sustancias a crioconcentrar, permite obtener información cualitativa y cuantitativa de variables importantes como la viscosidad. En procesos de concentración de fluidos alimentarios a bajas temperaturas, como la crioconcentración, el incremento de la viscosidad es una limitante en la eficiencia del proceso (Miyawaki, O. et al., 2005). Conocer su comportamiento ayuda a diseñar y seleccionar, de manera óptima, equipos de manejo y procesamiento industrial en el uso de esta tecnología. En general, la caracterización reológica permite el control y optimización de las variables del proceso, el diseño y evaluación de equipos tales como bombas, tuberías, intercambiadores de calor, evaporadores, esterilizadores y mezcladores; y el control de calidad de los alimentos (Brennan, J.G. et al., 1980; Dail, R.V. y Steffe, J.F. 1990 [a, b]; Ahmed, J. y Ramaswamy, H.S. 2004 [a, b] y Kramer, A. y Twingg, B.A. 1970). Esta información será de gran importancia para el desarrollo industrial de la crioconcentración y para el manejo de los productos obtenidos en la búsqueda de mayores ventajas competitivas, menor coste por consumo energético y la disminución de su impacto ambiental.

3.1.1. Materiales y métodos.

Preparación de muestras.

Para la preparación de las muestras se utilizó zumo de piña concentrado por evaporación a 59 °Brix (20 °C), proporcionado por un proveedor local, ubicado en la localidad de Lleida (Catalunya-España). Las muestras utilizadas para los ensayos reológicos se obtuvieron diluyendo el zumo de piña concentrado con agua destilada para obtener zumos a concentraciones de 12,3; 18,4; 36,2; 49,6 y 54,0 °Brix respectivamente.

Caracterización físico-química:

La caracterización físico-química del zumo de piña (59,0 °Brix; 20 °C) se realizó mediante la determinación (por quintuplicado) del contenido de sólidos solubles, pH, conductividad eléctrica, % de materia seca, contenido de pulpa centrifugable, índice de formol, contenido residual de pectina, contenido de azúcares totales y valoración de la acidez total (Gaithersburg, Md., 2005)

Determinación del contenido de sólidos solubles.

Los sólidos solubles se expresaron como °Brix, mediante el uso del refractómetro marca ATAGO (Modelo Rx-1000) con una precisión de $\pm 0,1^\circ\text{Brix}$, medidos a $20\pm 0,05$ °C. La medida se realizó colocando una gota del zumo de piña en el refractómetro previa calibración del equipo con agua destilada.

Determinación de pH y conductividad eléctrica

La medida del pH se realizó con el equipo CRISON pH METER BASIC20. La conductividad eléctrica expresada en $\mu\text{s/cm}$ fue medida con el conductímetro GLP31 con compensador de temperatura.

Materia seca

La materia seca, expresada en % de g /g totales, se determinó mediante el uso del liofilizador de laboratorio marca TELESTAR (modelo CRYODOS-45).

Contenido de pulpa centrifugable

El contenido de pulpa centrifugable, expresado en % del volumen de la muestra, se determinó usando el equipo de centrifugado modelo P/SELECTA MEDIFRIGER.

Contenido residual de pectina.

El contenido de pectina, expresado en % por 100 mL de muestra, se determinó usando la Norma NMX-F347-S-1980 de la Dirección General de Normas Mexicanas.

Contenido de azúcares totales (HPLC).

Los niveles de fructosa, glucosa y sacarosa de los zumos de piña, expresado en g/L, se determinaron mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC) en un equipo marca Beckman, San Ramón (CA), con una columna Spherisorb NH_2 (25 x 0,4 cm), fase móvil: acetonitrilo: agua (75:25); velocidad de flujo: 1,5 mL / min, volumen de inyección: 20 microlitros.

Valoración de acidez total y determinación del Índice de formol

La valoración de la acidez total se expresó en m moles H^+ (sin decimales). El índice de formol será expresado en mL de solución de NaOH (0,1 mol/L por 100 mL).

Medidas Reológicas:

Viscosímetro

El equipo utilizado para medir la viscosidad es un viscosímetro marca HAAKE modelo VT550 equipado con una camisa a temperatura para el porta muestra. El sensor utilizado es el formado por el MV2P 8070488 y el cup MVP 8070483. Las medidas se

llevaron a cabo desde un PC mediante el software RheoWin © 2.91 (conformado por RheoWin Job Manager y RheoWin Data Manager).

Termostato con refrigeración

Este termostato marca HAAKE modelo DC30-K-10 trabaja en el rango de temperatura de -10°C a 20°C (precisión $\pm 0,01$ K). Posee una bomba de recirculación presión/caudal máximo (300/12,5 minbar/L/min) y un tiempo de enfriamiento: 10 min (-10°C).

Data logger y sonda de temperatura

La comprobación de la temperatura de formación de cristales de hielo en las muestras se realizó mediante un Data logger TESTO 1777-T4 y una termocupla tipo K con un sensor de NiCr-NiAl. El rango de medida de este equipo es de -50 °C a 100 °C con una precisión de $\pm 0,7^\circ$ C. Las medidas fueron realizadas previa calibración con agua destilada.

Protocolo reológico

El protocolo ensayado, para medir la viscosidad en cada muestra, fue desarrollado con el RheoWin Job Manager y consistió en aplicar una velocidad de corte ($\dot{\gamma}$) de 0 a 280 s^{-1} durante 700 s. Se realizaron 3 repeticiones, con reemplazo de la muestra, para cada una de las concentraciones estudiadas (12,3; 18,4; 36,2; 49,6 y 54,0° Brix) en el rango de temperatura de -10 °C a 4 °C.

Puesta a punto

La calibración y puesta a punto del montaje se realizó usando el patrón estándar de calibración para viscosímetros rotacionales RT12500 (Marca CANON INSTRUMENTS COMPANY USA).

Análisis estadístico

El análisis estadístico de los datos fue realizado con el software RheoWin Data Manager usando el parámetro coeficiente de correlación (r) y la comparación de las varianzas de los datos experimentales respecto a la varianza de los datos arrojado por el modelo escogido para el ajuste. Este análisis de varianza se realiza mediante el valor de la prueba de Chi-cuadrado (Ch^2).

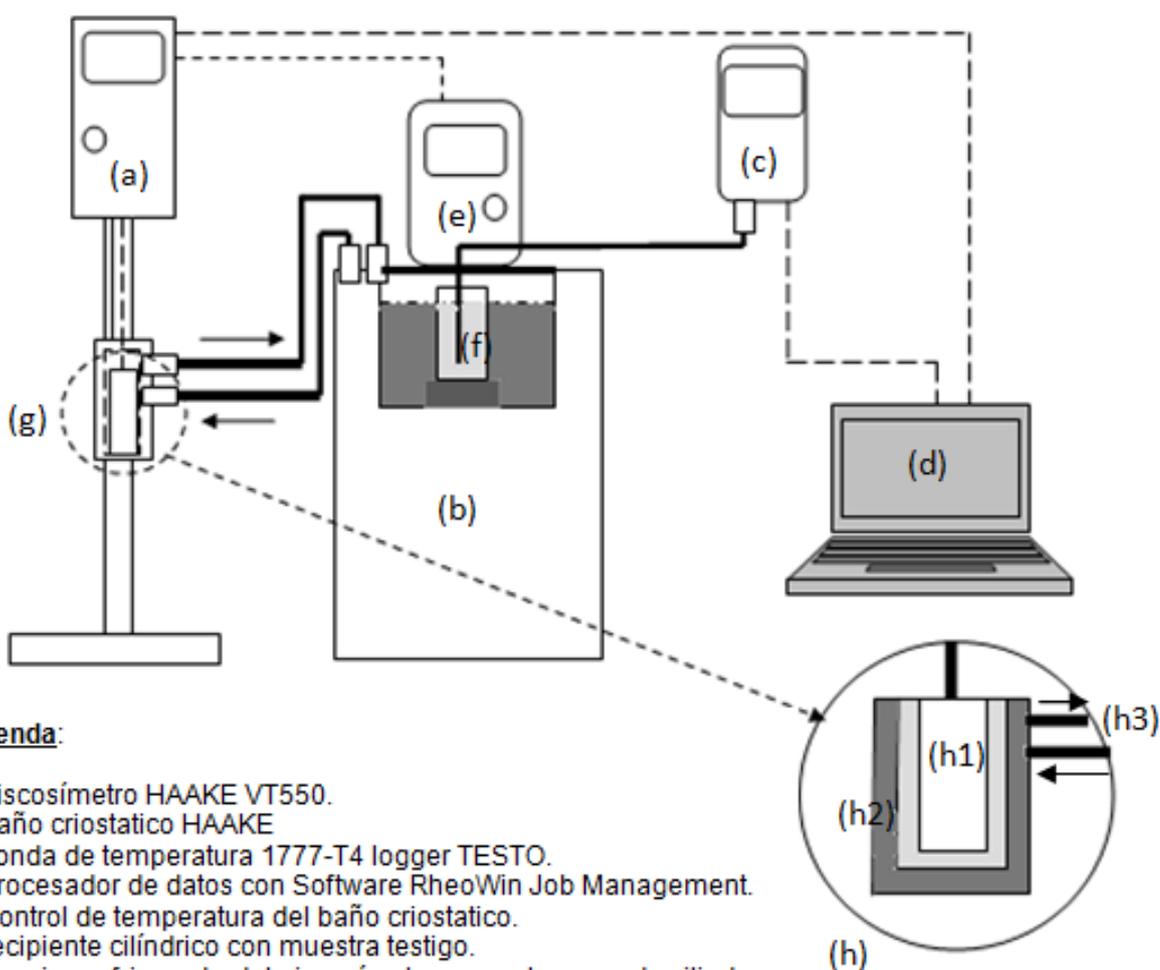
3.2. Preparación del sistema solución/modelización.

Montaje experimental

El montaje experimental usado es el mostrado en la Figura 5. Este comprende un viscosímetro (a) con una camisa atemperada (g), para el sensor formado por el MV2P 8070488 y el CUP MVP 8070483 (h), refrigerado mediante un fluido (etilenglicol y agua, 1:1) procedente del termostato con refrigeración (b) con un control de temperatura (e). En el baño del termostato se ha colocado un recipiente de acero inoxidable en forma cilíndrica (ϕ : 3,0 mm y l: 14,7 mm) con zumo de piña a la concentración en la que se realizó el estudio de viscosidad. Esta es usada como muestra de control y se le ha conectado a un Data logger (c) mediante una sonda de temperatura. Tanto el viscosímetro como el Data logger están conectados a un equipo procesador de datos que tiene instalado el software RheoWin © 2.91.

Para a la realización de las medidas se procedió a calibrar el viscosímetro utilizando el patrón de calibración RT-12500. Los ensayos de las medidas de viscosidad se desarrollaron con muestras con un volumen según las especificaciones del sensor (55 mL). Pevio a realizar las medidas de la viscosidad, mediante el uso del protocolo diseñado en el RheoWin Job Manager, se verificó que la temperatura de la muestra de control estuviera a la misma que la programada en el termostato, verificando que en ella no se formaran cristales de hielo para las temperaturas por debajo de 0 °C. De esta manera se garantizó que la medida de la viscosidad estuviera cerca del punto de congelación.

Figura 5: Esquema del montaje experimental para la determinación de la viscosidad a bajas temperaturas.



Legenda:

- a. Viscosímetro HAAKE VT550.
- b. Baño criostático HAAKE
- c. Sonda de temperatura 1777-T4 logger TESTO.
- d. Procesador de datos con Software RheoWin Job Management.
- e. Control de temperatura del baño criostático.
- f. Recipiente cilíndrico con muestra testigo.
- g. Camisa refrigerada del viscosímetro para el sensor de cilindros coaxiales.
- h. Detalle de la camisa refrigerada del sensor:
 - h1. Sensor de cilindros coaxiales.
 - h2. Camisa de refrigeración.
 - h3. Entrada y salida de refrigerante.

3.3. Presentación del sistema propuesto

Resultados y discusión:

Las propiedades del zumo de piña se pueden observar en la Tabla 1, obtenidas mediante la caracterización físico-química.

Tabla 2: Propiedades del zumo concentrado de piña

Características físico químicas	Valor
Sólido solubles (°Brix) a 20° C	59,0 ± 0,18
pH a 20 °C	3,73 ± 0,25
Conductividad eléctrica (µs/cm)	887 ± 0,15
Materia seca (%)	97,0 ± 0,10
Acidez total a 20 °C (mol H ⁺ /L ; dilución:1.10; densidad:1,0223 g/cm ³)	35 ± 0,05
Índice de formol (c NaOH= 0,1 mol/L por 100 mL muestra; dilución 1:10; densidad:1,0223 g/cm ³).	51,0 ± 0,04
Contenido residual de pectina (% / 100 mL muestra).	0,016 ± 0,01
Contenido de pulpa centrifugable (% / 30 mL muestra; dilución: 1:10; densidad:1,0223 g/cm ³).	2,88 ± 0,13
Contenido de azúcares totales (dilución 1:1 ; g/L):	
Fructuosa	2,98 ± 0,11
Glucosa	2,59 ± 0,09
Sacarosa	12,56 ± 0,12

Comportamiento de la viscosidad del fluido (η Vs. γ).

El comportamiento de la viscosidad del zumo de piña en las 5 concentraciones estudiadas, para el rango de temperatura de -10 °C a 4°C, se muestra en las Figura 6, 7, 8, 9 y 10. Fue posible medir valores de viscosidad, sin formación de cristales de hielo, a concentraciones de 36,2° °Brix hasta -5°C. y para concentraciones de 18,4 °Brix y 12,3 °Brix hasta -2 °C. El valor de la viscosidad con respecto al incremento de la velocidad de corte, va disminuyendo con el valor de la concentración.

Modelización mediante RheoWin © 2.91.

En la Tabla 4, se muestran los modelos matemáticos y reológicos obtenidos mediante el uso del software RheoWin Data Manager. Los datos fueron probados y ajustados a diferentes modelos, que describen el comportamiento de la viscosidad, seleccionando aquellos que presentaron el valor del coeficiente de correlación (r) más cercano a 1 y con menor valor de la prueba de Chi-cuadrado (Ch²). Se observa que el ajuste del comportamiento de la viscosidad del zumo de piña, a las concentraciones y temperaturas estudiadas, se adecuan los modelos de: Cross, Exponencial, Carreau-Yasuda, Ley de Potencia + K y Herschel-Bulkley. Las muestras evaluadas a 54°Brix (2°C); 49,6°Brix (-6°C y -8°C); 18,4°Brix (4°C, 2°C y -2°C) y 12,3°Brix (4°C y 2°C) tuvieron mejor ajuste a la ley de Potencia + K, respectivamente. Estas presentan un comportamiento pseudoplástico ($n < 1$). Este es un típico comportamiento en pulpas de frutas como la guayaba roja (Medina, M. y Pagano, F. 2003 y Cabral, R. et al., 2007), mango (Dak, M. et al., 2006) y cereza de las Indias (Da Silva, F. et al., 2005). Mientras que la muestra evaluada a 18,4°Brix (4°C) presentó un comportamiento dilatante ($n > 1$).

Las muestras evaluadas a 54 °Brix (-2°C, -6°C, -8°C y -10°C); 49,6 °Brix (0°C, 2°C y -4°C); 36,2°Brix (4°C, 2°C, 0°C, -2°C y -4°C) y 12,3°Brix (-2°C); presentaron mejor

ajuste al modelo de Herschel-Bulkle, respectivamente. Estas muestras tienen un comportamiento pseudoplástico ($n < 1$) y mostraron un valor de esfuerzo cortante inicial (ζ_0), como un valor umbral para comenzar a fluir, causado posiblemente por las limitaciones experimentales de medir a velocidades de corte ($\dot{\gamma}$) muy por debajo a 1 s^{-1} . Resultados similares se pueden observar en los estudios obtenidos en el comportamiento de zumos concentrados de kiwi (Ibartz, A. et al., 1995).

Los ensayos realizados a 54,0°Brix (4 °C y 0°C); 49,6 °Brix (-10°C) y 18,4°Brix (0°C) han mostrado un mejor ajuste al modelo de Cross. Este comportamiento describe una región newtoniana, correspondiente a bajas velocidades de cizalla, caracterizada por una viscosidad de cizalla finita y constante (η_0), llamada región newtoniana inferior. Otra región, de velocidades de cizalla intermedias, caracterizada por una viscosidad que es función de la velocidad de cizalla. Y una región newtoniana, correspondiente a altas velocidades de cizalla, caracterizada por una viscosidad de cizalla finita y constante (η_∞), llamada región newtoniana superior. Este tipo de comportamiento, que no es estrictamente pseudoplástico ni dilatante, se puede denotar como comportamiento estructural. Estos comportamientos reológicos (no-Newtoniano) en los zumos son señalados especialmente en aquellos con contenido de pectinas - ej. zumo de naranja y concentrados- (Falguera, V. y Ibarz, A. 2010). Los modelos Exponencial y Carreau-Yasuda han presentado un mejor ajuste a las condiciones de: 54,0°Brix (-4°C), 12,3°Brix (0°C); y 49,6 °Brix (4°C y -2°C) respectivamente. El modelo Carreau-Yasuda representa una alternativa de ajuste a las condiciones descritas para el modelo de Cross. El análisis de las varianzas, entre los valores experimentalmente y los arrojados por las modelos de ajustes seleccionados, se ha realizado mediante la prueba de χ^2 mostrando que no existen diferencias significativas entre ellos.

Figura 7: Comportamiento de la viscosidad a 54 °Brix para el rango de temperatura de -10 °C a 4°C

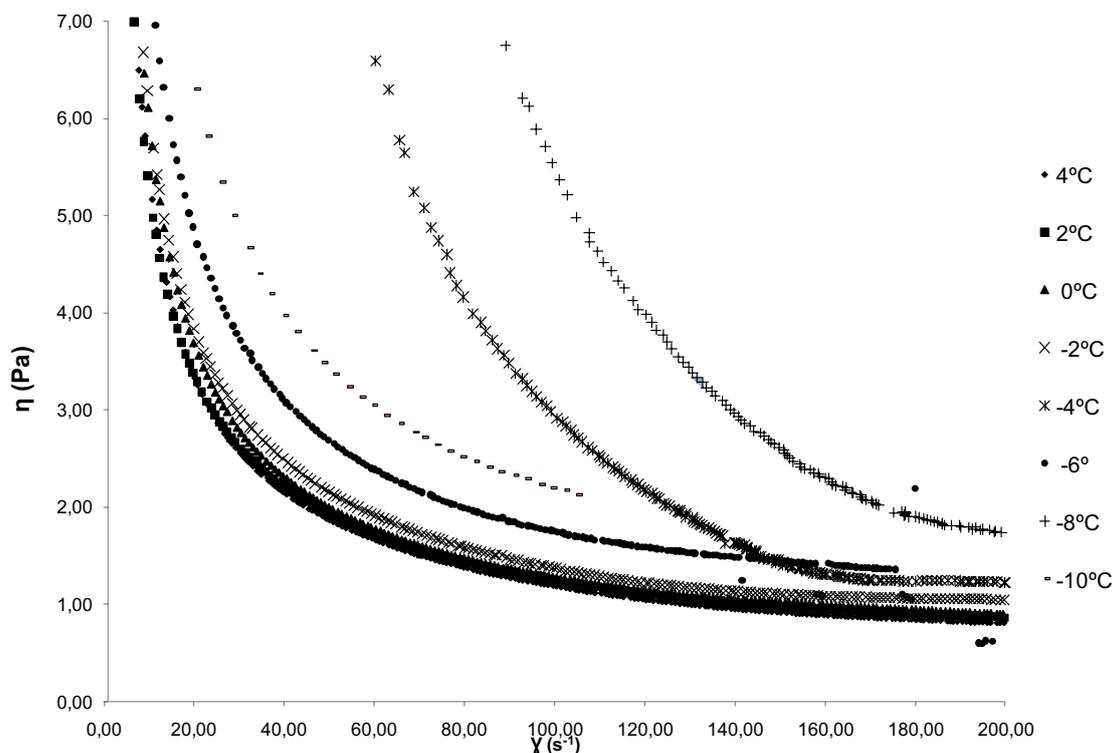


Figura 8: Comportamiento de la viscosidad a 49,6 °Brix para el rango de temperatura de -10 °C a 4°C

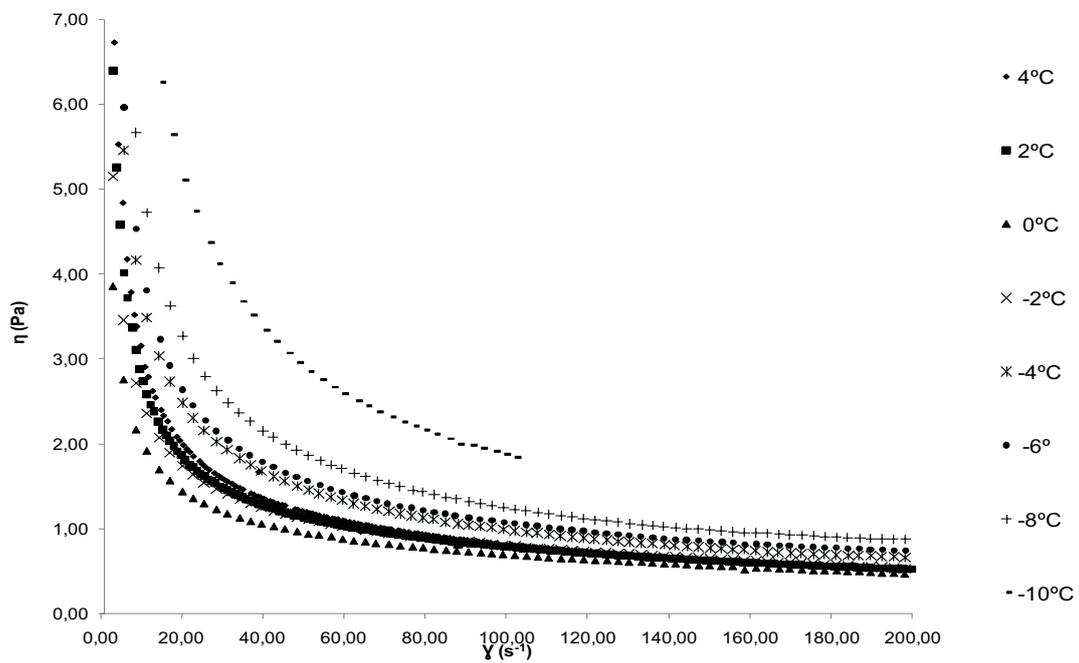


Figura 9. Comportamiento de la viscosidad a 36,2 °Brix para el rango de temperatura de -5 °C a 4°C

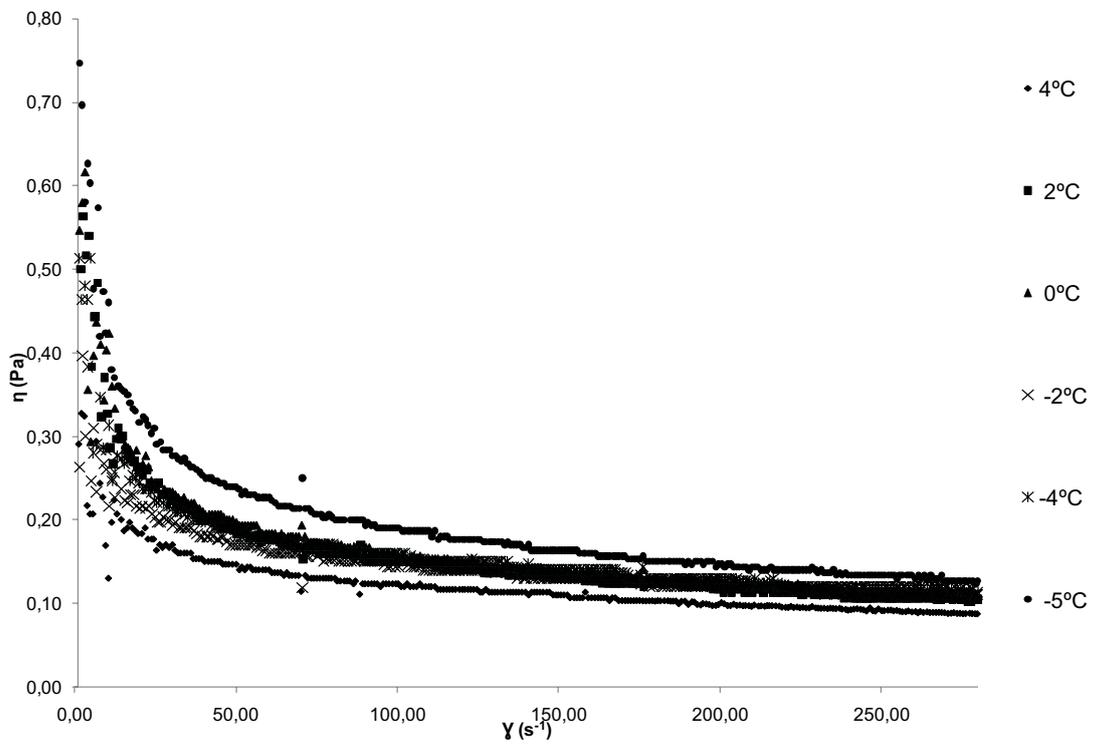


Figura 10: Comportamiento de la viscosidad a 18,4 °Brix para el rango de temperatura de -2°C a 4°C

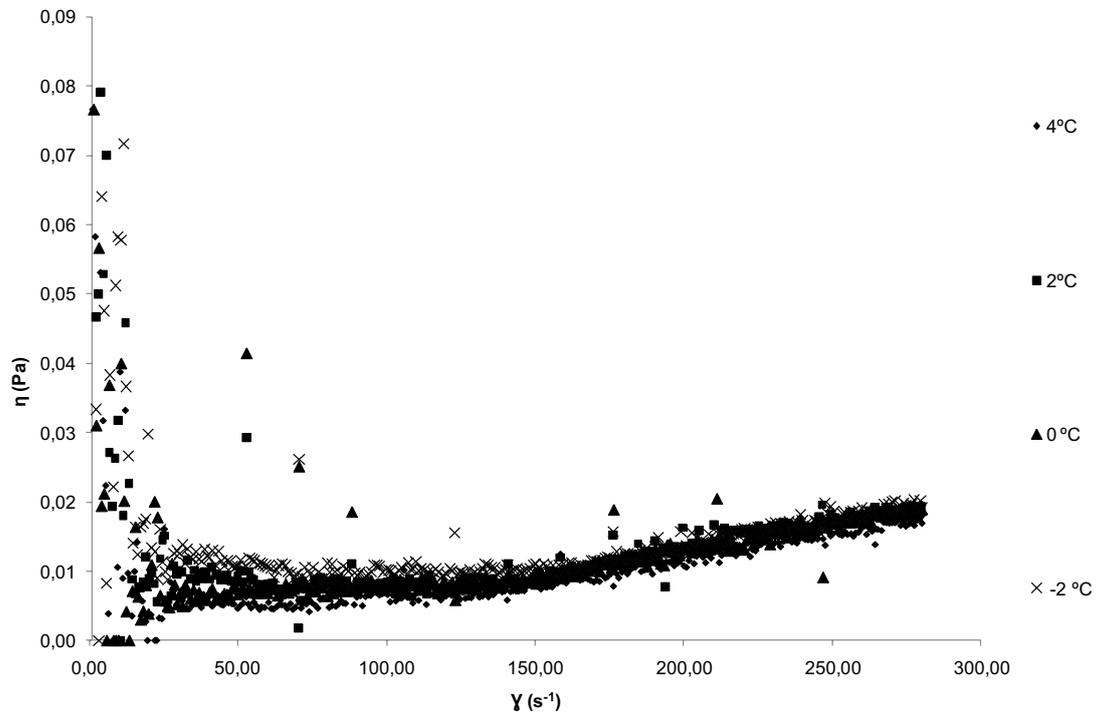


Figura 11. Comportamiento de la viscosidad a 12,3 °Brix para el rango de temperatura de -2 °C a 4°C

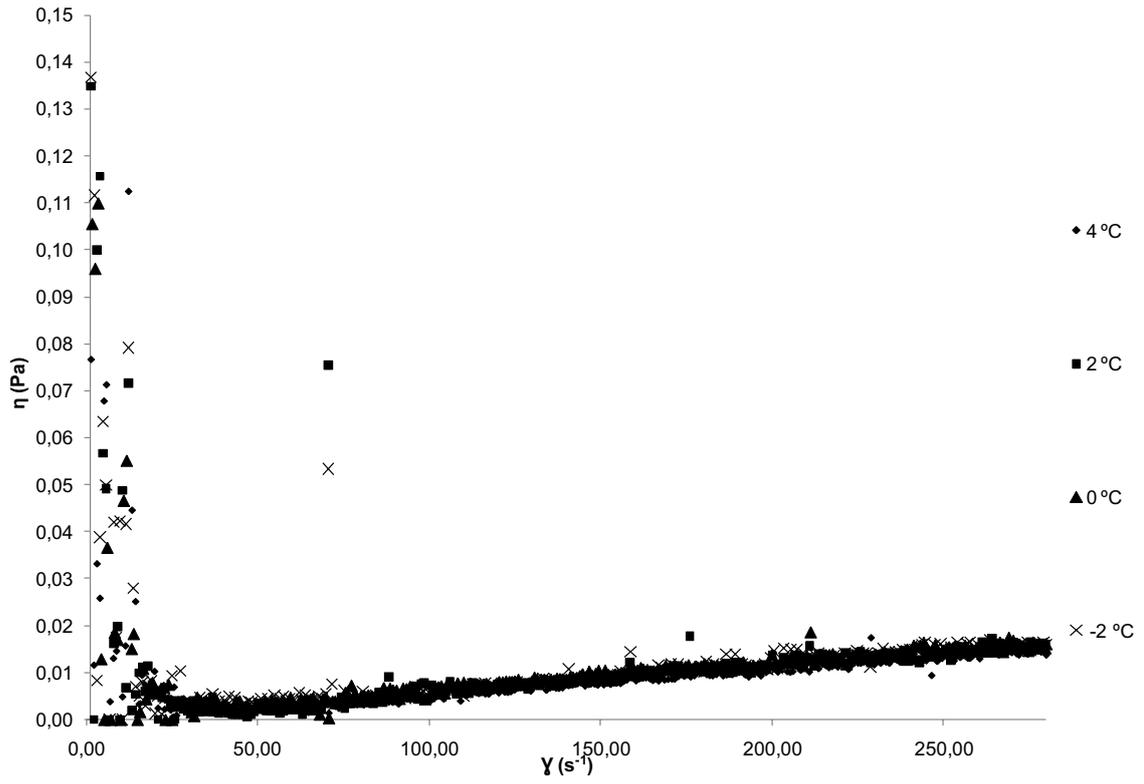


Tabla 3: Modelización de las curvas de viscosidad usando el software RheoWin 2.91

Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)	Modelo	Valor de los parámetros	Expresión matemática	r	Ch ²
	4	Cross (Visc): $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_b)^n)$	$\eta_{\infty}=0,15$ $\eta_0=154,40$ $\dot{\gamma}_b=0,16$ $n=0,77$	$\eta = 0,4013 + 1,59 \times 10^4 / (1 + (\dot{\gamma} / 7,59 \times 10^{-4})^{0,8117})$	0,99	0,5836
	2	Ley de Potencia + K: $\eta = a + b \dot{\gamma}^c$	$a=0,19$ $b=29,82$ $c=-0,72$	$\eta = 0,1942 + 29,82 \dot{\gamma}^{-0,7223}$	1,00	0,9400
	0	Cross (Visc): $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_b)^n)$	$\eta_{\infty}=0,40$ $\eta_0=1,59 \times 10^4$ $\dot{\gamma}_b=7,59 \times 10^{-4}$ $n=0,81$	$\eta = 1,587 \times 10^4 + 1586,59 / (1 + (\dot{\gamma} / 7,587 \times 10^{-4})^{0,8117})$	1,00	4,0460
54,0	-2	Herschel-Bulkley (Visc): $\eta = (\zeta_0 \dot{\gamma}) + K \dot{\gamma}^{(n-1)}$	$\zeta_0=42,24$ $K=14,85$ $n=0,5$	$\eta = -42,24 \dot{\gamma} + 14,85 \dot{\gamma}^{-0,5}$	0,94	242,2
	-4	Exponencial: $\eta = a + b e^{(c/\dot{\gamma})}$	$a=20,71$ $b=-19,88$ $c=-3,35$	$\eta = 20,71 - 19,88 e^{-(\dot{\gamma} / 3,35)}$	0,99	15,82
	-6	Herschel-Bulkley (Visc): $\eta = (\zeta_0 \dot{\gamma}) + K \dot{\gamma}^{(n-1)}$	$\zeta_0=12,98$ $K=50,11$ $n=0,28$	$\eta = 12,98 \dot{\gamma} + 50,11 \dot{\gamma}^{-0,7174}$		
	$\zeta_0=0,74$ $K=26,93$ $n=0,44$					
	$\zeta_0=104,00$ $K=-13,10$ $n=-0,433$					
	-8			$\eta = 0,7436 \dot{\gamma} + 3,577 \dot{\gamma}^{-0,5576}$	0,99	8,769
	-10			$\eta = 104 \dot{\gamma} - 13,10 \dot{\gamma}^{-1,4334}$	1,00	11,390
					0,95	87,150

Tabla 3: Modelización de las curvas de viscosidad usando el software RheoWin 2.91 (Cont.)

Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)	Modelo	Valor de los parámetros	Expresión matemática	r	Ch ²
49,6	4	Carreau-Yasuda (Visc): $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + (\lambda \dot{\gamma})^a)^{(1-n)/a}$	$\eta_{\infty}=0$ $\eta_0=15,20$ $n=0,36$ $\lambda=1,04$ $a=2$	$\eta = 15,20 / (1 + (1,035\dot{\gamma})^2)^{0,3211}$	0,99	2,736
	2 0	Herschel-Bulkley (Visc): $\eta = (\zeta_0/\dot{\gamma}) + K\dot{\gamma}^{(n-1)}$	$\zeta_0=1,93$ $K=11,88$ $n=0,38$ $\zeta_0=0,68$ $K=7,13$ $n=0,49$	$\eta=1,925/\dot{\gamma} + 11,88\dot{\gamma}^{-0,6192}$ $\eta=-0,681/\dot{\gamma} + 7,133\dot{\gamma}^{-0,5087}$	0,99 0,99	2,083 0,0822
49,6	-2	Carreau-Yasuda (Visc): $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + (\lambda \dot{\gamma})^a)^{(1-n)/a}$	$\eta_{\infty}=0$ $\eta_0=3,21$ $\lambda=-0,09$ $n=0,38$ $a=2$	$\eta = 3,206 / (1 + (0,09\dot{\gamma})^2)^{0,311}$	0,99	0,0807
	-4	Herschel-Bulkley (Visc): $\eta = (\zeta_0/\dot{\gamma}) + K\dot{\gamma}^{(n-1)}$	$\zeta_0=4,16$ $K=21,40$ $n=0,34$	$\eta = 4,156\dot{\gamma} + 21,40\dot{\gamma}^{-0,6571}$	0,99	0,5119
49,6	-6 -8	Ley de Potencia + K: $\eta = a + b \dot{\gamma}^c$	$a=0,28$ $b=20,67$ $c=-0,69$ $a=0,20$ $b=18,84$ $c=-0,63$	$\eta = 0,2774 + 20,67\dot{\gamma}^{-0,6893}$ $\eta = 0,2035 + 18,84\dot{\gamma}^{-0,6306}$	1,00 0,99	0,1804 0,0099
	-10	Cross (Visc): $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) / (1 + (\dot{\gamma} / \dot{\gamma}_b)^n)$	$\eta_{\infty}=0,04$ $\eta_0=2297$ $\dot{\gamma}_b=2,18 \times 10^{-3}$ $n=0,65$	$\eta = -0,04154 + 2297,04154(1 + (\dot{\gamma} / 2,177 \times 10^{-3})^{0,6469})^{-1}$	1,00	0,01338

Tabla 3: Modelización de las curvas de viscosidad usando el software RheoWin 2.91 (Cont..)

Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)	Modelo	Valor de los parámetros	Expresión matemática	r	Ch ²			
36,2	4	Herschel-Bulkley (Visc): $\eta = (\zeta_0 \dot{\gamma}) + K \dot{\gamma}^{(n-1)}$	$\zeta_0=0,01042$	$\eta = 0,01042 \dot{\gamma} + 0,3879 \dot{\gamma}^{-0,2429}$ $\eta = 0,06833 \dot{\gamma} + 1,096 \dot{\gamma}^{-0,4194}$ $\eta = 0,1769 \dot{\gamma} + 1,034 \dot{\gamma}^{-0,3806}$ $\eta = 4,136 \dot{\gamma} + 0,4814 \dot{\gamma}^{-0,2588}$ $\eta = 0,1419 \dot{\gamma} + 0,4531 \dot{\gamma}^{-0,2352}$	0,88 0,99 0,99 0,90 0,99	0,1247 0,0851 0,1278 0,0953 0,1193			
	2		$K=0,39$ $n=0,76$						
	0		$\zeta_0=0,06833$ $K=1,10$						
	-2		$\zeta_0=0,18$ $K=1,03$ $n=0,62$						
	-4		$\zeta_0=0,19$ $K=0,48$ $n=0,74$ $\zeta_0=0,14$ $K=0,45$ $n=0,76$						
18,4	4	Ley de Potencia + K: $\eta = a + K \dot{\gamma}^c$	$a=1,52 \times 10^{-3}$ $b=2,95 \times 10^{-7}$ $c=1,93$	$\eta = 0,001520 + 2,948 \times 10^{-7} \dot{\gamma}^{1,925}$ $\eta = 0,006955 + 0,1764 \dot{\gamma}^{-0,8259}$	0,80 0,99	0,0041 0,0808			
	2		$a=6,95 \times 10^{-3}$ $b=0,18$ $c=-0,83$						
	0		$\eta_\infty=1,26 \times 10^{-2}$ $\eta_0=0,10$ $\dot{\gamma}_b=3,81$ $n=31,25$				$\eta = 0,01260 + 0,0892 / (1 + (\dot{\gamma} / 3,81)^{31,25})$	0,60	0,0631
	-2		$a=1,23 \times 10^{-2}$ $b=0,23$ $c=-0,99$						

Tabla 3: Modelización de las curvas de viscosidad usando el software RheoWin 2.91 (Cont..)

Concentración (°Brix)	Temperatura (°C)	Modelo	Valor de los parámetros	Expresión matemática	r	Ch ²
12,3	4	Ley de Potencia + K: $\eta = a + K\dot{\gamma}^c$	a=155,40 b=2,181 c=-0,89	$\eta = 155,4 + 2,181\dot{\gamma}^{-0,8926}$ $\eta = 9,140 + 0,4834\dot{\gamma}^{-0,6151}$	1,00	0,0470
	2		a=9,14 b=0,48 c=-0,62		0,99	0,1361
	0	Exponencial: $\eta = a + K_1 e^{(b/c)}$	a=8,80x10 ⁻³ b=0,25 c=-3,67	$\eta = 8,809 \times 10^{-3} + 0,2497 e^{-(\dot{\gamma}/3,666)}$	0,70	0,1110
	-2	Herschel-Bulkley: $\eta = (\zeta_0/\dot{\gamma}) + K\dot{\gamma}^{(n-1)}$	$\zeta_0 = -0,38$ K= 0,61 n= 0,10	$\eta = -0,3861/\dot{\gamma} + 0,6148\dot{\gamma}^{-0,90266}$	0,71	0,0670

5. Conclusiones.

La MDP es una herramienta válida para gestionar el conocimiento, mediante la aplicación de las herramientas instruccionales que la conforman, logrando que paulatinamente este adquiera valor durante el desarrollo del modelo solución y presentación de la propuesta final. Esto queda demostrado al recopilar, analizar y ejecutar el proceso de toma de decisiones que consecutivamente se desarrolla en la aplicación de la metodología.

Los modelos matemáticos que describen la viscosidad (como propuesta de solución al problema que se aborda en el caso de estudio) son una forma práctica para definir el comportamiento de la viscosidad de zumo de piña a temperaturas cercanas a la congelación en el intervalo de concentración de 54 a 12,3 °Brix respecto al aumento de la velocidad de corte. Estos modelos permiten estimar parámetros para el diseño y selección de equipos de manejo de fluidos en estas condiciones.

La tecnología de crioconcentración de fluidos alimentarios, como una tecnología emergente, requiere de propuestas metodológicas que contribuyan con la gestión del conocimiento en los aspectos menos abordados o pendientes de abordar. La MDP permitirá su desarrollo técnico y sostenible a nivel industrial, gestionando el conocimiento de las actividades de I+D+i durante la elaboración de propuestas y ejecución de proyectos asociados con esta tecnología.

6. Referencias Bibliográficas

Ahmed, J. y Ramaswamy, H.S. (2004a). Effect of high-hydrostatic pressure and concentration on rheological characteristics of xanthan gum. *Food Hydrocolloids*, 18: 367-373.

Ahmed, J. y Ramaswamy, H.S. (2004b). "Response surface methodology in rheological characterization of papaya puree". *International Journal of Food Properties*, 7 (1): 45-58.

Blank, W. (1997). Authentic instruction. In W.E. Blank y S. Harwell (Eds.), *Promising practices for connecting high school to the real world*. pp. 15–21. Tampa, Florida: University of South Florida. USA. ERIC Document Reproduction Service No. ED407586: http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/search/detailmini.jsp?_nfpb=true&_ERICExtSearch_SearchValue_0=ED420756&ERICExtSearch_SearchType_0=no&accno=ED407586.

Brennan, J.G., Butters, J.R., Cowell, N.D. y Lilly, A.E.V. (1980). En: *Las Operaciones de la Ingeniería de los Alimentos*. Ed. por: Editorial Acirbia, Zaragoza, España.

Cabral R., Telis-Romero J., Telis V., Gabas A. y Finzer J. (2007). Effect of apparent viscosity on fluidized bed drying process parameters of guava pulp. *J Food Eng.*; 80 (4): 1096-1106.

Chen P. , Chen X.D. y Free K.W. (1998). Solute inclusion in ice formed from sucrose solutions on a sub-cooled surface – an experimental study. *Journal of Food Engineering* 38: 1-13.

Da Silva F. , Guimaraes D. y Gasparetto C. (2005). Rheology of acerola juice: effects of concentration and temperature. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*. 25 (1): 121-126.

Dail, R.V. y Steffe, J.F. (1990a). Rheological characterization of crosslinked waxy maize starch solutions under low acid aseptic processing conditions using tube viscometry techniques. *Journal of Food Science*, 55 (6): 1660-1665.

Dail, R.V. y Steffe, J.F. (1990b). Dilatancy in starch solutions under low acid aseptic processing conditions. *Journal of Food Science*, 55 (6):1764-1765.

Dak, M., Verma R. y Sharma G (2006).Flow characteristics of juice of "Totapuri" mangoes. *J Food Eng.*; 76 (4): 557-561.

Dickinson, K.P., Soukamneuth, S., Yu, H.C., Kimball, M., D'Amico R. y Perry, R.(1998). Providing educational services in the Summer Youth Employment and Training Program. Technical assistance guide. Department of Labor, Office of Policy & Research.pp. 1-143. Washington, DC: USA. ERIC. Document Reproduction Service No.ED420756:http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/search/detailmini.jsp?_nfpb=true&_ERICExtSearch_SearchValue_0=ED420756&ERICExtSearch_SearchType_0=no&accno=ED420756

Domínguez, C., Vidulich, M., Vogel, E. y McMillan, G. (1994). Situation Awareness: Papers and Annotated Bibliography. Armstrong Laboratory, Human System Center, ref. AL/CF-TR-1994-0085.

Flesland O. (1995). Freeze concentration by layer crystallization. *Drying Technology* 13: 1713 – 1739.

Falguera, V. y Ibarz, A. (2010). A New Model to Describe Flow Behaviour of Concentrated Orange Juice. *Food Biophysics*..5:11.

French, H.T., Clark, E., Pomeroy, D. Seymour, M., y Clarke, C.R. (2007). Psycho-physiological Measures of Situation Awareness. In M. Cook, J. Noyes & Y. Masakowski (eds.), *Decision Making in Complex Environments*. London: Ashgate. ISBN 0-7546-4950-4.

Gaithersburg, Md. (2005). Official methods of analysis of AOAC International. 18th edition.

García-Carrillo, A., Gracia, S., Estay-Niculcar, C., Jordi Cistero Bahima y Angel Alvarez-Larena (2007). Metodología de enseñanza-aprendizaje en diseño de proyectos de ingeniería. *Afinidad*, 64 (529) ,456 - 463.

Gracia, S., García-Carrillo, A., Estay-Niculcar, C; Cremades-Oliver, L.; Fernández –Diez, F. y Capó, O. (2009).Elaboración del Marco Lógico a partir de la Metodología de Diseño de Proyectos (MDP). *Afinidad*, 66 (541), 214 - 220.

Hartel, R.W. y Espinel, L.A. (1993). Freeze concentration of skim milk. *Journal of Food Engineering* 20: 101_120.

Harwell, S. (1997). Project-based learning. In W.E. Blank & S. Harwell (Eds.), *Promising practices for connecting high school to the real world*.(pp. 23–28). Tampa, FL: University of South Florida.USA. ERIC. Document Reproduction Service No. ED40758: http://www.eric.ed.gov/ERICWebPortal/search/detailmini.jsp?_nfpb=true&_ERICExtSearch_SearchValue_0=ED420756&ERICExtSearch_SearchType_0=no&accno=ED40758

Huige N.J.J. y Thijssen H.A.C. (1972). Production of large crystals by continuous ripening in a stirred tank. *Journal of Crystal Growth* 13: 483_487.

Ibarz, A., J. Giner, J. Pagán, V. Gimeno y S. Garza (1995). Rheological behaviour of kiwi fruit juice concentrates. *J. Texture Stud.* 26, 137–145.

Jonassen, D. H., Peck, K.L. y Wilson, B.G. (1999). *Learning with technology: A Constructivist Perspective*. Upper Saddle, NJ: Merrill, Prentice Hall.

Karlin M. y Viani N. (2001). *Project-Based Instruction: Creating Excitement for Learning*. Northwest Regional Educational Laboratory.

<http://www.nwrel.org/request/2002aug/projectbased.php>.

Kramer, A. y Twigg, B.A. (1970). En: *Quality control for the food industry*, vol. 1. Ed. por: AVI Publishing Co., Westport, Conn.

Medina M. y Pagano F. (2003). Caracterización de la pulpa de guayaba (*Spidium guajava L*) tipo “criolla roja”. *Revista Facultad de Agronomía (LUZ)* ; 20 (1): 72-86.

Miyawaki O., Liu L., Shirai Y., Sakashita S. y Kagitani K. (2005). Tubular ice system for scale-up of progressive freeze concentration. *Journal of Food Engineering* 69: 107 - 113.

Miyawaki O. (2001). Analysis and control of ice crystal structure in frozen food and their application to food processing. *Food Science and Technology Research* 7: 1_7.

Müller M. y Sekoulov I. (1992). Waste water reuse by freeze concentration with a falling film reactor. *Water Science and Technology* 26: 1475-1482.

Ruiz Y., Sánchez J., Hernández E., Auleda J., y Raventós M. (2010). Viscosidad de zumos comerciales de melocotón, manzana y pera a temperaturas cercanas a la congelación. *Rev. AFINIDAD LXVI* pp. 115 – 118.

Sánchez, J., Ruiz, Y., J.M. Auleda, E. Hernández y M. Raventós (2009). Review. Freeze concentration in the fruit juices industry. *Food Science and Technology International*. 15(4):303_315.

Shaeiwitz Joseph, A. (2001). Teaching design by integration throughout the curriculum and assessing the curriculum using design projects. *International Journal. Engineering Education*. Vol. 17, Nos. 4 y 5, pp. 479-482.

Correspondencia (Para más información contacte con):

Departamento de Ingeniería de Proyectos.

Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

Av. Diagonal Edificio H (ETSEIB) planta 10 (Barcelona) España.

Teléfono: (+34) 934016640

E mail: aguada.garcia@upc.edu, freddy.belen@gmail.com, merce.raventos@upc.edu