

# ANÁLISIS DE UN MODELO DE SIMULACIÓN DE PELÍCULAS LIQUIDAS DELGADAS

Sotelo-Pineda, Omar (1); Minchaca-Mojica, Jesús Isaac (2)

1 [Licenciatura en Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: o.sotelopineda@ugto.mx

2 [Departamento de Ingeniería Química, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato] | Dirección de correo electrónico: [jminchaca@ugto.mx]

## RESUMEN

Las películas líquidas pueden verse involucradas de manera crítica en procesos industriales que requieran de un enfriamiento con contacto directo, tales como la fabricación de acero por colada continua. Existen pocas investigaciones sobre el comportamiento de estas películas delgadas que presentan cierta complejidad para poder predecir su comportamiento. Esto resulta de suma importancia para conocer cómo afecta la formación de estas películas en la extracción de calor durante el enfriamiento. En este trabajo se analiza un modelo de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) de naturaleza estocástica/determinística para simular el comportamiento de películas líquidas delgadas con el fin de adaptarlo a un mayor rango de condiciones de operación y de impacto de las gotas de rocío. Se analizaron los distintos parámetros de entrada del modelo, las ecuaciones que lo conforman, los métodos de solución implementados y los resultados obtenidos por el modelo bajo un amplio rango de condiciones de operación y parámetros hidrodinámicos de los rocíos y nieblas. Los resultados muestran que el modelo es capaz de simular condiciones de velocidades de impacto hasta de 20m/s y diámetros de gota de 15 micras.

## ABSTRACT

Liquid films can play a critical role in industrial processes that require cooling by direct contact, such as production of steel by continuous casting process. There are not many investigations about the behavior of thin liquid films and prediction of this behavior is not an easy task. Knowledge of the film behavior is of crucial importance in order to understand both formation and correlation with heat extraction during the cooling process. In this work a Stochastic/Deterministic Computational Fluid Dynamic (CFD) model to simulate the behavior of thin liquid films in order to adapt it to a wider range of operating conditions and droplet impacts of air-mists was analyzed. Different input parameters, equations involved, solution methods that are implemented and the results obtained with the model under a wide range of operating conditions –and hydrodynamic spray and air-mists parameters were considered. Results show that the model is capable to simulate conditions with impact velocities up to 20 m/s and droplet-diameter up to 16 microns.

### Palabras Clave

CFD; Modelo; Películas Líquidas Delgadas; Enfriamiento

## INTRODUCCIÓN

Las películas líquidas delgadas juegan un rol crítico en gran variedad de procesos como lo son: el enfriamiento de metales, el funcionamiento de motores de combustión interna, tratamientos dermatológicos, etc. En cualquiera de los casos anteriormente mencionados existe la interacción rocío-superficie, la cual representa un fenómeno muy complejo [1] que, tratándose de rocíos densos, existen interacciones entre las mismas gotas, también es importante mencionar que en todos estos sistemas las gotas inciden inicialmente sobre una superficie que rápidamente evoluciona a uno donde se tiene una película líquida sobre la superficie. La Imagen 1 muestra de manera esquemática una forma en la que uno de estos sistemas es representado.

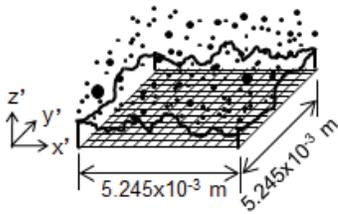


IMAGEN 1: Representación de película líquida delgada siendo impactada

### Simulación

La complejidad y variedad de los movimientos que presenta el agua en sistemas como este como se puede observar en el esquema de la imagen 1, representan un verdadero reto para la simulación. Algunos de los retos que están presentes en la simulación de la película líquida delgada son:

- Las interacciones entre gotas que impactan, las cuales afectan la transferencia de masa y momentum.
- Las gotas impactan con diámetros y velocidades muy variados.

Minchaca [1] menciona en su artículo que es necesario el uso de sub-modelos que realicen

distintas consideraciones de acuerdo a la aplicación, estas consideraciones son:

- El momentum con el que impactan las gotas sobre la película
- El espesor de la capa de líquido
- La gravedad y tensión superficial
- El cambio de fase, para enfriamientos con rocíos

Todos estos sub-modelos se ven implementados en el programa computacional, como funciones de las cuales depende el código principal.

$$\frac{\partial h'}{\partial t} + \frac{\partial(uh')}{\partial x} + \frac{\partial(vh')}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial(uh')}{\partial t} + \frac{\partial\left(u^2h' + \frac{g}{2}h'^2\right)}{\partial x} + \frac{\partial(uv'h')}{\partial y} = 0 ; \quad \frac{\partial(vh')}{\partial t} + \frac{\partial(uv'h')}{\partial x} + \frac{\partial\left(v^2h' + \frac{g}{2}h'^2\right)}{\partial y} = 0$$

IMAGEN 2: Ecuaciones de aguas poco profundas (SWE).

### Modelación

Se ha probado que las ecuaciones de aguas poco profundas (shallow water equations SWE, véase imagen 2) permiten modelar la propagación de las perturbaciones que se pueden tener en agua como en otros fluidos incompresibles [3]. Es importante mencionar que para que se considere como poco profundo, la escala de longitud vertical sea pequeña en relación a la escala de longitud horizontal. El objetivo principal de esta investigación es el análisis de un modelo computacional desarrollado para representar la dinámica de movimiento de las películas líquidas, teniendo como primera meta comprender el funcionamiento de éste y así poder ver que tan factible es que sea usado para la simulación del impacto de las gotas generadas en un rocío en el proceso industrial para la fabricación de acero por colada continua, bajo un mayor rango de condiciones. Se tiene como meta final plantear posibles adaptaciones al modelo de modo tal que permita simular y representar películas líquidas bajo un mayor rango de condiciones.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizó el código computacional del modelo en una computadora personal (laptop). Las

especificaciones técnicas se muestran en la Tabla 1, con la versión del software de MATLAB R2014b.

Tabla 1: Especificaciones técnicas del pc utilizada

Dispositivo	Descripción
1. Procesador	4 AMD A8 4555M APU a 1.60 GHz
2. RAM	Capacidad de 8Gb, 7.19 utilizables
3. ROM	Capacidad de 500 Gb, 140 Gb libres
4. Tarjeta grafica	Radeon™HD graphics integrada en el procesador
5. Arquitectura	64 bits

La metodología que se siguió inició con una depuración rápida del código fuente, en busca de errores comunes en programación, como lo son bucles abiertos, falta de elementos de jerarquización como corchetes y paréntesis, la implementación inadecuada de una variable, etc. Ésta se llevó a cabo línea por línea, las cuales suman un total de 1356 líneas. La depuración sirvió para poder comprender el funcionamiento del programa computacional. Terminada dicha actividad se realizó la primera corrida del programa completo el cual consiste, en un código(script) principal, 13 funciones las cuales auxilian al código principal, y 4 archivos .txt los cuales contienen como información experimental de entrada al modelo (tamaño, velocidad y ángulo de incidencia de las gotas); la primera corrida se realizó con el fin comprobar que el modelo regido por las ecuaciones de aguas poco profundas estuviera funcionando de manera correcta, usando una gota a distintos tamaños y velocidades de incidencia, posteriormente se aumentó el número de gotas que incidían en la película, hasta observar el punto en que el programa no fuera capaz de crear una simulación correcta, a partir de aquí se procedió a generar hipótesis y probar de cómo se puede adaptar o modificar el programa

para superar las dificultades de simulación que este presentó.

Para las corridas se establecieron los parámetros iniciales como se muestra en la Tabla 2 las cuales son justificadas por [1].

Tabla 2: Valores de los parámetros iniciales en el modelo original

Parámetro	Valor
1. Temperatura del agua	25 °C
2. Temperatura del sólido	25°C
3. Densidad del fluido	998 kg/m <sup>3</sup>
4. Tensión superficial	7.28x10 <sup>-5</sup> N/m
5. Tamaño en x de la película	5.245x10 <sup>-3</sup> m
6. Tamaño en y de la película	5.245x10 <sup>-3</sup> m
7. Numero de celdas	100
8. Tamaño de paso de tiempo	9x10 <sup>-6</sup> s

También es importante mencionar las consideraciones que se hacen para este modelo son [1]: a) Sistema isotérmico, b) El dominio se considera en coordenadas rectangulares, c) La formación de la película es instantánea, d) El movimiento de líquido entre las celdas se debe a gradientes de presión, e) No se considera la formación de gotas secundarias, f) Al impactar, las gotas transfieren el momentum a la película, g) las fuerzas viscosas se consideran mediante el parámetro de fricción  $\zeta$  incluido en las SWE, h) Se considera el modelo constituido por tres sub-modelos: el rocío, la superficie y el volumen.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Podemos dividir los resultados en tres secciones. En la primera se presenta una reseña de los errores y pequeñas modificaciones del código, en la segunda se muestran cómo es que corre la simulación con distintas pruebas, y por último se

discutirán las posibles correcciones al programa para que sea útil en la simulación de la fabricación de acero por colada continua.

## Depuración del programa

No se encontró ninguno de los errores comunes de programación, simplemente se le hizo la misma modificación en las funciones de lectura de los archivos .txt, en la imagen 3 podemos ver la modificación y la imagen 4 el código original.

```
global paangxi;
global paangxi;
fid = fopen('angles.txt','r');
maxrengs=0; % Numero maximo de datos en el archivo de lectura
while feof(fid) == 0 % ciclo para conocer el valor de maxrengs
    angulo=fgetl(fid);
    maxrengs=maxrengs+1;
end % fin del ciclo para conocer el valor de maxrengs
fclose(fid);
angulos=zeros(maxrengs,1); % vector para almacenar los datos
fid = fopen('angles.txt','r');
i=1; % Contador de datos
angm=0.0; % angulo máximo
angmi=0.0; % angulo mínimo
while feof(fid) == 0 % ciclo para leer los ángulos y pasarlos al vector
    angulo=fgetl(fid);
    angulo=str2double(angulo); % convierte a numero
    angulos(i,1)=angulo;
    if (angulo>angm)
        angm=angulo;
    end
    if (angulo<angmi)
        angmi=angulo;
    end
    i=i+1;
end % fin del ciclo para leer los angulos y pasarlos al vector
fclose(fid);
no_int=((angm-angmi)/tamano_int); % Numero de intervalos
```

IMAGEN 3: Código original para la carga y lectura de los archivos txt, este caso es para el archivo txt en donde residen los datos experimentales de los ángulos de impacto

```
global paangxi;
load angles.txt;%carga los datos en un vector
angulo=angles;%deposita los datos en el nuevo vector
n1=size(angulo);%define las dimensiones del vector
maxrengs=n1(1,1);%indica el numero de datos contenidos en el vector
angulos=sort(angulo,'descend');%realiza el acomodo del vector en forma descendiente
angm=max(angulos);%selecciona el diametro maximo
angmi=min(angulos);
no_int=((angm-angmi)/tamano_int); % Numero de intervalos
no_int=floor(no_int)+1; % Redondea al entero proximo hacia abajo
```

IMAGEN 4: Código modificado para la carga y lectura de los archivos txt en la función lee\_angulos.

También se modificaron el intervalo de pasos para imprimir las alturas a 1000 y el intervalo de pasos para actualizar la gráfica en la pantalla a 1, para lograr un efecto de cámara lenta en la simulación ya que el paso de tiempo es muy pequeño.

## Pruebas al modelo

Para conocer cuáles son las limitaciones del modelo, se comenzó con la simulación de una gota. Dentro de estas pruebas se varía su diámetro, imagen 6, su velocidad, imagen 5 y el número de gotas, imagen 7, de las cuales se puede observar que el modelo es capaz de predecir situaciones con gotas cuya velocidad de impacto no supere los 35 m/s aproximadamente, tengan diámetros hasta de 15 micrómetros, también como podemos observar en la imagen 7 si mantenemos las gotas generadas debajo de estos límites de diámetro y velocidad obtenemos una simulación muy buena.

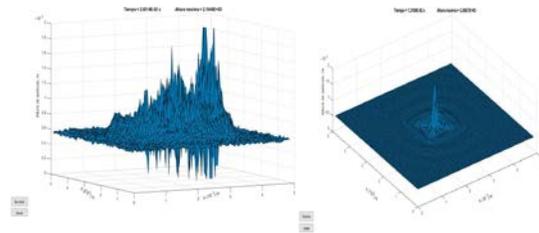


IMAGEN 5: Este es el resultado del impacto de una gota en la película delgada, en ambas simulaciones el diámetro de la gota es de 14 micras, en la imagen izquierda impacta a una velocidad de 35 m/s y en la imagen derecha a una velocidad de 15 m/s

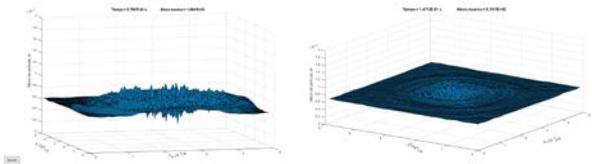


IMAGEN 6: Este es el resultado del impacto de una gota en la película delgada, en ambas simulaciones la velocidad de impacto es de 1 m/s, en la imagen izquierda impacta con un diámetro de 20 micras y en la imagen derecha con un diámetro de 15 micras

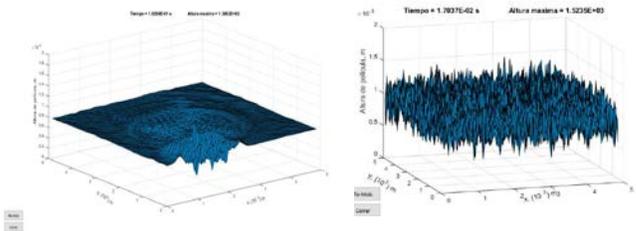


IMAGEN 7: En la imagen de la izquierda observamos la interacción entre dos gotas que impactaron de manera aleatoria pero simultánea, en la imagen de la derecha podemos ver las

interacciones de 11303 gotas todas a velocidades y diámetros menores a 30 m/s y 15 micras.

### Propuestas de mejoramiento del código

La hipótesis inicial fue modificar el tamaño de paso, bajo la premisa que entre más grande el tamaño de paso más rápido alcanzaría el estado estable, sin embargo, este tamaño afecta directamente a la cantidad de volumen de agua que impacta la película y el aumento de éste llevaría a una cantidad de volumen mucho mayor, y con menos posibilidades de obtener una representación acertada del sistema. La segunda hipótesis propuesta fue la de aumentar el número del intervalo de pasos para imprimir las alturas cada 1000 y el intervalo de pasos para actualizar la gráfica en la pantalla cada 1, bajo la misma premisa de lograr ver un estado estable con más claridad, lo cual se logró, dando un efecto de cámara lenta, para complementar se hicieron algunas pruebas con el uso de un sombreado interpolado (shading interp), y una escala colores más variada como se puede ver en la imagen 8

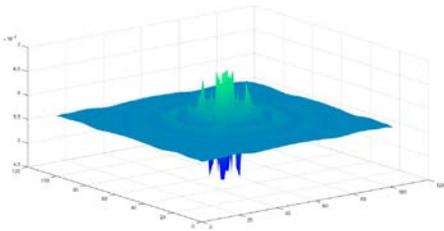


IMAGEN 8: Modificación de la escala de colores y sombreado del impacto de una gota a 15 m/s y 12 micras de diámetro, se puede ver una imagen con bordes más suaves.

### CONCLUSIONES

El modelo resultó ser bueno para la predicción del comportamiento de la película líquida delgada, al ser impactada por gotas de hasta 15 micrómetros de diámetro y velocidades de impacto hasta 20 m/s. En la imagen 8 se puede apreciar cómo se logra una buena aproximación del comportamiento real. El siguiente paso en este proyecto consistirá en realizar un análisis más minucioso del modelo y de la física involucrada de modo que se puedan

considerar condiciones de gotas con mayores diámetros y velocidades de impacto, así como la formación de gotas secundarias. Este modelo tiene permitido una simulación exitosa del impacto de 11303 gotas, con la configuración idónea, podrá ser usado para la simulación del proceso industrial de fabricación de acero por colada e infinidad de procesos más.

### AGRADECIMIENTOS

Principalmente quiero agradecer al que alguna vez fue mi maestro de programación el Dr. Jesús Isaac Minchaca, por despertar en mí el interés en el desarrollo de herramientas computacionales enfocadas a solucionar problemas presentes en mi medio y por guiarme durante todo este proyecto. De igual manera dar las gracias a mis padres José Dolores Sotelo y Yuli Pineda, por siempre brindarme su apoyo incondicional, el cual espero nunca perder. También a mi pareja Sandra Janet por darme una sonrisa cuando más lo necesito y hacer de mis días en la universidad una alegría.

### REFERENCIAS

- [1] Minchaca Mojica, J. I., Uribe Ramírez, A. R. & Alfaro Ayala, J. A. (2014). Modelación con dinámica de fluidos de las películas de líquido formadas en el enfriamiento de superficies calientes. Memorias del XXXV Encuentro Nacional de la AMIDIO, 35(1), pp. 2223-2228. ISBN 978-607-95593-2-8
- [2] Minchaca Mojica, J. I., Uribe Ramírez, A. R. & Alfaro Ayala, J. A. (2014). Formation Time of Liquid Films Generated by Water Spays and Air-Mists with Numerical Simulations. ILASS Americas 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Spray Systems, 26(1), pp. 1-10.
- [3] C. Moler, "Shallow Water Equations", Experiments with MatLab. Natick, MA: The MathWorks, Inc., August 8, 2009.