



2019 10 al 13 de septiembre - Cartagena de Indias, Colombia

RETOS EN LA FORMACIÓN
DE INGENIEROS EN LA
ERA DIGITAL



REPOSITORIO DIGITAL PARA LA ENSEÑANZA EXPERIMENTAL DEL MODELADO FÍSICO DE PROCESOS METALÚRGICOS

J. Bernardo Hernández Morales

**Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México**

Resumen

En la asignatura optativa “Modelado Físico de Procesos Metalúrgicos y de Materiales” se estudian tanto a sistemas tipo *batch* como continuos. El objetivo de aprendizaje que se persigue es: aplicar, en el laboratorio, los principios de modelación física para comprender el comportamiento de reactores utilizados en el procesamiento de materiales. El curso es de naturaleza teórico-práctica, con énfasis en el trabajo de laboratorio.

Con el reciente aumento de la matrícula en la Licenciatura en Ingeniería Química Metalúrgica, es necesario diseñar e implementar estrategias que hagan eficiente el trabajo en el laboratorio. Para ello, en este proyecto se ha generado un repositorio digital de resultados experimentales, que estará a disposición de los estudiantes. El repositorio consta de videgrabaciones de experimentos y archivos de datos correspondientes (pH vs. tiempo). Para acceder a los recursos digitales se desarrolló una página Web específica para el proyecto.

Se espera que los recursos digitales permitan realizar análisis estadístico confiable, complementando a las mediciones que los estudiantes realizarán en el laboratorio. Es importante aclarar que no se busca substituir a la experiencia del trabajo en el laboratorio si no, más bien, enriquecerla.

En este trabajo se muestran resultados de un modelo físico de un distribuidor de colada continua de acero, para dos valores de altura del metal líquido y de flujo de metal líquido, lo que genera una matriz experimental de cuatro condiciones.

Palabras clave: distribuidor de colada continua; recursos educativos abiertos; videos; datos

Abstract

In the elective course "Physical Modelling of Metallurgical and Material Processes" both, batch as well as continuous systems, are studied. The main learning objective being pursued is to apply, in the laboratory, the principles of physical modelling to rationalize the response of reactors used in materials processing. The course relies heavily on laboratory work.

With the recent increase in the number of students enrolling to obtain a Metallurgical Chemical Engineering degree, designing and implementing strategies to improve the efficiency of laboratory work are necessary. To accomplish this task, in this project, a digital repository of experimental results is being built; it will be available for students. The repository includes videos of experiments and their corresponding data files (pH vs. time). To access the digital resources, a dedicated webpage has been developed.

It is thought that the products of this project will allow students to carry out statistical data analysis with confidence, by supplementing their own data. It is important to mention that the objective is not to eliminate laboratory work but rather to enrich it.

In this work, results obtained with a physical model of a continuous casting tundish, for two values of liquid level and two values of liquid flow are presented.

Keywords: *continuous casting tundish; open learning resources; video; data*

1. Introducción

Con el advenimiento de las tecnologías de la información y la computación (TIC), el desarrollo y uso de recursos educativos abiertos (es decir, aquellos que están disponibles libremente para todo público) se ha convertido en un tema central para apoyar el proceso enseñanza-aprendizaje. Geser (2007) ha listado los beneficios que pueden esperarse de ese tipo de recursos: 1) son gratuitos y están disponibles públicamente; 2) pueden usarse y re-usarse; 3) pueden adaptarse para una aplicación distinta a aquella para la que fueron diseñados; 4) pueden mejorar la enseñanza, apoyándose en el trabajo de otras personas; y 5) su desarrollo es un fenómeno global, por lo que pueden cruzar fronteras. Para facilitar el acceso a estos recursos, es práctica común alojarlos en repositorios digitales.

En años recientes, la matrícula de la Licenciatura en Ingeniería Química Metalúrgica que se imparte en la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) ha aumentado significativamente; así, la Generación 2019-1 contó con 170 alumnos de 1er ingreso a esa Licenciatura. Este aumento en la matrícula puede interpretarse como un punto positivo en cuanto al grado de visibilidad de esta licenciatura, pero tiene el efecto negativo de saturar los grupos de laboratorio. En el caso de la asignatura "Modelado Físico de Procesos Metalúrgicos y de Materiales", aunque se trata de una asignatura optativa, se ha trabajado con dos grupos durante los semestres recientes. En cada grupo es común que se inscriban los diez alumnos que se admiten como máximo, además de algunos estudiantes adicionales que se inscriben mediante un

mecanismo conocido como “por formato”. Dado que cada experimento puede realizarse con solo de 3 a 4 estudiantes, el tener muchos más estudiantes provoca que haya tiempos muertos para varios de ellos en una sesión dada. Además, como son estudiantes en proceso de aprendizaje, ocurre que algunos experimentos no se realizan correctamente – que es lo que sucede en la vida profesional – por lo que al final de una serie de sesiones en el laboratorio, podría no contarse con suficientes datos validados como para trabajar la información experimental estadísticamente. Al respecto, en el trabajo de laboratorio para tesis de posgrado que utilizan modelado físico, usualmente se realizan hasta diez réplicas de cada condición experimental. Esto se debe a que el flujo de fluidos al interior de los modelos físicos es, en la mayoría de los casos, turbulento.

Para atender estos problemas (comunes a la mayoría de las asignaturas que incluyen sesiones de laboratorio), en este proyecto se está generando un repositorio digital de resultados experimentales validados que estará a disposición de los estudiantes. El repositorio incluirá tanto datos de la respuesta de modelos físicos a la adición de un trazador como la videograbación correspondiente. La premisa es que, teniendo acceso a esa información, el análisis del trabajo experimental se enriquecerá significativamente. Al respecto, cabe recordar que la capacidad de análisis es un aspecto fundamental en la formación de un@ Ingenier@.

La hipótesis de trabajo puede enunciarse, entonces, como sigue: Si los estudiantes de la asignatura “Modelado Físico de Procesos Metalúrgicos y de Materiales” que se imparte en la Facultad de Química de la UNAM tienen acceso a datos validados de la respuesta a la adición de un trazador en un modelo físico, junto con videograbaciones de la evolución de la distribución de color al interior del modelo, la etapa de análisis de los datos tomados en las sesiones presenciales en el laboratorio se enriquecerá significativamente.

Es así, que se sometió a concurso y se obtuvo financiamiento para el proyecto “Materiales de apoyo para la enseñanza experimental del modelado físico de procesos metalúrgicos”. El objetivo del proyecto es construir un repositorio digital de resultados experimentales, validados, obtenidos en el laboratorio usando modelos físicos.

En la Ingeniería contemporánea, la modelación física es una herramienta muy importante, útil tanto para un primer acercamiento como para entender el comportamiento de un sistema y obtener mediciones que pueden escalar para diseñar un reactor de tamaño real. Por otra parte, los resultados de las mediciones realizadas en un modelo físico se utilizan comúnmente para validar a los modelos matemáticos desarrollados para predecir el comportamiento del sistema. Los modelos físicos se construyen con materiales que permiten realizar observaciones y mediciones con relativa facilidad y, usualmente, a escala del sistema real; en cuanto a nomenclatura, al sistema real se le denomina *prototipo*, mientras que a su representación en el laboratorio se le conoce como *modelo* (Szekely *et al.*, 1988).

El diseño de modelos físicos se basa en criterios de similitud que proveen de la información necesaria para definir los valores de todas las variables de diseño utilizadas en el modelo (Guthrie, 1992). Los criterios de similitud deben definirse de tal manera que se asegure la correspondencia no solo geométrica entre el modelo y el prototipo sino también del comportamiento de los campos relevantes para el proceso de interés. Este comportamiento se caracteriza tanto por los valores de

los campos como por los valores de los números adimensionales significativos para el proceso a modelar.

En este artículo se reportan los avances del proyecto. En particular, se muestran resultados para un modelo físico de un distribuidor de colada continua, que es un reactor metalúrgico (alimentado por acero líquido proveniente de la olla) que provee de acero líquido a los moldes donde se lleva a cabo la solidificación del acero (United States Steel Corporation, 1985). El proceso es continuo y opera bajo condiciones de estado cuasi-estable, es decir, el nivel del acero líquido se mantiene aproximadamente constante. Sin embargo, el flujo en el interior del distribuidor no es ideal (Sahai *et al.*, 1996), lo que promueve el enfriamiento estratificado del metal líquido y el arrastre de residuos no metálicos hacia el seno de este.

Para estudiar al flujo de fluidos en reactores con flujo continuo (como es el caso de un distribuidor de colada continua), mediante modelos físicos, es común utilizar técnicas de estímulo-respuesta. Para ello se inyecta un trazador a la entrada del reactor y se mide la concentración de este a la salida. La inyección puede ser en escalón o en forma de pulso (idealmente instantáneo).

Se han generado videos y se han recolectado datos, utilizando un modelo físico de un distribuidor de colada continua, para diversas combinaciones de dos variables de proceso de interés: 1) flujo volumínico alimentado al modelo físico y 2) altura del líquido contenido en el modelo físico. Los recursos digitales pueden accederse a través de una página Web dedicada.

2. Metodología

Se construyó un modelo físico que representa a un distribuidor de colada continua de dos hilos (es decir, con dos salidas). El modelo se construyó con acrílico y mide $84 \times 11 \times 15$ cm (ver Figura 1).

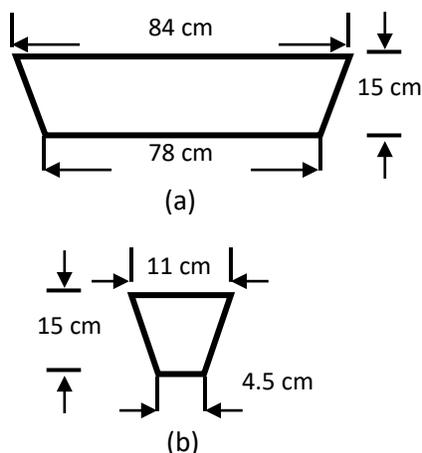


Figura 1. Representación esquemática del modelo físico: a) vista frontal, b) vista lateral.

Para simular el flujo de acero a través del sistema, se utilizó una bomba hidráulica marca Truper de $\frac{1}{4}$ de caballo, regulada por un rotámetro marca Cole Parmer (escala: 1-15 LPM), y dos llaves a la salida del distribuidor para regular el flujo. El agua que salía del distribuidor se colectaba en un contenedor colocado debajo del mismo. Cerca de la entrada al distribuidor se adaptó una entrada para una jeringa (sin aguja) de 5 mL, para inyectar el trazador. Se conectó un potenciómetro IQ Scientific Instruments modelo IQ 270GB, para registrar el pH como función del tiempo. Para recircular el agua se utilizó una bomba sumergible en el tanque receptor de agua, colocado debajo de las salidas del distribuidor; con esto es posible reducir significativamente la cantidad de agua utilizada en cada experimento.

La preparación de los experimentos consistió en alcanzar estado cuasi-estacionario (es decir, que el nivel del agua dentro del modelo físico se mantuviera constante) regulando las salidas del distribuidor y bombeando el agua de la salida de nuevo al tanque principal.

Se preparó un trazador ácido empleando 1 mL de disolución a 60 gramos por litro de colorante azul en polvo #1710 mezclado con 4 mL de H_2SO_4 concentrado por prueba. Esta mezcla produce un trazador colorido y ácido. También se alineó una cámara tipo Reflex (Marca Nikon D5200) frente al modelo, para videograbar la evolución de la distribución del trazador dentro del modelo.

Una vez alcanzado estado cuasi-estable, se inyectó el trazado y se re-direccionó la salida de agua del distribuidor, que ya contendría trazador, a un tanque secundario. La adquisición de los datos del potenciómetro se realizó con el *software* SmartLogger (con una frecuencia de adquisición de 1 Hz) a la par de la grabación del experimento, realizando la inyección del trazador en el segundo 10 de cada prueba. Los ensayos llegaban a su fin una vez que el distribuidor no mostrara más rastros de trazador.

El modelo físico permitió la realización de los experimentos a dos condiciones de flujo (6 y 8 litros por minuto) y a dos niveles de agua dentro del distribuidor (10 y 13 cm de altura).

Los videos obtenidos de cada prueba se procesaron empleando el *software* libre DaVinci Resolve Studio 15 de Blackmagic Design realizando los siguientes ajustes:

1. Corte de 5 segundos al inicio de la grabación
2. Corrección del ángulo de grabación y alineación de cuadro
3. Desactivación del canal de audio
4. Ajuste de contraste, exposición y color
5. Exportación de una copia del video en colores negativos

Los videos (tanto en "positivo" como en "negativo") y los datos (pH local vs. tiempo) correspondientes fueron validados por los profesores que imparten la asignatura y se almacenan en un repositorio digital en un servidor local de la Facultad de Química de la UNAM. Para acceder a los materiales digitales se diseñó la página Web "Modelado Físico de Procesos Metalúrgicos y de Materiales", cuya URL es: <http://depa.fquim.unam.mx/modeladofisico/>.

3. Resultados y análisis de resultados

A partir del registro de datos de pH, se pueden trazar curvas tiempo-diferencia de pH (con respecto al pH inicial dentro del distribuidor) como la que se muestra en la Figura 2.

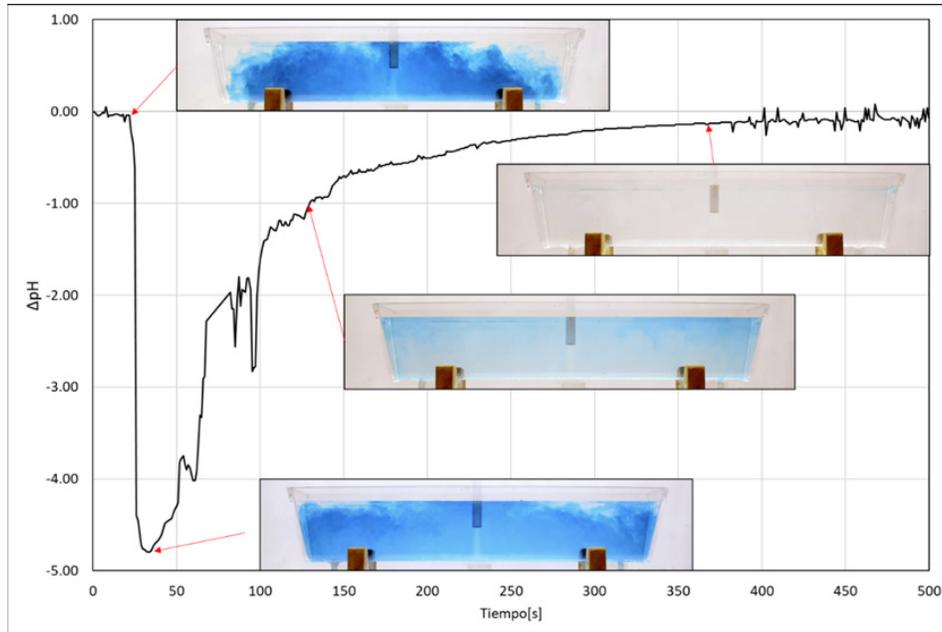


Figura 2. Evolución del ΔpH y fotogramas durante la prueba a 6 LPM con nivel de 13 cm.

El ΔpH inicial es cero, se mantiene durante un tiempo corto y luego disminuye (porque el trazador es ácido) rápidamente, hasta alcanzar un valor mínimo; luego, la curva disminuye suavemente, hasta llegar a un valor cercano al valor inicial. En la imagen se agregaron algunos fotogramas del video correspondiente, para relacionar a la distribución instantánea del trazador con el valor de ΔpH .

A partir de este tipo de curvas, se obtuvo el tiempo de mezclado local como el tiempo a partir del cual se tiene una lectura de pH aproximadamente constante y similar al valor inicial. El tiempo de mezclado global se estimó a partir de las videograbaciones en "negativo" de cada prueba (ver un ejemplo de fotograma de un video en "negativo" en la Figura 3), determinando el tiempo cuando no se apreciaba colorante dentro del distribuidor.



Figura 3. Fotograma en "negativo" para una prueba con flujo de 6 LPM y nivel de 13 cm.

Los valores de tiempo de mezclado, local y global, se resumen en la Tabla 1.

Tabla 1. Tiempos de mezclado [s] dentro del distribuidor.

Nivel	Local		Global	
	6 LPM	8 LPM	6 LPM	8 LPM
10 cm	240	190	231	183
13cm	397	280	406	241

Para distribuir la información generada con este proyecto, se ha desarrollado una página Web (<http://depa.fquim.unam.mx/modeladofisico/>). En la Figura 4 se muestra una captura de pantalla de la página principal.

En una segunda etapa del proyecto, se trabajará con un modelo físico de un convertidor Peirce-Smith, que se utiliza en la industria del cobre.

Por políticas de la UNAM, el contenido digital está abierto, así es que los recursos digitales producidos en este proyecto podrán utilizarse por cualquier estudiante o profesor interesados en el tema.

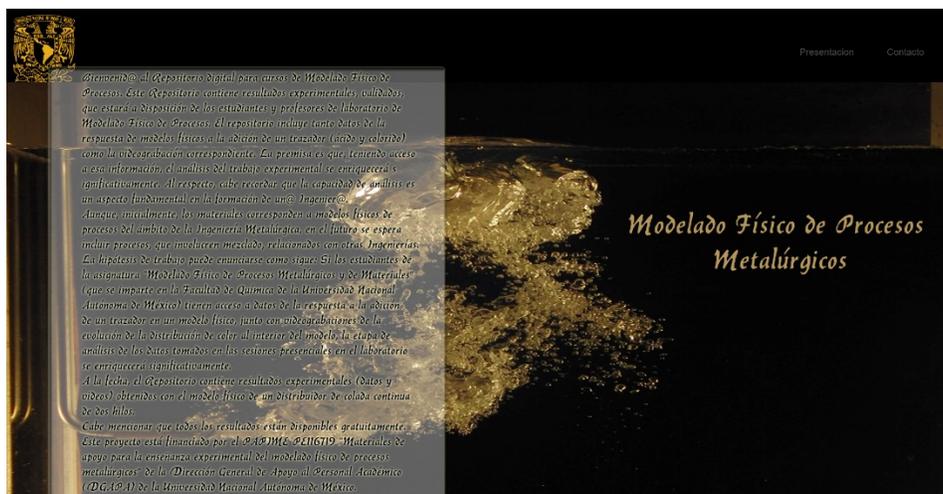


Figura 4. Captura de pantalla de la página principal de la página Web del proyecto.

4. Conclusiones

Para coadyuvar a la enseñanza experimental del modelado físico de procesos metalúrgicos y de materiales, se están generando recursos educativos abiertos, alojados en un repositorio digital al que se puede acceder mediante una página web dedicada. Dado que los recursos están validados, se espera que los estudiantes puedan utilizarlos, junto con sus propios datos, para realizar análisis estadístico de mediciones realizadas en los modelos físicos.

5. Agradecimientos

Este proyecto está siendo financiado por el **PAPIME PE116719** "Materiales de apoyo para la enseñanza experimental del modelado físico de procesos metalúrgicos" de la Dirección General de Apoyo al Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM).

Agradezco la colaboración del Ing. Químico Metalúrgico Ricardo Agustín Sánchez Mancera y del Pasante de Ing. Químico Metalúrgico Alfredo Fuentes Núñez, tanto en la realización de los experimentos como en la edición de los videos. La I.Q. Iliana Zaldívar Coria es la *webmaster* de la página Web que aloja a los materiales de este proyecto.

6. Referencias

- Geser, G. (2007). Open educational practices and resources; OLCOS Roadmap 2012. Consultado el 10 de junio de 2019 en http://www.olcos.org/cms/upload/docs/olcos_roadmap.pdf
- Guthrie, R.I.L. (1992). Engineering in Process Metallurgy. Oxford Science Publications, Oxford, Capítulo 3.
- Szekely, J., Evans, J.W. and Brimacombe, J.K. (1988). The Mathematical and Physical Modeling of Primary Metals Processing Operations. John Wiley & Sons, New York, Capítulo 3.
- Sahai Y. and Emi T. (1996). Melt flow characterization in continuous casting tundishes. ISIJ International, Vol 36, No. 6, pp. 667-672.
- United States Steel Corporation (1985). The making, shaping and treating of steel, 10ª edición. AISE Steel Foundation, Pittsburgh, Pennsylvania, USA, p. 198.

Sobre el autor

- **J. Bernardo Hernández Morales:** Ing. Químico Metalúrgico por la U. Nacional Autónoma de México, M. Eng. (Ing. Metalúrgica) por la U. of British Columbia (Canadá), Dr. (Ing. Metalúrgica y de Materiales) por la U. of British Columbia (Canadá). Prof. Titular "A", T.C. bernie@unam.mx

Los puntos de vista expresados en este artículo no reflejan necesariamente la opinión de la Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería.

Copyright © 2019 Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería (ACOFI)