



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAestrÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
INGENIERÍA MECÁNICA
TERMOFLUIDOS

SIMULACIÓN NUMÉRICA DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR Y MASA
DE UN TREN DE MUESTRAS DE ALIMENTO POR DESHIDRATACIÓN
CONVECTIVA

TESIS
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN INGENIERÍA MECÁNICA

PRESENTA:
BRIAN MELCHOR CASTILLA

TUTOR PRINCIPAL
DR. MARTÍN SALINAS VÁZQUEZ
INSTITUTO DE INGENIERÍA

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., DICIEMBRE 2023



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Vicente y Rodríguez William
Secretario: Dr. Sánchez Minero Salvador Enrique
1 er. Vocal: Dr. Salinas Vázquez Martín
2 do. Vocal: Dr. Ramírez Cruz Jorge
3 er. Vocal: Dr. Monsivais Montoliu Ian Guillermo

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Instituto de Ingeniería.

TUTOR DE TESIS:



Dr. Martín Salinas Vázquez

Agradecimientos

Al Dr. Martin Salinas Vázquez, por su tiempo, paciencia y dedicación para la elaboración de esta tesis.

A mis padres, por su amor, comprensión y apoyo incondicional.

A mi hermana, por brindarme consejos y alegría en momentos complicados.

A mi familia, por su afecto que nos hace muy unidos.

A Oswaldo y Yeni, por su cariño y confianza.

A Ivanna, mi bendición.

A Alejandra, por su compañía, consejos y comprensión.

A la Dra. Laura Carolina Lara Guzmán, por su tiempo, apoyo y enseñanza para realizar este trabajo.

Resumen

En el presente trabajo se estudia el proceso de secado por convección forzada de muestras de alimento. La deshidratación convectiva implica el estudio del flujo alrededor del alimento y la transferencia de calor y masa dentro del mismo alimento. Estos dos fenómenos son acoplados por un sistema conjugado, el cual es modelado por la Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) utilizando un código creado en el lenguaje de programación Fortran. En el flujo el modelo de turbulencia es descrito por la simulación de grandes escalas (LES). Por otro lado, el encogimiento y la decoloración del alimento no es considerado para este trabajo. El código numérico empleado fue validado para dos tipos de flujos: el primero es un flujo a través de un cubo sólido y el segundo es un flujo a través de un tubo de sección cuadrada.

Se plantean dos casos de estudio para analizar la transferencia de calor y masa dentro del alimento, para así obtener un arreglo que favorezca el proceso de deshidratación. Para ambos casos, la temperatura del flujo externo es de 80 [°C] y la del alimento es la temperatura ambiente, mientras que la concentración inicial es de 4.5 [kg/kg].

En el primer caso se considera un tren de nueve muestras cúbicas de alimento expuestas al flujo de aire caliente. La separación entre las muestras de alimento es un factor importante para el proceso de secado, por lo que se consideraron diferentes longitudes de separación para su estudio.

En el otro caso se establece un sólido cúbico expuesto a diferentes perfiles de entrada del flujo, utilizando diferentes ángulos de inclinación en el plano xy . Las inclinaciones establecidas son de 10°, 20°, 30° y 45°. Se imponen condiciones de frontera periódicas de carácter numérico en las tres direcciones, esto con el fin de establecer el comportamiento con más sólidos que lo rodean, así simulando una cámara de secado.

Los resultados obtenidos son la caracterización del flujo, análisis del campo de velocidad, análisis de intensidades turbulentas; mientras que para los sólidos se presentan contornos de temperatura y humedad instantánea.

Respecto a los resultados del primer caso, se determinó que la distancia mínima de separación no favorece la transferencia de calor y masa, mientras que a longitudes mayores favorece el secado del alimento. Además, se observa que en los primeros sólidos se presentan gradientes de temperatura considerables, en especial en la cara frontal del primer sólido. Por otro lado, la remoción de humedad superficial es más rápida que la difusión de humedad dentro del sólido. Sin embargo, la difusión de humedad es menor que la difusión de temperatura.

Las simulaciones del segundo caso mostraron que entre mayor es la inclinación del perfil del flujo, favorece la transferencia de calor y transferencia de masa. Se observó que la inclinación de 45° presentó el menor contenido de humedad del sólido en el proceso de secado, debido a que se presentan más zonas de fluctuación de velocidad, lo cual beneficia la remoción de humedad.

Índice

Contenido

Índice	5
1. Introducción	8
1.1 Deshidratación	8
1.2 Humedad	11
1.3 Actividad de agua	12
1.4 Deshidratación convectiva	13
1.5 Inconvenientes del proceso de secado	16
2. Ecuaciones de Gobierno	17
2.1 Ecuaciones de flujo externo	17
2.1.1 Ecuaciones de flujo externo adimensionales	18
2.1.2 Modelo de turbulencia (L. E. S.)	21
2.1.3 Coordenadas generalizadas	23
2.1.4 Esquema numérico	24
2.2 Ecuaciones de sólido	25
2.3 Condiciones de frontera	26
2.3.1 Navier – Stokes Characteristic Boundary Conditions (NSCBC)	26
2.3.2 Condiciones de frontera periódicas	26
3. Validación	28
4. Configuración de simulación numérica	32
4.1 Caso A	32
4.2 Caso B	34
4.3 Características de la malla computacional	34
4.4 Condiciones iniciales y frontera	35
4.4.1 Caso A	35
4.4.2 Caso B	38
5. Resultados	39
5.1 Caso A	41
5.1.1 Velocidad	41
5.1.2 Temperatura	51

5.1.3	Humedad.....	57
5.2	Caso B.....	61
5.2.1	Velocidad.....	61
5.2.2	Temperatura.....	65
5.2.3	Humedad.....	69
6.	Conclusiones.....	71
	Bibliografía	73

Objetivo general

Determinar el comportamiento de un tren de muestras de papa bajo un proceso de deshidratación convectiva.

Objetivos particulares

Proponer y analizar arreglos de tren de muestras de alimento basados en la longitud de separación y la inclinación del flujo de entrada.

Obtener los campos de velocidad, temperatura y humedad para cada arreglo del tren de muestras.

Determinar arreglos que sean favorables para el calentamiento homogéneo del alimento y la remoción de humedad.

Motivación

La deshidratación convectiva es una técnica ampliamente usada en la industria alimentaria, la cual se caracteriza por requerir largos tiempo de secado. Esto involucra una mayor demanda de energía para mantener la alta temperatura del flujo. Diversos estudios han analizado la deshidratación para frutas y verduras con diversas geometrías: cubos, cilindros o placas planas. Si bien se han realizado investigaciones en deshidratación convectiva empleando análisis numéricos, los estudios han sido abarcados para una muestra de alimento. No obstante, los deshidratadores industriales involucran una enorme cantidad de muestras de alimento, las cuales dependen del tamaño del deshidratador, geometría y tamaño del sólido, como en la forma que se ubican dentro de este. En este trabajo se establece la geometría y tamaño del sólido, por lo que la ubicación de los sólidos es una manera de analizar el proceso de secado.

Es por ello que se plantea estudiar la interacción de un tren de muestras de alimento, donde el dominio de la simulación numérica es una porción de la cámara de secado del deshidratador. Se toma en cuenta la longitud de separación entre sólidos y también la dependencia del perfil de entrada del flujo en el deshidratador, este último basándose en el ángulo de inclinación respecto al plano xy . Aunque no se considera la decoloración y el cambio de volumen en los alimentos, estos son considerados en base a los perfiles de temperatura y humedad que se presentan en los sólidos. Se ha reportado que la presencia de altas temperaturas en la superficie del sólido impacta negativamente en la decoloración y la remoción de humedad, perjudicando la deshidratación.

En base a lo anterior este trabajo busca obtener un arreglo que favorezca la deshidratación en los alimentos para reducir el tiempo de secado y así disminuir la demanda energética, contemplando perfiles de temperatura y humedad que no perjudique la calidad del alimento.

Capítulo 1

Introducción

Los alimentos son cualquier sustancia que nos proporciona aporte nutricional para el cuerpo. Generalmente los alimentos están constituidos por proteínas, grasas, carbohidratos, fibras y humedad. De los componentes mencionados, la humedad influye en la preservación del alimento, pues su tiempo de vida aumenta cuando tiene bajo contenido de humedad.

En la industria alimentaria uno de los principales objetivos es la conservación del alimento, por lo que se han desarrollado varios procesos tecnológicos en empacamiento, enlatado, congelamiento, calentamiento y deshidratación.

El proceso de deshidratación se involucra en la industria agricultora, industria de comida y en la industria química, por lo que se plantea analizar este fenómeno para tener una mejor comprensión física del fenómeno y poder mejorar la calidad del alimento, así como también reducir el consumo de energía.

Diversos estudios han analizado la deshidratación para frutas y verduras con diversas geometrías: cubica [11, 12, 26, 27, 33], semi esférica [34] o placa plana [35]. Si bien se han realizado investigaciones en deshidratación convectiva empleando análisis numéricos, los estudios han sido abarcados para una muestra. El propósito de este trabajo es estudiar la transferencia de calor y masa un tren de muestras dentro de la cámara de secado de un deshidratador convectivo.

1.1 Deshidratación

La deshidratación tiene como fin prolongar la conservación de un alimento. Este proceso busca remover la humedad de dicho alimento para reducir la actividad de microorganismos y sus funciones metabólicas. En consecuencia, el alimento secado presenta disminuciones en el volumen y en masa, también presenta cambios en el color y textura debido a la exposición de altas temperaturas. Con ello consiguiendo reducción de costos de transporte, distribución y almacenamiento.

Las variables que determinan el tiempo de secado de un alimento se pueden clasificar en dos: variables de flujo y variables del alimento. Las relativas al flujo son: temperatura de secado, velocidad y humedad. Para el alimento son: la humedad, tamaño y forma [23].

La eliminación de agua en alimentos puede ejecutarse por diferentes técnicas de secado aplicadas para sólidos de geometría robusta, capas delgadas o pastas. Lamentablemente, el proceso de secado puede causar efectos adversos en el alimento como: encogimiento, cambio de color y textura, pérdida de componentes aromáticos y disminución de nutrientes [24]. Los efectos mencionados representan la calidad del alimento secado, por lo que son los principales parámetros para limitar este proceso. Por otra parte, es importante señalar que el proceso requiere de un alto consumo de energía, convirtiéndose en una problemática.

Los alimentos pueden ser deshidratados desde técnicas con instalaciones sencillas y económicas como lo son los secadores solares hasta el uso técnicas más sofisticadas que requieren de equipos industriales. Aunque los equipos industriales generalmente son costosos, además de requerir alto consumo de energía para la remoción de agua, estos mejoran la calidad del alimento deshidratado y disminuyen el tiempo de secado, así justificando su uso en la industria [1]. El proceso de deshidratación puede clasificarse en: deshidratación convectiva, deshidratación por microondas, deshidratación por vacío y deshidratación por congelamiento. Se mencionan algunas de las técnicas más comunes.

- *Secado Solar*: Es una técnica de secado antigua, consiste en colocar el alimento en una superficie que está expuesta a los rayos solares. Es una técnica simple y económica, pero la contaminación por polvo, insectos, como también la presencia de lluvias y la baja calidad de los productos deshidratados se convierten en el principal problema de esta técnica. La falta de control en la temperatura y velocidad del aire, así como la contaminación y el clima del entorno hace que no sea una técnica industrial [25].
El tiempo para deshidratar un producto generalmente es de días. Sin embargo, este método presenta bajos costos de operación debido a que no utiliza energía eléctrica o energía derivada de combustibles.
- *Secado convectivo*: En esta técnica el producto se encuentra sobre una bandeja dentro de una cámara donde es expuesto a una corriente de aire caliente, produciendo la evaporización de humedad del alimento, la cual es removida por aire [25].
Generalmente en este tipo de secadores la velocidad del aire es producida por un ventilador donde la velocidad del aire se encuentra entre 1 [m/s] y 10 [m/s] y la temperatura de este mismo entre 40 [°C] y 80 [°C] [28]. Aunque la temperatura y velocidad del aire son dependientes del alimento a deshidratar, los tiempos de secado generalmente son largos llegando a presentar cambios en el sabor, color, contenidos de nutrientes y componentes aromáticos. Este proceso de secado involucra la transferencia de calor por convección que ocurre de la corriente de aire hacia la superficie del alimento, para después presentarse la conducción de calor de la superficie al centro de este. De manera simultánea, la humedad localizada en la superficie se evapora, provocando el movimiento de humedad dentro del cuerpo hacia la superficie, debido a las diferencias de temperatura y humedad contenida dentro del cuerpo.
- *Microondas*: Esta técnica es usada con potencia de calor constante e involucra tiempos cortos de deshidratación debido a que mejora la remoción de humedad del alimento. Generalmente la deshidratación por microondas es combinada con la deshidratación de secado convectivo, donde la radiación de microondas es controlada con el fin de evitar altas temperaturas y que el producto se queme. Está técnica reduce el tiempo de secado del alimento y como consecuencia presenta cambios mínimos de color y valor nutricional [25].
- *Secado al Vacío*: En esta técnica el sistema de vacío es acoplado con un secador (convectivo o de microondas) para proporcionar una baja presión en comparación con la presión atmosférica. La baja presión reduce el punto de ebullición del agua, provocando que la diferencia de temperatura entre el entorno y el producto sea mayor [28]. Esto provoca que

la temperatura empleada en el secador disminuya, para así reducir la demanda energética. Además, el deterioro del producto es menor en comparación con la exposición de altas temperaturas [25], atribuyendo una mejor calidad del alimento respecto a la conservación de color, forma, sabor y valor nutritivo [24]. Sin embargo, la instalación y operación del proceso es de alto costo [25, 28].

- *Liofilización (secado por congelación)*: En esta técnica el producto a deshidratar tiene que estar congelado previamente para que el líquido sea expulsado por sublimación. La primera etapa es la congelación previa, donde se separa el agua de los componentes hidratados del producto mediante la formación de los cristales de hielo. Después ocurre la primera etapa de secado, donde la presión del liofilizador es reducida alrededor de 6.1 [kPa] con temperaturas dentro del rango de -20 [°C] a -40 [°C] [28] para remover el agua por sublimación de los cristales de hielo. Por último, ocurre la segunda etapa de secado la cual es necesaria para remover humedad restante de la anterior etapa. Esta inicia con la evaporación del agua descongelada que queda en el interior del producto, requiriendo aumentar la temperatura del liofilizador manteniendo la presión de vacío [8, 28]. Esta última etapa es más lenta en comparación con la etapa anterior.

La técnica de liofilización es costosa debido a las bajas temperaturas y presiones requeridas para el proceso. Además, el tiempo de secado por congelamiento puede durar de uno a tres días dependiendo del alimento. Esto es debido a la ineficiente transferencia de calor dentro del alimento [24]. La principal ventaja es el cambio mínimo de forma, textura, color, aroma y valor nutricional en comparación con el alimento fresco.

- *Osmosis*: Consiste en colocar el alimento en contacto con una solución acuosa de azúcar y/o sal, a la cual se le denomina solución osmótica que tiene una alta presión osmótica. La azúcar es el soluto ocupado para el tratamiento de frutas mientras que la sal o la salmuera son usados para el tratamiento de vegetales [25].

Durante el proceso, la humedad es expulsada del alimento hacia la solución acuosa, al mismo tiempo se lleva a cabo la transferencia de solutos de la solución hacia el alimento. Esto se debe al agua y gradientes de soluto alrededor de la membrana celular.

Aunque también se presentan fugas de azúcares, sales y minerales propios del alimento, estas no son significativas en comparación con la humedad expulsada del alimento. Lo anterior indica mejor conservación del alimento, tanto en su valor nutricional como en como en color y textura, en comparación con las otras técnicas de secado [24].

La osmosis generalmente es usada como un pretratamiento para un proceso de secado aplicado con otra técnica como secado al vacío, secado convectivo o secado en frío. La principal ventaja es el bajo consumo de energía debido a la baja temperatura empleada para la remoción de agua comparado con el secado convectivo o secado en frío [24]. Por otro lado, la principal desventaja es que es un proceso muy lento en términos de tiempo.

Las técnicas mencionadas pueden aplicarse de forma simultánea o ser técnicas previas que ayuden en la técnica principal de secado, siendo pretratamiento de otra. Ambas formas tienen como objetivo mejorar la calidad del alimento a deshidratar, aumentar la velocidad del proceso de secado

y disminuir el tiempo de secado. Para la forma simultánea se ha encontrado la relación de técnicas de secado convectivo con infrarrojo [26], secado convectivo – microondas, donde la principal ventaja es la disminución del tiempo de proceso de secado. Por otro lado, la osmosis generalmente es usada como técnica previa para el secado convectivo [25]. Sin embargo, usar la osmosis como pretratamiento implica que el alimento absorba solución osmótica afectando la difusión de humedad interior hacia la superficie del alimento, así requiriendo mayor tiempo de secado [27].

1.2 Humedad

Se considera como aire seco a aquel que no contiene humedad (cantidad de vapor) mientras que el aire que contiene humedad se denomina aire atmosférico. El aire atmosférico puede tratarse como una mezcla de gases ideales: aire seco y vapor de agua [31]. La presión puede ser determinada como:

$$P = P_a + P_v$$

Donde P_v es la presión parcial del vapor, se interpreta como la presión que el vapor de agua ejercería si existiera solo a temperatura y volumen del aire atmosférico.

La humedad en el aire puede definirse como específica (ω) y relativa (φ). La primera es la relación de la masa de humedad presente en una unidad de masa de aire seco.

$$\omega = \frac{m_v}{m_a}$$

Aplicando ley gases ideales:

$$\omega = \frac{m_v}{m_a} = \frac{p_v V / R_v T}{p_a V / R_a T} = \frac{p_v R_v}{p_a R_a} = 0.622 \frac{p_v}{p_a}$$

Si la masa de humedad excede la del aire, la humedad se condensa debido a que no puede almacenarse en el aire.

Por otro lado, la humedad relativa se define como la cantidad de humedad almacenada (m_v) respecto a la humedad que puede contenerse (m_g) en el aire.

$$\varphi = \frac{m_v}{m_g} = \frac{p_v V / R_v T}{p_g V / R_v T} = \frac{p_v}{p_g}$$

$$\varphi = \frac{\omega}{(0.622 + \omega)P_g}$$

$$\omega = \frac{0.622 \varphi P_g}{P - \varphi P_g}$$

1.3 Actividad de agua

Los diversos métodos de conservación de alimentos se basan en el control de una o más variables que influyen en la estabilidad, entre ellas se encuentran: la actividad del agua, temperatura, pH, disponibilidad de nutrientes y de reactivos, presión y presencia de conservadores. La estabilidad es considerada como la presencia de reacciones químicas y enzimáticas que ocurren en los alimentos, así como el crecimiento de hongos, levaduras y bacterias. Un producto que presenta valores elevados de actividad de agua (a_w) tiene alta inestabilidad, es decir, las reacciones en el alimento son mayores. Carnes, frutas y vegetales frescos son un ejemplo de lo mencionado. Por el contrario, los alimentos estables son los que tienen menor actividad de agua [2, 22].

La actividad del agua determina el agua disponible para el crecimiento de microorganismos y para que se puedan llevar a cabo procesos químicos en el alimento. La humedad en forma de moléculas de agua dentro del alimento puede encontrarse de forma ligada o no ligada. La humedad no ligada es aquella que puede ser removida fácilmente del alimento, ubicándose en la zona intersticial de los poros y espacios intercelulares, mientras que la humedad ligada es aquella que no puede ser removida con facilidad, ubicándose en grupos iónicos y grupos de hidrógeno [25]. La actividad de agua se define como:

$$a_w = \frac{P}{P_o} = \frac{HR}{100}$$

Donde P es la presión de agua dentro alimento y P_o es la presión de saturación de agua pura. En el proceso de secado por convección la actividad de agua actúa como la fuerza impulsora de la evaporación de agua, debido a la diferencia de actividad de agua entre el alimento y el aire caliente. El alimento se deshidrata cuando la actividad de agua del aire (humedad relativa /100) es menor que la del producto. Entre mayor sea la diferencia de actividad de agua mayor será la velocidad de secado [4, 29].

La actividad de agua toma valores de 1.0 para el agua pura, hasta cero para un producto totalmente seco. Cuanto más cercano es al valor de cero la actividad biológica es menor, en consecuencia, la conservación del alimento es más larga. Por el contrario, aquellos alimentos que tienen mayor actividad de agua son difíciles de conservar. La actividad de agua está relacionada con la textura, sabor, color, gusto y valor nutricional del alimento. Las frutas, hortalizas y carnes frescas tienen en promedio una actividad de agua de 0.97 [22], pero en esta misma actividad se encuentra el crecimiento de bacterias, levaduras y hongos perjudiciales tanto para la preservación como para el consumo humano.

La actividad de agua mínima para el crecimiento de microorganismos es alrededor de 0.75, mientras que para los hongos y hongos tipo levaduras es de 0.61. Entonces a valores mínimos de 0.6 se inhibe el crecimiento tanto de bacterias como de levaduras y hongos, tomando este valor como referencia para el proceso de secado [3, 32, 33]. En la tabla 1.1 se presentan los valores mínimos de crecimiento.

La mayoría de las bacterias descritas en el cuadro presentan síntomas en común como son la diarrea, fiebre, vómito, dolor de cabeza y/o abdominal. Sin embargo, algunas bacterias presentan infecciones de afección médica grave como las Pseudomonas (infecciones en la piel, ojos y vías

urinarias), Acinetobacter (bronquiolitis), Enterobacter aerogenes (osteomielitis e infecciones urinarias y piel), Clostridium botulinum (insuficiencia respiratoria por afectaciones en el sistema nervioso) y Sallmonella (fiebre tifoidea). Por otro lado, los hongos y levaduras presentan enfermedades relacionadas a la piel y vías respiratorias (sinusitis).

Aw	Microorganismo		Aw	Microorganismo	
0.98	Campylobacter spp	(BA)	0.93	Rhizopus stolonifer	(HO)
0.97	Shigella spp	(BA)	0.93	Mucor spinosus	(HO)
0.97	Clostridium butulinum type E	(BA)	0.93	Bacillus cereus	(BA)
0.97	Pseudomonas spp. **	(BA)	0.92	Clostridium perfringens	(BA)
0.97	Yersinia enterocolitica	(BA)	0.92	Candida scottii	(LE)
0.96	Vibrio vulnificus	(BA)	0.91	Trichosporon pullulans	(LE)
0.96	Acinetobacter spp. **	(BA)	0.90	Candida zaylanoides	(LE)
0.96	Escherichia coli **	(BA)	0.86	Staphylococcus aureus	(BA)
0.95	Enterobacter aerogenes	(BA)	0.84	Alternaria citri	(HO)
0.94	Sallmonella spp.	(BA)	0.83	Listeria monocytogenes	(BA)
0.94	Clostridium botulinum i **	(BA)	0.81	Penicillium patulum	(HO)
0.94	Candida utilis	(LE)	0.70	Aspergillus conicus	(HO)
0.93	Botrytis stolonifer	(HO)	0.64	Aspergillus echinulatus	(HO)
0.93	Vibrio parahaemolyticus i **	(BA)	0.62	Zygosaccharomyces rouxii	(LE)

Tabla 1.1 Actividad de agua mínima para el crecimiento de microorganismos en alimentos. BA: bacteria, Ho: hongo y Lev: levaduras [23, 32, 33].

1.4 Deshidratación convectiva

La transferencia de calor por convección (secador directo) es posiblemente el método más común de deshidratación usado para frutas, vegetales o carnes [28]. Generalmente en esta técnica el alimento es expuesto a un flujo de aire, el cual es previamente calentado por combustión o calentadores de resistencia para después ser aspirado por un ventilador y pasar alrededor del sólido. Esto provoca un flujo turbulento, el cual favorece la transferencia de cantidad de movimiento, energía y masa. Lo anterior debido a que el flujo turbulento describe fluctuaciones de velocidad [5, 7]. Esto favorece la evaporización de la humedad, para que sea removida por el aire. Además del aire, en el secado convectivo se pueden usar gases inertes o gases de combustión directa, aunque generalmente estos son de poco uso, debido a que las muestras del alimento pueden contaminarse [4]. El flujo externo provoca la transferencia de calor por convección del aire hacia la superficie del sólido, proporcionando calor para la evaporización de la humedad superficial para después ser removida por el mismo flujo. Al aumentar la temperatura en la superficie empieza la transferencia de calor por conducción dentro del sólido, manifestándose temperaturas mayores cercana a su superficie. De manera simultánea empieza la transferencia de humedad por difusión del centro del sólido hacia el exterior.

Existen diferentes secadores convectivos industriales como: secador de cinta transportadora, secador de bandeja tipo lote, secadores rotatorios, entre otros. De los secadores ya mencionados, el secador de bandeja tipo lote y el secador de cinta transportadora son usados para la deshidratación de alimentos (sólidos) [4], para este trabajo se considera un secador de bandeja tipo lote donde el sólido no se encuentra en movimiento.

El secador de bandeja almacena los alimentos sobre bandejas dentro de una cámara, también conocida como cámara de secado. La cámara de secado contiene bandejas apiladas con suficiente espacio para permitir el flujo de aire, el cual es paralelo a las bandejas y es previamente calentado. La temperatura del aire para este tipo de secadores se encuentra en el rango de 40 [°C] y 80 [°C] y la velocidad del aire entre 1 [m/s] y 10 [m/s] [28]. Aunque su diseño es simple, el secado de alimentos no es uniforme en todo el espacio de la cámara de secado.

Las variables que determinan el tiempo de secado del alimento dependen de variables relativas a condiciones externas o de secado y condiciones internas. Las variables externas son: temperatura, presión, humedad del aire, características de flujo y área superficial expuesta. Las condiciones internas son relativas al movimiento interno de humedad que está en función de la temperatura y contenido de humedad del sólido.

El comportamiento de la humedad es llevado a cabo por difusión, mientras que la humedad puede encontrarse dentro del sólido de forma ligada o no ligada. La humedad no ligada es aquella que puede ser removida del alimento ubicándose en la zona intersticial de los poros y espacios intercelulares, mientras que la humedad ligada es aquella que no puede ser removida ubicándose en grupos iónicos y grupos de hidrógeno [25].

El proceso de deshidratación es descrito por curvas de velocidad de secado, humedad y temperatura en función del tiempo de secado, ver figura 1.1. En ellas se describen tres etapas del proceso de secado: precalentamiento, secado constante y el decremento de secado [21, 25].

En la primera etapa de secado, el sólido se calienta hasta que la superficie alcanza la temperatura de bulbo húmedo correspondiente a la temperatura del aire seco, ver figura 1.1a. Generalmente esta etapa no es considerada porque su duración es pequeña comparada con las demás etapas [4, 30]. Se puede observar en la figura 1.1b que la humedad disminuye en menor cantidad en comparación con las demás etapas, pero como el tiempo de secado es muy corto se tiene una pendiente grande en la curva de velocidad de secado (figura 1.1c).

La etapa de secado de constante inicia cuando la superficie alcanza la temperatura de bulbo húmedo, la cual se considera que se mantiene constante en este intervalo de tiempo. Una vez alcanzada esta temperatura, la humedad de forma no ligada empieza a evaporarse por el calor suministrado por el flujo de aire caliente (convección). En esta etapa se considera que el proceso es adiabático, pues el calor cedido por el aire regresa a medida que la humedad evaporada ingresa al aire [25, 29]. Dado que la velocidad de evaporación es menor que la de difusión interna, la primera controla la velocidad de secado siendo constante a través del tiempo, ver figura 1.1c.

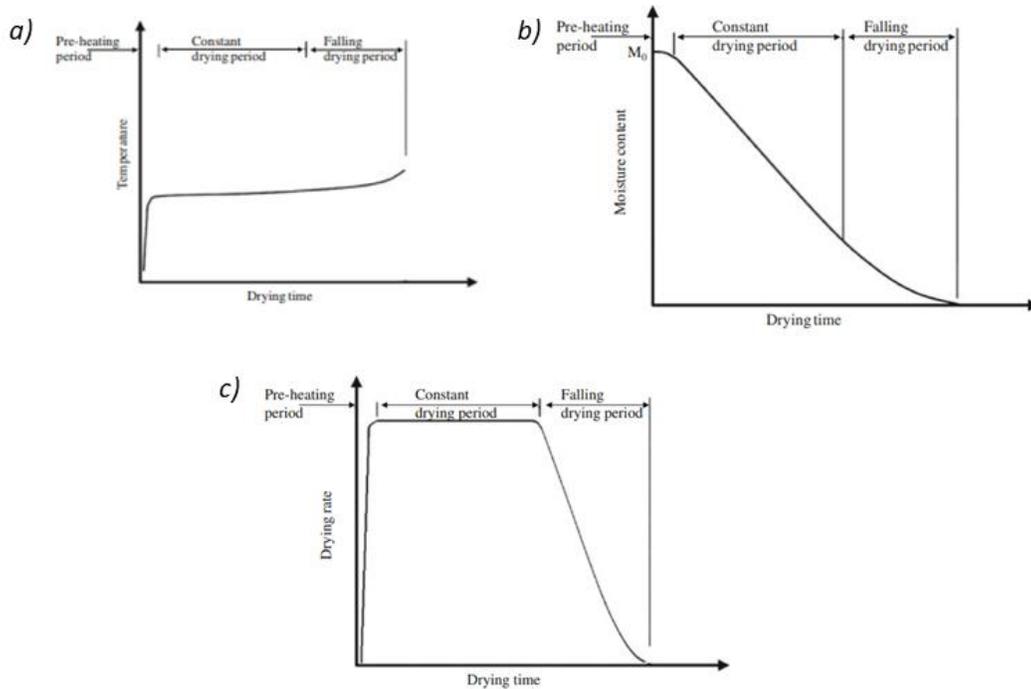


Figura 1.1 a) Temperatura en función del tiempo de secado, b) humedad en función del tiempo de secado y c) velocidad de secado en función del tiempo secado, Delgado & de Lima [25].

Una vez que se remueve la humedad superficial inicia la etapa de decremento de secado. Aquí se presenta el movimiento interno de humedad desde el centro hacia la superficie del alimento para después evaporarse y obtener el producto secado [23]. Durante este periodo el calor suministrado por el aire es mayor que el que se retorna al mismo aire, por lo que el producto empieza a incrementar su temperatura (figura 1.1a), presentándose la transferencia de calor por conducción [29]. En este periodo el movimiento interno de humedad es lento en comparación con la velocidad de evaporización, debido a que la humedad interna a remover se encuentra de forma ligada. Entonces la difusión de humedad rige la velocidad de secado en esta etapa.

Generalmente la etapa de decremento se describe en dos etapas: decremento inicial y decremento final [4, 29]. La primera hace referencia al inicio del movimiento interno de humedad una vez desprendida la humedad superficial, lo cual no es diferente a lo ya planteado. Mujumdar [4] plantea que la etapa decremento final es la remoción de humedad en su forma ligada, la cual es difícil de remover, implicando mayor tiempo de secado para remover humedad en menor cantidad. Este comportamiento se ve en la última parte del proceso donde la velocidad de secado disminuye. No obstante, en el decremento final, Metcalf Coulson et al. [29] considera que la superficie del alimento no contiene humedad (seca) por lo que la evaporización ya no es llevada sobre su superficie si no al interior del sólido. En otras palabras, la humedad que se encuentra sobre y en los alrededores del centro es llevada para evaporarse en una zona dentro del mismo sólido, para que después el vapor de agua se traslade hacia la superficie por difusión molecular.

1.5 Inconvenientes del proceso de secado

Aunque la actividad de agua es una de las variables que influye en el proceso de secado por convección, la velocidad del flujo y la temperatura del aire caliente también influyen en el proceso. En el caso de la velocidad, mientras mayor sea esta magnitud mayor será la velocidad de secado requiriendo menor tiempo del proceso. Sin embargo, después de un determinado valor de velocidad el proceso no dependerá de esta variable [23], esto es debido a que la velocidad de secado es controlada en su primera etapa por la velocidad de evaporización y después por el movimiento interno de la humedad descrita (etapa de decremento). Esta última dependiente de la difusión de humedad y no de factores externos como la velocidad de flujo.

También debe considerarse que si la humedad es removida demasiado rápido el alimento puede endurecer y en consecuencia sellar el área de superficie exterior, generando obstaculizaciones de la difusión de humedad del centro hacia el exterior [23]. Además, también es observado que el hecho de usar el pretratamiento de osmosis perjudica la velocidad de secado por el aumento de líquidos dentro del alimento como consecuencia de la solución osmótica [27].

Por otro lado, el aumento de temperatura mejora la transferencia de calor en la superficie del alimento (favoreciendo el cambio de fase de la humedad de líquido a vapor) incrementando la velocidad de secado. Sin embargo, los componentes de calidad del alimento como textura, color, valor nutricional, entre otros son sensibles a la exposición de altas temperaturas siendo perjudicados [27].

Capítulo 2

Ecuaciones de Gobierno

El fenómeno físico implica el estudio del flujo alrededor del alimento y la transferencia de calor y masa dentro del mismo alimento. La transferencia de calor y de masa puede ser resuelta por dos modelos: modelo conjugado y modelo no conjugado.

El modelo no conjugado establece que la solución de transferencia de calor y de masa es resuelto en el sólido a analizar, para después resolver las ecuaciones del flujo externo y obtener los coeficientes de transferencia. Por otra parte, el modelo conjugado establece que la solución de transferencia de calor y de masa en el flujo externo y dentro del sólido sean resueltas de forma simultánea. En este trabajo se utiliza el modelo conjugado.

2.1 Ecuaciones de flujo externo

Las ecuaciones de Navier-Stokes y de energía para un flujo compresible, en un sistema de referencia cartesiano (x, y, z) , pueden ser escritas en su forma conservativa, de la siguiente forma:

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}_i}{\partial x_i} = \mathbf{S} \quad (2.1)$$

Donde t es el tiempo y x_i son las componentes en las tres direcciones espaciales $\forall i \in \{1,2,3\}$. \mathbf{U} y \mathbf{S} representan vectores de cinco componentes:

$$\mathbf{U} = (\rho, \rho u_1, \rho u_2, \rho u_3, \rho e)^T \quad (2.2)$$

$$\mathbf{S} = (0, f_U(t), 0, 0, f_T(t))^T \quad (2.3)$$

El vector \mathbf{S} representa a los términos fuentes de las respectivas ecuaciones. En este trabajo se analizan dos tipos de simulaciones numéricas, las cuales difieren en sus condiciones de frontera periódicas de carácter numérico (sección 2.3). Para las simulaciones numéricas con condiciones periódicas en las tres direcciones se aplica el término fuente de la ecuación 2.3. Por otro lado, la simulación numérica restante adquiere un vector \mathbf{S} nulo.

La fuerza de cuerpo $f_U(t)$ [13] establece un flujo constante de velocidad, esto es llevado a cabo al fijar una velocidad promedio constante del dominio computacional. Esta magnitud de velocidad hace que los nodos del dominio (excepto los que conforman a los sólidos) que sean menores a dicha magnitud por efectos viscosos igualen el valor para así implantar una velocidad constante.

$$f_U(t) = \frac{1}{V_D} \iiint \mathbf{u}(x, y, z, t) dx dy dz \quad (2.4)$$

La fuerza de cuerpo relativa a la ecuación de la energía $f_T(t)$ es similar a la anterior, en esta se establece una temperatura promedio constante para todo el dominio computacional, lo anterior infiere que la energía cedida por el flujo es ganada por el sólido y así para cada instante del tiempo se agrega energía en los nodos del flujo.

$$f_T(t) = \frac{1}{V_D} \iiint T(x, y, z, t) dx dy dz \quad (2.5)$$

Por otro lado, $\mathbf{u} = (u_1, u_2, u_3)$ representa al vector velocidad, ρ es la densidad y ρe es la energía total definida para un gas ideal. La energía total se define como:

$$\rho e = \rho c_v T + \frac{1}{2} \rho (u_1^2 + u_2^2 + u_3^2) \quad (2.6)$$

Por otro lado, \mathbf{F}_i representa los flujos para un fluido Newtoniano en las tres direcciones espaciales y se definen como:

$$\mathbf{F}_i = \begin{pmatrix} \rho u_i \\ \rho u_i u_1 + P \delta_{i1} - 2\mu S_{i1} \\ \rho u_i u_2 + P \delta_{i2} - 2\mu S_{i2} \\ \rho u_i u_3 + P \delta_{i3} - 2\mu S_{i3} \\ (\rho e + P)u_i + 2\mu S_{ij} u_i - K \frac{\partial T}{\partial x_i} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Donde μ representa la viscosidad dinámica y K representa la conductividad térmica que se expresa como $K = \rho C_v k$ y k es la difusividad térmica. Además, S_{ij} representa la parte desviadora del tensor de deformación definido como:

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \delta_{ij} \right) \quad (2.8)$$

2.1.1 Ecuaciones de flujo externo adimensionales

Para obtener la ecuación de continuidad, cantidad de movimiento y conservación de energía de forma adimensional se toma en cuenta los parámetros de referencia. Para este trabajo se toma en cuenta la velocidad de entrada como u_{ref} , la temperatura ambiente T_{ref} y la longitud de la muestra L_{ref} . Las variables mencionadas se relacionan con su componente de referencia.

$$x_i^* = \frac{x_i}{L_{ref}} \quad (2.9)$$

$$u_i^* = \frac{u_i}{u_{ref}} \quad (2.10)$$

$$T^* = \frac{T}{T_{ref}} \quad (2.11)$$

$$t^* = \frac{L_{ref}}{u_{ref}} \quad (2.12)$$

$$P^* = \frac{P}{P_{ref}} \quad (2.13)$$

Realizando el cambio de variables dimensionales a no dimensionales en la ecuación de conservación de masa se obtiene lo siguiente:

$$\left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho}{dt} + \left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho u_i}{dx_i} = 0 \quad (2.14)$$

Simplificando la ecuación, se determina que no existe ningún parámetro adimensional en la ecuación de conservación de energía:

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d\rho u_i}{dx_i} = 0 \quad (2.15)$$

Para la ecuación de cantidad de movimiento se analiza inicialmente la parte desviadora del tensor de deformación S_{ij} , donde se puede deducir que los términos presentes en este tensor son la velocidad y el tiempo, por lo que S_{ij} se denota de la siguiente forma:

$$S_{ij} = \left(\frac{u_{ref}}{L_{ref}} \right) \left(\frac{1}{2} \right) \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u) \delta_{ij} \right) \quad (2.16)$$

Entonces desarrollando la ecuación 2.1 para la de cantidad de movimiento se obtiene lo siguiente:

$$\left(\begin{array}{l} \left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}^2}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho u_1}{dt} + \left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}^2}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho u_i u_1}{dx_i} + \left(\frac{P_{ref}}{L_{ref}} \right) P \delta_{i1} = \frac{\mu_{ref} u_{ref}}{L_{ref}^2} 2\mu S_{i1} \\ \left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}^2}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho u_2}{dt} + \left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}^2}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho u_i u_2}{dx_i} + \left(\frac{P_{ref}}{L_{ref}} \right) P \delta_{i2} = \frac{\mu_{ref} u_{ref}}{L_{ref}^2} 2\mu S_{i2} \\ \left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}^2}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho u_3}{dt} + \left(\frac{\rho_{ref} u_{ref}^2}{L_{ref}} \right) \frac{d\rho u_i u_3}{dx_i} + \left(\frac{P_{ref}}{L_{ref}} \right) P \delta_{i3} = \frac{\mu_{ref} u_{ref}}{L_{ref}^2} 2\mu S_{i3} \end{array} \right) \quad (2.17)$$

Simplificando las ecuaciones se llega a la ecuación de cantidad de movimiento no dimensional, donde se obtienen parámetros adimensionales como el número de Reynolds, Match y el índice politrópico. En este caso el número de Match se considera como un parámetro numérico necesario para la estabilidad del procesamiento.

$$\left(\begin{array}{l} \frac{d\rho^* u_1^*}{dt^*} + \frac{d\rho^* u_i^* u_1^*}{dx_i^*} + \frac{P^*}{\gamma M^2} \delta_{i1} - \frac{1}{Re} 2\mu S_{i1}^* = 0 \\ \frac{d\rho^* u_2^*}{dt^*} + \frac{d\rho^* u_i^* u_2^*}{dx_i^*} + \frac{P^*}{\gamma M^2} \delta_{i2} - \frac{1}{Re} 2\mu S_{i2}^* = 0 \\ \frac{d\rho^* u_3^*}{dt^*} + \frac{d\rho^* u_i^* u_3^*}{dx_i^*} + \frac{P^*}{\gamma M^2} \delta_{i3} - \frac{1}{Re} 2\mu S_{i3}^* = 0 \end{array} \right) \quad (2.18)$$

Por otro lado, en la ecuación de energía se sustituyen variables dimensionales por variables no dimensionales. Se denota de la siguiente manera:

$$\frac{P_{ref} u_{ref}}{L_{ref}} (\rho e + P)u_i - \left(\frac{\mu u_{ref}^2}{L_{ref}^2} \right) 2 \mu S_{ij} u_i - \frac{k_{ref} T_{ref}}{L_{ref}^2} k \frac{dT}{dx_i} = 0 \quad (2.19)$$

Normalizando el primer término de la izquierda, la expresión queda como:

$$(\rho e + P)u_i - \left(\frac{\mu u_{ref}}{L_{ref} P_{ref}} \right) 2 \mu S_{ij} u_i - \frac{k_{ref} T_{ref}}{u_{ref} P_{ref} L_{ref}} k \frac{dT}{dx_i} = 0 \quad (2.20)$$

Entonces sobre escribiendo F_i con las ecuaciones 2.18 y 2.20, omitiendo el término temporal, se expresa como:

$$F_i = \left(\begin{array}{l} \rho u_i \\ \rho u_i u_1 + \frac{P}{\gamma M^2} \delta_{i1} - \left(\frac{1}{Re} \right) 2\mu S_{i1} \\ \rho u_i u_2 + \frac{P}{\gamma M^2} \delta_{i2} - \left(\frac{1}{Re} \right) 2\mu S_{i2} \\ \rho u_i u_3 + \frac{P}{\gamma M^2} \delta_{i3} - \left(\frac{1}{Re} \right) 2\mu S_{i3} \\ (\rho e + P)u_i - \left(\frac{\mu u_{ref}}{L_{ref} P_{ref}} \right) 2 \mu S_{ij} u_i - \frac{k_{ref} T_{ref} \rho_{ref}}{u_{ref} P_{ref} L_{ref}} k \frac{dT}{dx_i} \end{array} \right) \quad (2.21)$$

Simplificando la ecuación de la energía, usando la ley del gas ideal. Tomando en cuenta la relación de Mayer $R = C_p - C_v$ y el índice politrópico $\gamma = C_p/C_v$.

$$\frac{\mu u_{ref}^2}{L_{ref} P_{ref} u_{ref}} \left(\frac{\gamma \rho_{ref}}{\gamma \rho_{ref}} \right) = \frac{\gamma M^2}{Re} \quad (2.22)$$

$$\frac{k_{ref} T_{ref} \rho_{ref}}{u_{ref} P_{ref} L_{ref}} \left(\frac{C_p \mu_{ref} \rho_{ref}}{C_p \mu_{ref} \rho_{ref}} \right) = \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{k}{Pr Re} \quad (2.23)$$

Sustituyendo 2.22 y 2.23 en 2.21.

$$F_i = \begin{pmatrix} \rho u_i \\ \rho u_i u_1 + \frac{P}{\gamma M^2} \delta_{i1} - \left(\frac{1}{Re}\right) 2\mu S_{i1} \\ \rho u_i u_2 + \frac{P}{\gamma M^2} \delta_{i2} - \left(\frac{1}{Re}\right) 2\mu S_{i2} \\ \rho u_i u_3 + \frac{P}{\gamma M^2} \delta_{i3} - \left(\frac{1}{Re}\right) 2\mu S_{i3} \\ (\rho e + P)u_i - \left(\frac{\gamma M^2}{Re}\right) 2\mu S_{ij}u_i - \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{k}{PrRe} k \frac{dT}{dx_i} \end{pmatrix} \quad (2.24)$$

2.1.2 Modelo de turbulencia (L. E. S.)

La turbulencia es una característica de los flujos, pero no del fluido. Se presenta en un fluido de movimiento, cuando los fenómenos de convección asociados a la velocidad son varios ordenes de magnitud mayores que los de difusión. Es el movimiento caótico e irregular del fluido, estas irregularidades o inestabilidades se retroalimentan y se amplifican de forma cíclica en donde aparecen vórtices.

En el desarrollo de la turbulencia, los vórtices de mayor tamaño interactúan con el flujo principal y extraen energía de él. Los vórtices al ser inestables entre sí mismos tienden a dividirse en vórtices más pequeños que a su vez se dividen. Este proceso de división entre vórtices se produce en cascada, por lo que en un movimiento turbulento se presentan una variedad de escalas de vórtices. Este proceso continúa hasta que la escala de vórtices es tan pequeña que el número de Reynolds no es lo suficientemente grande para que la inestabilidad persista. Entonces estos vórtices pequeños contienen energía cinética que se transforma en energía térmica por disipación viscosa. Este proceso es denominado cascada de energía. Las escalas de vórtices pueden ser clasificadas en macro escala, escala intermedia y microescala.

Actualmente la solución de las ecuaciones que gobiernan el comportamiento turbulento no tiene una resolución exacta. Sin embargo, con la ayuda de la dinámica de fluidos computacional (CFD) se tienen tres principales tipos de aproximaciones: Simulación numérica directa (DNS), simulación de vórtices grandes (LES) y el promediado de Reynolds de las ecuaciones de Navier-Stokes (RANS)[9].

La técnica DNS es la aproximación más exacta al estudio de la turbulencia y consiste en resolver las ecuaciones de Navier-Stokes instantáneas con sus cinco incógnitas (componentes de velocidad, presión y temperatura) en todo el dominio espacial y temporal de la turbulencia, requiriendo mallas espaciales y temporales muy pequeñas para abarcar fluctuaciones de pequeñas escalas (escalas de Kolmogorov). Esto implica el uso de geometrías sencillas y números de Reynolds bajos de lo contrario requerirá de tiempo de cómputo excesivo.

Por otra parte, la simulación LES escoge dentro del amplio rango de escalas espaciales y temporales a las escalas grande debido a que son más efectivas en el transporte de propiedades a comparación de escalas de inferior tamaño.

La técnica RANS es la más utilizada en los casos de aplicación de elevados números de Reynolds, donde se resuelven ecuaciones de Navier-Stokes promediadas en el tiempo, produciendo variables

instantáneas del campo turbulento por una componente media más una componente fluctuante. Permite utilizar mallas temporales burdas debido a que no soluciona las escalas temporales más pequeñas, pero requiere de un mayor refinamiento cerca de la capa límite o zonas donde existen fuertes gradientes de diversas variables [10].

La técnica Large-Eddy Simulation o L.E.S. por sus siglas en inglés consiste en intentar simular las grandes escalas del flujo; las pequeñas escalas son filtradas hacia afuera. Sin embargo, estas influyen estadísticamente en el movimiento de grande escala. Las ecuaciones LES se obtienen al aplicar un filtro espacial $G_\Delta(x)$ de tamaño Δ en las ecuaciones de Navier – Stokes. Esto elimina las escalas más pequeñas aplicadas por el filtro de tamaño Δ llamado escala sub - malla. La operación de filtrado corresponde a la integral de convolución de alguna cantidad $f(x, t)$ del flujo por la función espacial de filtro $G_\Delta(x)$:

$$\bar{f}(x, t) = \int f(y, t) G_\Delta(x - y) dy \quad (2.25)$$

La parte de sub malla es la desviación del flujo actual con respecto al campo filtrado.

$$f = \bar{f} + f' \quad (2.26)$$

En los modelos de turbulencia y en LES se introduce el promedio de Favre. Se denota \check{f} el peso-densidad de filtrado de f , definido como:

$$\check{f} = \frac{\overline{\rho f}}{\bar{f}} \quad (2.27)$$

Aplicando el filtro a las ecuaciones compresibles de Navier – Stokes en su forma adimensional se produce:

$$\frac{\partial \bar{U}}{\partial t} + \frac{\partial \bar{F}}{\partial x_i} = S_F \quad (2.28)$$

Entonces se tiene que:

$$\bar{U} = (\bar{\rho}, \bar{\rho}\check{u}_1, \bar{\rho}\check{u}_2, \bar{\rho}\check{u}_3, \bar{\rho}\check{e})^T \quad (2.29)$$

$$\mathbf{F}_i = \begin{pmatrix} \rho u_i \\ \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_1 + \frac{\tilde{P}}{\gamma M^2} \delta_{i1} - \left(\frac{1}{Re}\right) \hat{\tau}_{i1} \\ \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_2 + \frac{\tilde{P}}{\gamma M^2} \delta_{i2} - \left(\frac{1}{Re}\right) \hat{\tau}_{i2} \\ \bar{\rho} \tilde{u}_i \tilde{u}_3 + \frac{\tilde{P}}{\gamma M^2} \delta_{i3} - \left(\frac{1}{Re}\right) \hat{\tau}_{i3} \\ (\rho e + P) u_i - \left(\frac{\gamma M^2}{Re}\right) 2 \mu S_{ij} u_i - \frac{\gamma}{\gamma - 1} \frac{k}{Pr Re} k \frac{dT}{dx_i} \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

El tensor $\hat{\tau}_{ij}$ representa los esfuerzos viscosos filtrados y los tensores relacionados a la escala de sub malla:

$$\hat{\tau}_{ij} = \tilde{\tau}_{ij} - \tau_{ij} \quad (2.31)$$

Donde τ_{ij} se denota como:

$$\tau_{ij} = -2 \nu_T \tilde{S}_{ij} \quad (2.32)$$

$$\tilde{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \tilde{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \tilde{u}_j}{\partial x_i} \right) \quad (2.33)$$

El tensor τ_{ij} contiene al término de la viscosidad turbulenta ν_T , donde el modelo submalla es el modelo selectivo de la función de estructura y este dado por:

$$\nu_T(\vec{x}, \Delta, t) = C_{sf} \Delta \sqrt{\tilde{F}_2(\vec{x}, \Delta, t)} \quad (2.34)$$

Donde C_{sf} puede ser expresado como función de la constante de Kolmogorov C_k : $C_{sf} = f(C_k^{-3/2})$. C_{sf} toma el valor de 0.104 para $C_k = 1.4$. El término Δ es igual a $(\Delta_x \Delta_y \Delta_z)^{1/3}$, donde Δ_x , Δ_y , Δ_z son los tamaños de las mallas locales en sus tres direcciones espaciales.

$\tilde{F}_2(\vec{x}, \Delta, t)$ es la función de estructura de segundo orden de la velocidad construida con el campo \tilde{u} . \tilde{F}_2 es calculado en el punto con un promedio estadístico local de las diferencias de la velocidad de cuadro de los seis puntos más cercanos que rodean al punto en la malla computacional. Además, se considera que el número de Prandtl turbulento adquiere un valor de 0.6, mientras que el número de Schmidt turbulento es igual a 1.0 [14].

2.1.3 Coordenadas generalizadas

El código numérico usa coordenadas generalizadas. La adaptación a las coordenadas generalizadas se realiza introduciendo una matriz jacobiana que transforma una geometría compleja de malla no uniforme o geometría curvilínea, en un sistema de coordenadas cartesianas ($\mathbf{x}\mathbf{y}\mathbf{z}$), dentro de una geometría ortogonal simple con malla uniforme en el sistema de coordenadas generalizadas

(ξ_1, ξ_2, ξ_3) donde las ecuaciones se pueden resolver más fácilmente. Para este caso, simplemente consiste en una transformación de una malla no uniforme en el espacio físico (xyz) dentro de una malla uniforme en el espacio computacional (ξ_1, ξ_2, ξ_3) . Cada término en la matriz Jacobiana inversa (J^{-1}) se expresa como funciones analíticas de las medidas $\frac{\partial x_i}{\partial \xi_j}$. Las medidas son introducidas y calculadas por el esquema interno de primer orden, entonces la matriz (J) es calculada directamente (J^{-1}) .

La ecuación (2.1) se puede volver a escribir como:

$$\frac{\partial \hat{U}}{\partial t} + \frac{\partial \hat{F}}{\partial \xi_1} + \frac{\partial \hat{G}}{\partial \xi_2} + \frac{\partial \hat{H}}{\partial \xi_3} = \hat{S} \quad (2.35)$$

Con:

$$\left. \begin{aligned} \hat{U} &= \frac{U}{J}, \\ \hat{F} &= \frac{1}{J} \left[\left(\frac{\partial \xi_1}{\partial x_1} F \right) + \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial x_2} G \right) + \left(\frac{\partial \xi_1}{\partial x_3} H \right) \right], \\ \hat{G} &= \frac{1}{J} \left[\left(\frac{\partial \xi_2}{\partial x_1} F \right) + \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial x_2} G \right) + \left(\frac{\partial \xi_2}{\partial x_3} H \right) \right], \\ \hat{H} &= \frac{1}{J} \left[\left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x_1} F \right) + \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x_2} G \right) + \left(\frac{\partial \xi_3}{\partial x_3} H \right) \right], \\ \hat{S} &= \frac{S}{J} \end{aligned} \right\} \quad (2.36)$$

J es el determinante de la matriz (J) y U es función de las coordenadas cartesianas y del tiempo.

2.1.4 Esquema numérico

El sistema en coordenadas generalizadas se resuelve por medio del esquema explícito de McCormack, este es un esquema predictor - corrector de segundo orden en el tiempo y cuarto orden en el espacio [36]. El esquema predictor – corrector definido para una dimensión se definen como:

Predictor:

$$U_i^1 = U_i^n + \frac{1}{6} \lambda (-f_{i+2}^n + 8 f_{i+1}^n - 7 f_i^n) + (\delta t) S_i^n \quad (2.37)$$

Corrector:

$$U_i^{n+1} = \frac{1}{2} (U_i^n + U_i^1) + \frac{1}{12} \lambda (7 f_{i+2}^1 - 8 f_{i+1}^1 + f_i^1) + (\delta t) S_i^1 \quad (2.38)$$

Los índices (n) , (1) y $(n + 1)$ representan, al tiempo t , al sub paso de tiempo y el tiempo $(t + \delta t)$, respectivamente. Es importante notar que las discretizaciones espaciales intermedias son esquemas no centrados de primer orden con un predictor adelantado (*upwind*) y un corrector atrasado (*downwind*).

2.2 Ecuaciones de sólido

Dentro del cuerpo sólido, las ecuaciones de calor y difusión de masa son resueltas usando las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\alpha_s \frac{\partial T_s}{\partial x_i} \right) \quad (2.39)$$

$$\frac{\partial M_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(D_s \frac{\partial M_s}{\partial x_i} \right) \quad (2.40)$$

Donde T_s es la temperatura del sólido, M_s es el contenido de humedad dentro del cuerpo sólido, α_s es el coeficiente difusión térmica y D_s es el coeficiente de difusión de masa en función de la temperatura. La difusión térmica de la papa fue obtenida por Chandramohan [18] con un valor de:

$$\alpha_s = 1.506 \times 10^{-7} [m^2/s] \quad (2.41)$$

El coeficiente de difusión de masa es obtenido a partir de integrar el movimiento de la humedad en un medio poroso. El valor obtenido experimental se obtiene con la ecuación de Arrhenius, que se define como:

$$D_s = D_o \exp(-1119/T_s) [m^2/s] \quad (2.42)$$

Donde D_o representa el coeficiente de difusión de masa efectiva obtenido empíricamente que tiene un valor constante de $D_o = 1.82 \times 10^{-8} [m^2/s]$ para la papa. La actividad de agua es modelada de acuerdo a Ateeque et al. [11] se define para tres intervalos de actividad de agua.

$$a_w = 1232.3 M_s^4 - 646.14 M_s^3 + 98.541 M_s^2 - 0.3406 M_s - 0.008 \quad M_s < 0.22 \quad (2.43)$$

$$a_w = -0.512946 M_s^2 + 0.639813 M_s + 0.599489 \quad 0.22 < M_s < 0.6 \quad (2.44)$$

$$a_w = 0.0013 M_s^3 - 0.0197 M_s^2 + 0.1164 M_s + 0.7448 \quad M_s > 0.6 \quad (2.45)$$

2.3 Condiciones de frontera

En el código numérico se aplican dos tipos de condiciones de frontera: físicas y numéricas. En el caso de numéricas se imponen las condiciones fronteras periódicas y condiciones de frontera asociadas al método de Navier – Stokes Characteristic Boundary Conditions (NSCBC).

2.3.1 Navier – Stokes Characteristic Boundary Conditions (NSCBC)

Las condiciones de frontera en flujos compresibles generalmente son difíciles de imponer en el código numérico, debido a que se generan ondas reflexivas asociadas a las mismas condiciones de frontera. Estas ondas reflexivas pueden contrarrestarse por el método de condiciones de frontera características, en particular las condiciones desarrolladas por Poinso & Lele [6]. Este método se basa en las ecuaciones de Euler donde los términos viscosos son despreciados, para después aplicar las condiciones viscosas por separado y obtener las condiciones de frontera correctas de las ecuaciones de Navier – Stokes.

El método resuelve las ecuaciones cerca de las fronteras incorporando la propagación en forma de ondas de las variables. Lo anterior es modelado matemáticamente al descomponer una ecuación hiperbólica, para este caso las ecuaciones de Navier – Stokes para un flujo compresible, en ondas acústicas por medio de las cuales se propagan las variables. Estas ondas corresponden en número a la cantidad de variables resueltas y poseen velocidades características asociadas a las amplitudes de onda. Las velocidades representan valores característicos locales del sistema hiperbólico de la ecuación para un flujo compresible de Navier-Stokes.

El método se basa en un conjunto de ecuaciones no viscosas unidimensionales locales (LODI), las cuales representan el comportamiento de las fronteras.

Las velocidades características son $u+c$, $u-c$ y tres de ellas con velocidad u , donde c representa la velocidad del sonido en el medio y u a la velocidad local del flujo. Teniendo en cuenta a las cinco velocidades características, tres variables viajan a la misma velocidad u , otra de ellas tiene una velocidad mayor $u+c$ anticipándose a las otras variables para reunir información sobre las condiciones del dominio aguas abajo. Por otro lado, la variable restante se encuentra con una velocidad $u-c$ viajando en dirección contraria a las variables mencionadas.

2.3.2 Condiciones de frontera periódicas

Las condiciones de frontera periódicas son de carácter numérico, estas hacen que el dominio computacional pueda replicarse en la dirección deseada. En base a lo anterior, el dominio representa la celda principal (CP) y alrededor de ella se replica la misma celda (CR), de esta manera las fronteras del dominio interactúan con la misma entrada y salida del mismo dominio.

Este tipo de condiciones es realizado por medio de las derivadas computacionales en las fronteras. Analizando en la dirección transversal y , cuando la derivada se encuentra en el último nodo ($j = ny$) requiere información del nodo subsecuente ($j = ny + 1$). En este caso el nodo subsecuente es

el primer nodo del dominio replicado ($j = 1$). El mismo procedimiento se realiza cuando la derivada se encuentra en la otra frontera ($j = 1$), donde el nodo precedente es el último nodo del dominio replicado ($j = n_y$).

En este trabajo se consideran condiciones periódicas, lo anterior indica que las fronteras no representan a una pared, más bien representa fronteras que están en común con celdas replicadas en la dirección predefinida (figura 2.1).

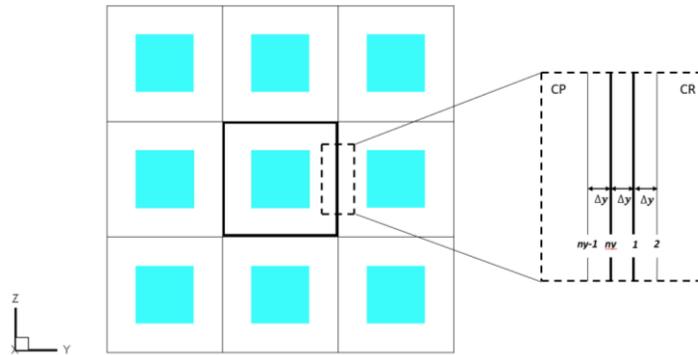


Figura 2.1 Condiciones de frontera periódicas.

Capítulo 3

Validación

El código numérico empleado en este trabajo fue validado por Lara et al. [30], con dos casos experimentales para el flujo externo, mientras que la transferencia de calor en el sólido fue validada por resultados experimentales de Lara et al. [30].

El primer estudio experimental es sobre un flujo alrededor de un cubo en un túnel de agua, empleando la velocimetría por imágenes de partículas (PIV) como técnica de visualización y medición. El sólido es de acrílico transparente y la longitud es de $L = 0.04$ [m] en cada lado, el número de Reynolds empleado es de $Re = 19,300$ [15].

El otro estudio es acerca de un flujo alrededor de un tubo de sección cuadrada desarrollado en un túnel de agua usando la velocimetría por láser Doppler. La sección cuadrada tiene una la longitud de $L = 0.04$ [m] en cada lado. El flujo tiene un numero de Reynolds de $Re = 21,400$ [16].

Para validar el código numérico se hicieron simulaciones con características que se muestran en la tabla 3.3, el dominio y la malla computacional se muestra en la figura 3.1.

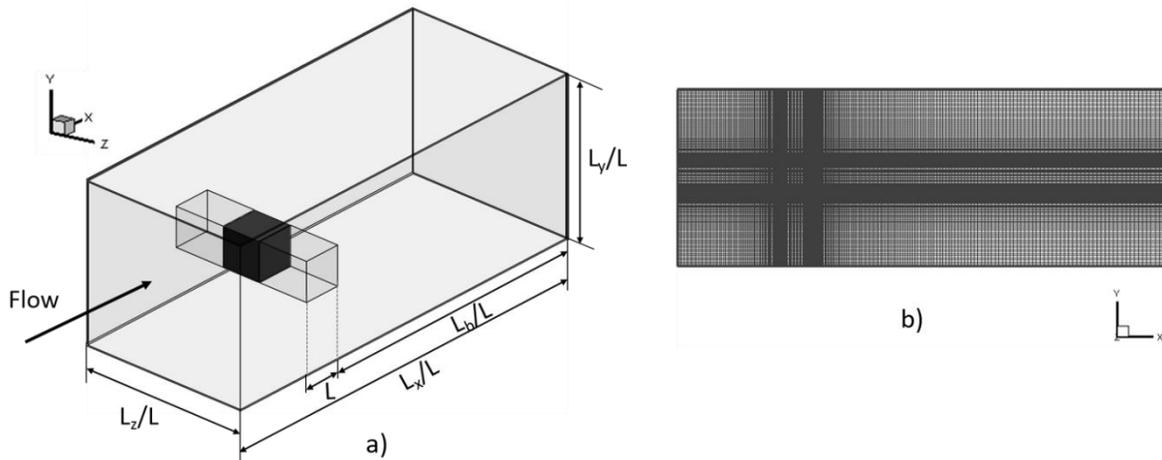


Figura 3.1 a) Esquema de los dominios y b) malla computacional para validación Lara et al. [30].

Malla	Cubo	Cilindro cuadrado
L_x/L	16.4	16.4
L_b/L	12.0	12.0
L_y/L	6.0	6.0
L_z/L	6.0	6.0
N_x	238	238
N_y	143	143
N_z	143	143

$\Delta x/L_{ref}$ min/max	0.017/0.14	0.17/0.14
$\Delta y/L_{ref}$ min/max	0.017/0.07	0.17/0.07
$\Delta z/L_{ref}$ min/max	0.017/0.07	0.04
Re	19000	21400

Tabla 3.1 Características de dominio y malla computacional para validación Lara et al. [30].

Las simulaciones presentan condiciones de frontera de tipo numéricas. Se establecen condiciones de frontera no reflexivas en la entrada y salida [6], mientras que en las direcciones yz se consideran condiciones de deslizamiento (periódicas) [30].

Las figuras 3.2 y 3.3 muestran la comparación entre los resultados experimentales y numéricos por medio a las velocidades promedio (U/U_0 y V/V_0) y las intensidades turbulentas (u'/U_0 y v'/U_0) en el plano xy . Estas son analizadas a distancias normalizadas de $x/L = -0.5, -0.25, 0.5$ y 1.5 tomando como origen la cara lateral derecha del plano xy . Se puede notar que los perfiles de velocidad de los dos flujos experimentales con el presente código numérico son similares.

La presencia de zonas de recirculación debido al desprendimiento de capa límite por los vértices de la cara frontal es comprobado por los valores negativos de la componente de velocidad U/U_0 y del incremento de magnitud de V/U_0 , ver figura 3.5. Estos cambios significativos de velocidad (para ambas componentes) son significativos desde la superficie del sólido hasta una distancia aproximada de $y/L = 2.0$.

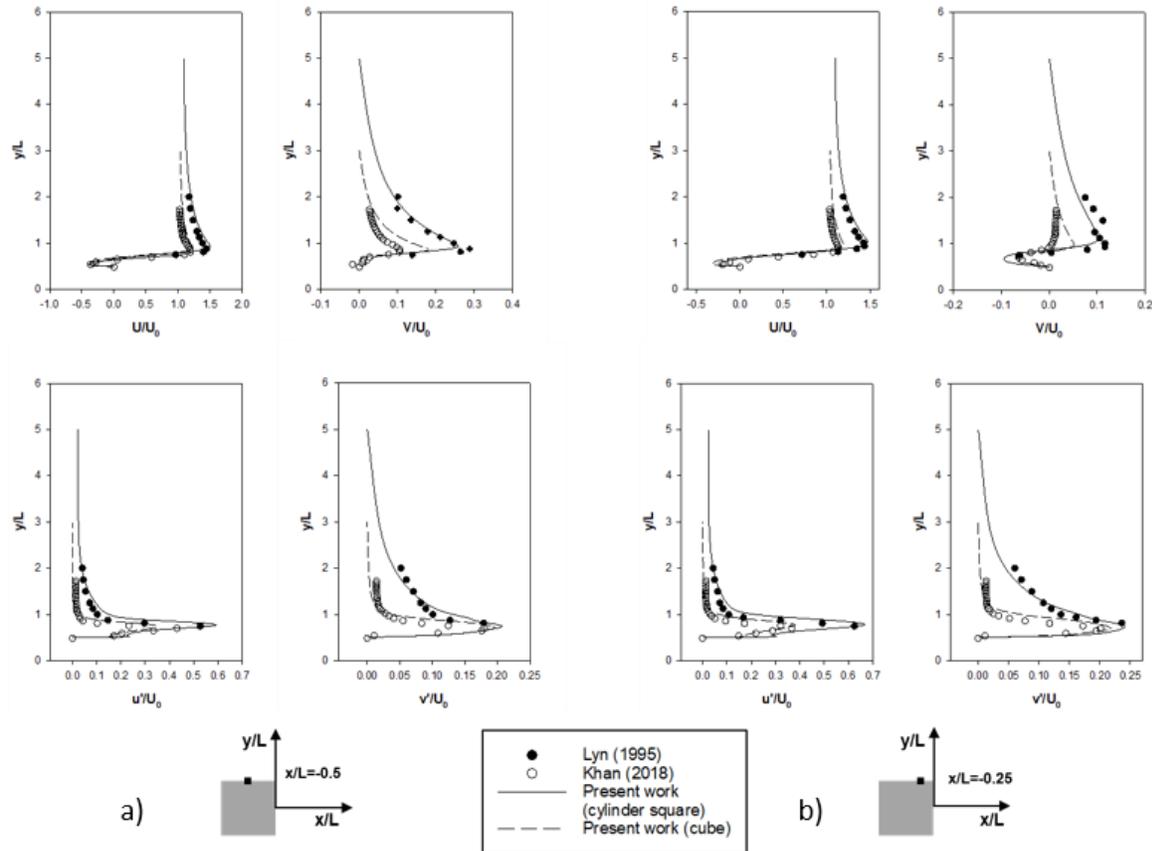


Figura 3.2 Perfiles de velocidad instantánea Lara et al. [30].

En la parte trasera de la geometría, la estela generada es confirmada por los valores negativos para ambas componentes de velocidad cercanos a $y/L = 0$, ver figura 3.6. También se puede observar que la estela abarca una mayor región en la parte posterior, debido a mayores valores de intensidad turbulenta en $x/L = 0.5$ y $x/L = 1.5$.

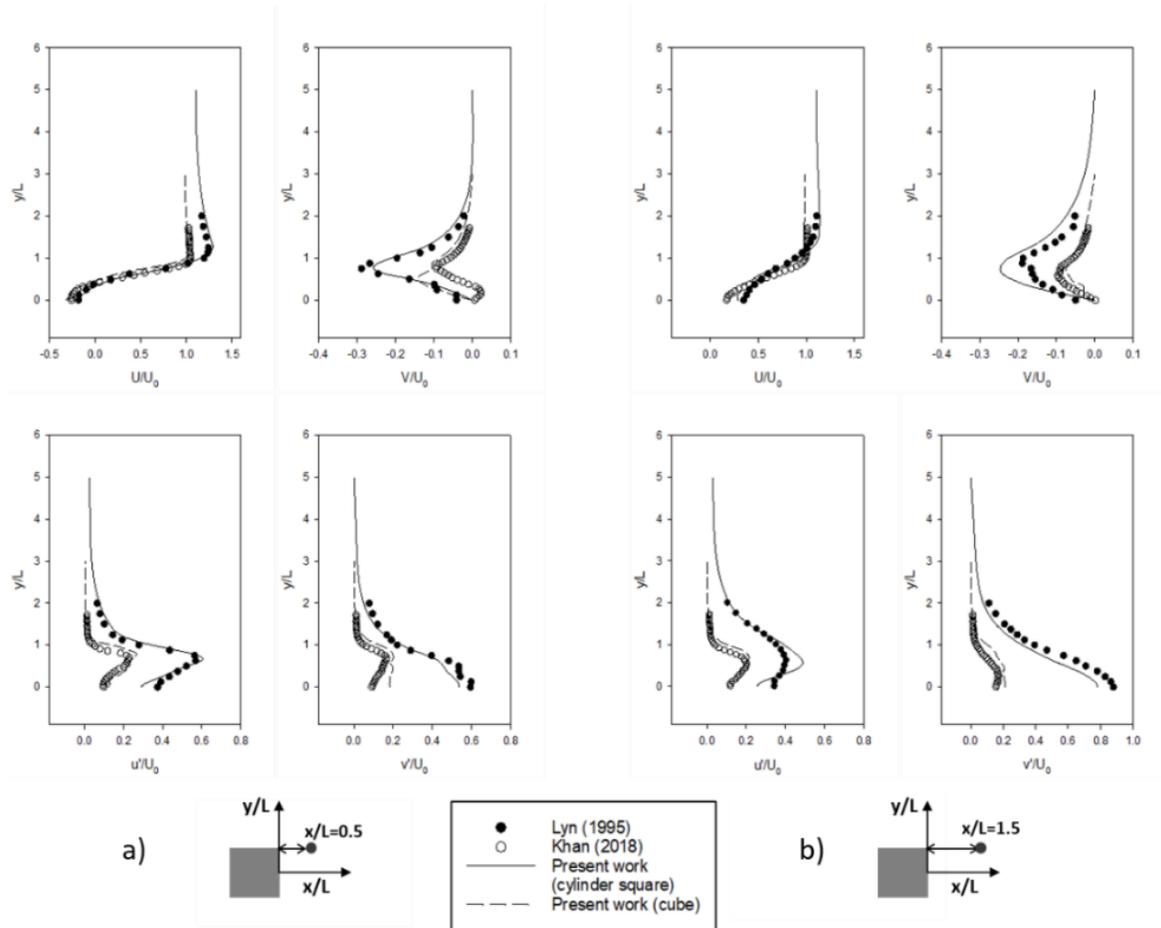


Figura 3.3 Perfiles de velocidad promedio Lara et al. [30].

El experimento para validar la transferencia de calor dentro del sólido es llevado a cabo en un dispositivo similar a un túnel de viento, donde el cubo tiene una longitud de $L = 0.01$ [m] en cada lado. La velocidad de entrada es de 2.0 [m/s] y la temperatura del aire es de 40 [°C]. La temperatura dentro del sólido fue medida con un termopar tipo K [30].

En la figura 3.4 se puede observar que en el inicio los datos numéricos y experimentales no son similares. En estos instantes de tiempo se observa que la transferencia de calor es mayor por el aumento significativo de temperatura del sólido. Conforme aumenta el tiempo de secado los resultados empiezan a tener la misma tendencia. Además, se puede notar que en esta zona la temperatura del sólido aumenta lentamente.

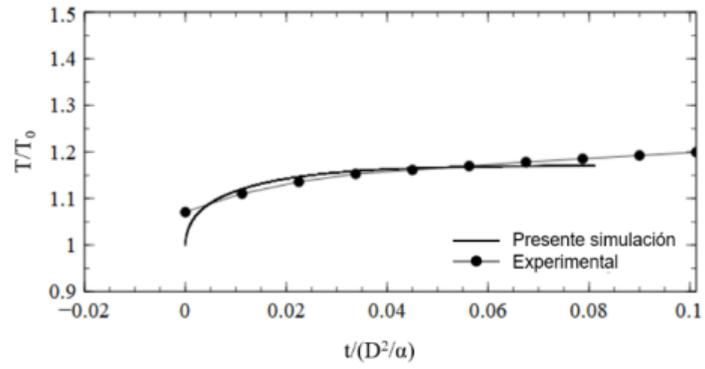


Figura 3.4 Perfil de temperatura interna, Lara et al. [30].

Capítulo 4

Configuración de simulación numérica

Lara et al. [30] estudió la influencia de separación entre alimentos del proceso de secado, planteando dos casos. El primero considera un volumen de control lejos de las paredes de la cámara de secado definiendo condiciones de frontera en las direcciones xyz , así analizando la influencia de la separación entre sólidos en las tres direcciones. En este caso determinó longitudes de separación favorables para la deshidratación del alimento, lo cual llevó a estudiar el proceso de secado en la entrada de un secador tipo charola (segundo caso). La simulación numérica para el segundo caso establece un tren de sólidos en la entrada del secador, interactuando con más sólidos en las direcciones yz por medio de condiciones de frontera periódicas. En base a esto, determinaron las longitudes de separación en las direcciones y y z , así presentando un arreglo de tren de alimentos que favorece el proceso de secado.

Este trabajo busca continuar con el análisis de deshidratación de alimentos de geometría cubica, proponiendo dos casos de estudio. El primero es el comportamiento de un tren de alimentos bajo diferentes longitudes de separación longitudinal, con el fin de determinar muestras de alimento que presentan contornos de temperatura y humedad perjudiciales para el proceso de deshidratación. Con base a lo anterior, se determina a partir de que muestra de alimento presenta contornos de temperatura y humedad favorables para el proceso de secado. En el segundo caso se considera el dominio dentro del secador y lejos de las paredes de este mismo, donde se estudia diferentes perfiles de entrada del flujo, donde el perfil se basa en la inclinación respecto al plano xy . Para este caso se compara el comportamiento de la temperatura y humedad para los diferentes perfiles de flujo, con el fin de especificar la inclinación que beneficie el proceso de secado.

Entonces el estudio de deshidratación se realiza para dos tipos de simulaciones numéricas: caso A y caso B. El caso A describe un tren de nueve muestras del alimento, donde se presentan diferentes longitudes de separación entre cada muestra. El caso B contiene una muestra de alimento, en este se presentan configuraciones de acuerdo con el ángulo de entrada del perfil de velocidad u .

4.1 Caso A

El experimento consta de un tren de muestras de alimento sobre un dominio tridimensional con dimensiones $L_x \times L_y \times L_z$. El tren está conformado por nueve muestras de geometría cubica, las cuales cuentan con una longitud de 0.04 [m] en cada lado del cubo, siendo esta la longitud de referencia L_{ref} .

El tren de muestras de alimento tiene configuraciones para una hilera y dos hileras, ver figura 4.1. Estas configuraciones se basan en parámetros de separación: N_i para la dirección longitudinal x y M tanto para la dirección transversal y como la dirección normal z , ver figura 4.2.

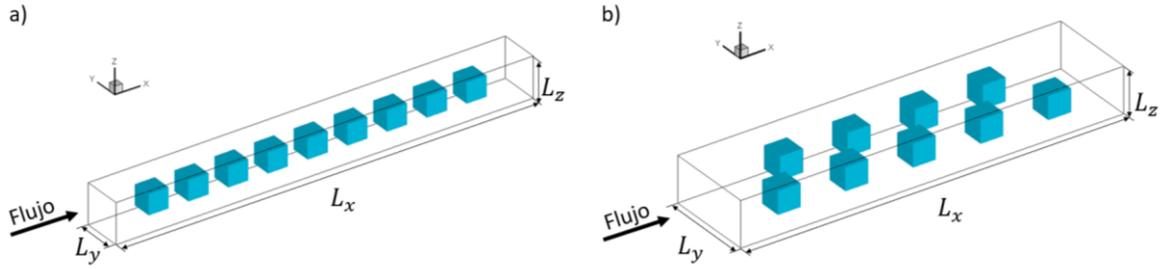


Figura 4.1. Dominio computacional para una y dos hileras.

Para la configuración de una hilera en la dirección longitudinal x , N_i es la longitud adimensional de separación entre cada muestra. Se analizan las siguientes relaciones $N_1 = 0.5 L_{ref}$, $N_2 = 1.0 L_{ref}$ y $N_3 = 1.5 L_{ref}$, ver figura 4.2 a). Por otro lado, en el plano yz se establece la longitud M , la cual adquiere un valor de $0.5 L_{ref}$, ver figura 4.2 b).

Las relaciones N_1 , N_2 y N_3 son las características de los casos **I**, **II** y **III**, respectivamente. Todos los casos mencionados presentan las mismas dimensiones en el plano yz , debido a sus condiciones de frontera periódicas.

El caso **IV** representa al arreglo de dos hileras, donde la distancia de separación en la dirección longitudinal x es de $N_4 = 2.0 L_{ref}$, mientras que en el plano yz la longitud es de $2M$, ver figura 4.2 c).

Las dimensiones del dominio computacional están basadas en los parámetros N_i y M , haciendo que el dominio adquiera diferentes longitudes en la dirección longitudinal, desde $L_x = 17.0 L_{ref}$ hasta $L_x = 25.0 L_{ref}$, ver tabla 4.1. Tanto para la configuración de una hilera y dos hileras en la dirección longitudinal x , se establece una longitud en la entrada y salida $L_a = 2.0 L_{ref}$, ver figura 4.2 a).

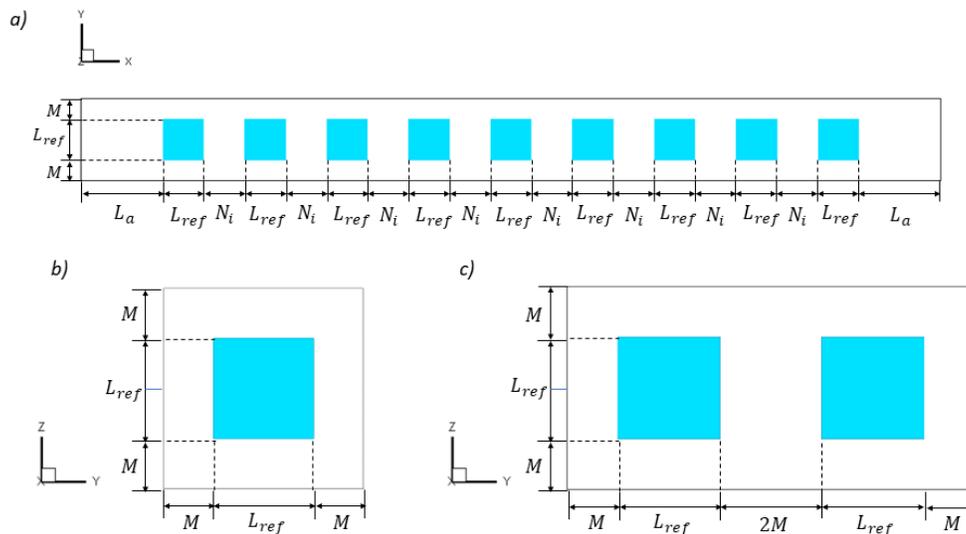


Figura 4.2 Configuración de dominio computacional.

4.2 Caso B

En esta clasificación se establece una muestra de alimento con longitud de $L = 0.04 [m]$, siendo esta la longitud de referencia L_{ref} . El dominio es caracterizado por las longitudes adimensionales Q y W , ver figura 4.3. Se define a $Q = 0.5 L_{ref}$ y $W = 0.75 L_{ref}$, pues longitudes menores a las establecidas no favorecen la transferencia de calor y masa debido a las condiciones periódicas definidas en este caso [30].

Esta configuración es usada para proponer diferentes ángulos de entrada del flujo uniforme en el plano xy , por lo que se proponen inclinaciones de $\theta_1 = 10^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$ y $\theta_4 = 45^\circ$. Esta es una representación alterna de colocar alimentos con un ángulo de inclinación (ubicados sobre la bandeja) y que el flujo de entrada sea paralelo al eje x .

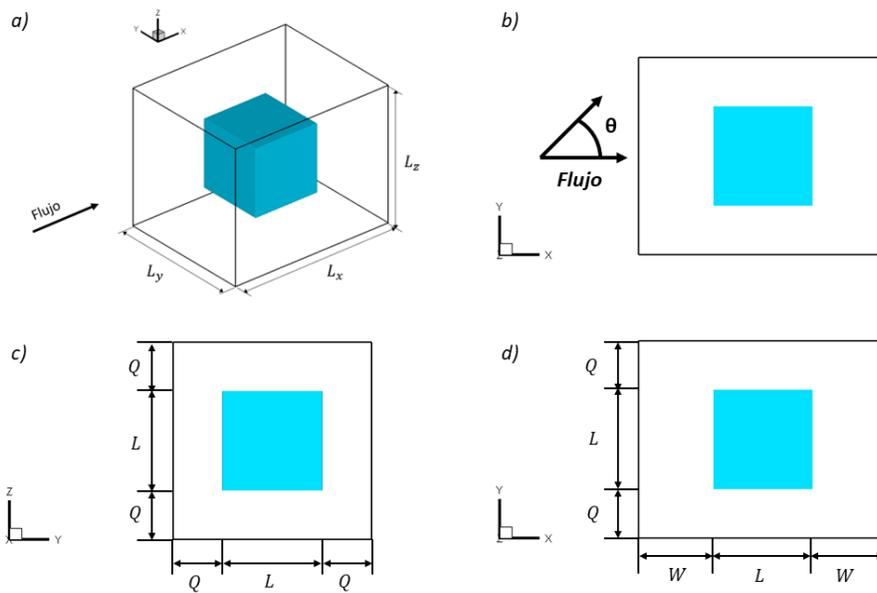


Figura 4.3 Configuración del dominio computacional caso B.

4.3 Características de la malla computacional

El hecho de que se estudien diferentes arreglos implica que la malla computacional sea diferente para cada caso. Dado que en el dominio se encuentran muestras de alimento separadas entre sí, se realiza un refinamiento de malla en las zonas cercanas a la superficie del sólido, esto con el fin de obtener mejor información sobre la transferencia de calor y la evaporización de la humedad. La discretización del dominio está compuesta por tres tipos de mallas: uniforme, ascendente y descendente.

La malla ascendente y descendente es realizada por la ecuación tangencial (ecuación 4.1). Mientras la constante e regula el crecimiento o decremento de las celdas, la constante g establece la separación entre nodos. La distancia de separación entre nodos no sobrepasa el 10 % del nodo anterior según sea el caso.

$$x(i) = \left[1 - \frac{\tanh[g(e - (i - 1)dx)]}{\tanh[g * e]} \right] \quad (4.1)$$

En la figura 4.3 incisos a y c, se observa la estructura de la malla para el arreglo de una hilera y dos hileras, mientras que en los incisos d y e se muestran las zonas de mayor resolución para el plano **yz**. Las características de las mallas computacionales para cada caso se presentan en la tabla 4.1.

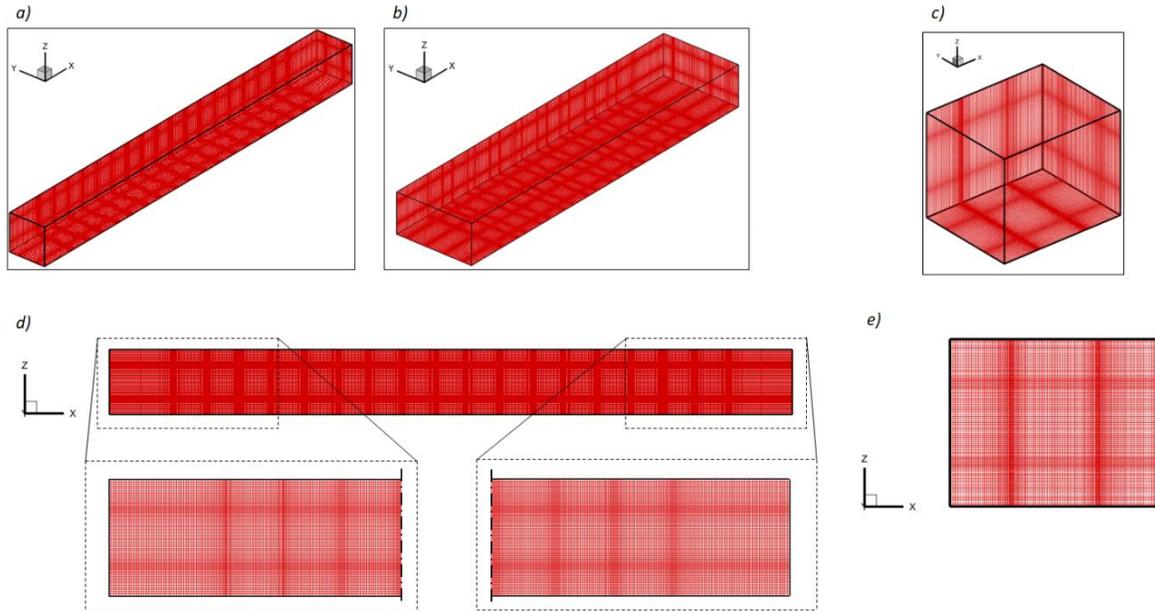


Figura 4.3 Malla computacional para caso A: una hilera (a, d), dos hileras b) y caso B: (c, e).

	Una hilera			Dos Hileras	Sólido
	$N_1/L_{ref}=0.5$	$N_2/L_{ref}=1.0$	$N_3/L_{ref}=1.5$	$N_4/L_{ref}=2.0$	CASO B
Nx	547	683	811	547	125
Ny	69	69	69	137	101
Nz	69	69	69	69	101
Lx/L_{ref}	17	21	25	17	2.5
Ly/L_{ref}	2	2	2	4	2
Lz/L_{ref}	2	2	2	2	2

Tabla 4.1 Características de dominio y malla computacional.

4.4 Condiciones iniciales y frontera

4.4.1 Caso A

Las condiciones de iniciales y de frontera que se describen son relativas a los sub casos: **I, II, III y IV**. Respecto al flujo que pasa alrededor de los cuerpos, se establece a la presión atmosférica como condición inicial, mientras que la temperatura del aire es de 80 [°C]. Las propiedades para el aire son: $\nu=1.892 \times 10^{-5}$ [m²/s], $\mu=2.008 \times 10^{-5}$ [kg/m·s], $C_p=1.007$ [kJ/kg·K], $\alpha_a=2.632 \times 10^{-5}$ [m²/s] y

$D_a=0.26 \times 10^{-4}$ [m²/s]. La velocidad en la dirección longitudinal es de $u_{ref} = 2.0$ [m/s] y para las direcciones y y z tienen un valor nulo.

$$u(x, y, z, 0) = U_{ref} \quad (4.2)$$

$$v(x, y, z, 0) = 0 \quad (4.3)$$

$$w(x, y, z, 0) = 0 \quad (4.4)$$

$$T(x, y, z, 0) = 333.15 \text{ [K]} \quad (4.5)$$

$$P(x, y, z, 0) = P_{atm} \quad (4.6)$$

El número de Reynolds para esta clasificación es:

$$Re = \frac{U_{ref} L_{ref}}{\nu} = \frac{2 \left[\frac{m}{s} \right] 0.05 \text{ [m]}}{1.892 \times 10^{-5} \text{ [m}^2\text{/s]}} = 5285 \quad (4.7)$$

La concentración volumétrica inicial de humedad en el aire es determinada por:

$$Y_a = \frac{\phi P_v}{P_{atm} - \phi P_v} \quad (4.8)$$

Donde $\phi = P_v/P_{vs}$ es la humedad relativa del aire, esta es la relación entre la parcial de vapor y la presión de saturación a la temperatura de bulbo seco del aire. La presión de vapor es obtenida por la ecuación de Antoine.

$$P = e^{A-[B/(T-C)]} \quad (4.9)$$

Donde A, B, y C son constantes con valores de 23.48, 3984.9 y -39.7, respectivamente.

Las condiciones de frontera son periódicas (CFP) en las direcciones y y z , con ello se permite el intercambio de información entre dominios similares al que se estudia para las direcciones establecidas, figura 4.4. Para la dirección x se imponen condiciones de frontera por método Navier-Stokes Characteristic Boundary Conditions. En la entrada se fija la velocidad \mathbf{u} y la temperatura, por lo que la amplitud de las ondas de entrada es nula y la presión es determinada por el mismo flujo en nodos interiores. En la salida se define la condición no reflexiva, la cual considera que lejos del dominio (en el infinito) se conoce la presión, siendo la presión atmosférica, por lo que es impuesta a través de $L_1 \propto (p - p_\infty)$. Con base a esto se calcula la variación de la amplitud de la onda que entra en la salida.

En el sólido la temperatura inicial es de 20 [°C], mientras que la humedad inicial adquiere un valor de 4.5 [kg/kg].

Para las condiciones de frontera se establece que en la interfaz de la superficie del sólido la temperatura y la humedad es la misma. Entonces las ecuaciones de frontera para la transferencia de calor son:

$$(T_a)_{BC} = (T_s)_{BC} \quad (4.10)$$

$$\left(\alpha_s \frac{\partial T_s}{\partial n}\right)_{BC} = \left(\alpha_a \frac{\partial T_a}{\partial n}\right)_{BC} + h_{fg} \left(D_s \frac{\partial(\omega_{BC} - \omega_a)}{\partial n}\right) \quad (4.11)$$

Donde el subíndice BC es la superficie del cuerpo, n es la normal a la superficie, a es relativo con las variables del aire y s es alusivo a variables del sólido. El término h_{fg} representa el calor de evaporación de la humedad [11, 17, 19]. Los términos ω_a y ω_{BC} son la humedad específica del aire y la superficie del alimento, respectivamente, los cuales se definen como:

$$\omega_{BC} = 0.622 \frac{a_w P_g}{(P_0 - a_w P_g)} \quad (4.12)$$

$$\omega_a = 0.622 Y_a \quad (4.13)$$

El coeficiente 0.622 es la relación entre la masa molar de vapor de agua y aire seco, a_w es la actividad de agua de la superficie. Para este trabajo, a_w es función de la humedad contenida del sólido [11, 20]. Respecto a la ecuación de transferencia de masa, las condiciones de frontera son:

$$(M)_{BC} = (\omega_a)_{BC} \quad (4.14)$$

$$\left(D_s \frac{\partial M}{\partial n}\right)_{BC} = \left(D_a \frac{\partial \omega_a}{\partial n}\right)_{BC} \quad (4.15)$$

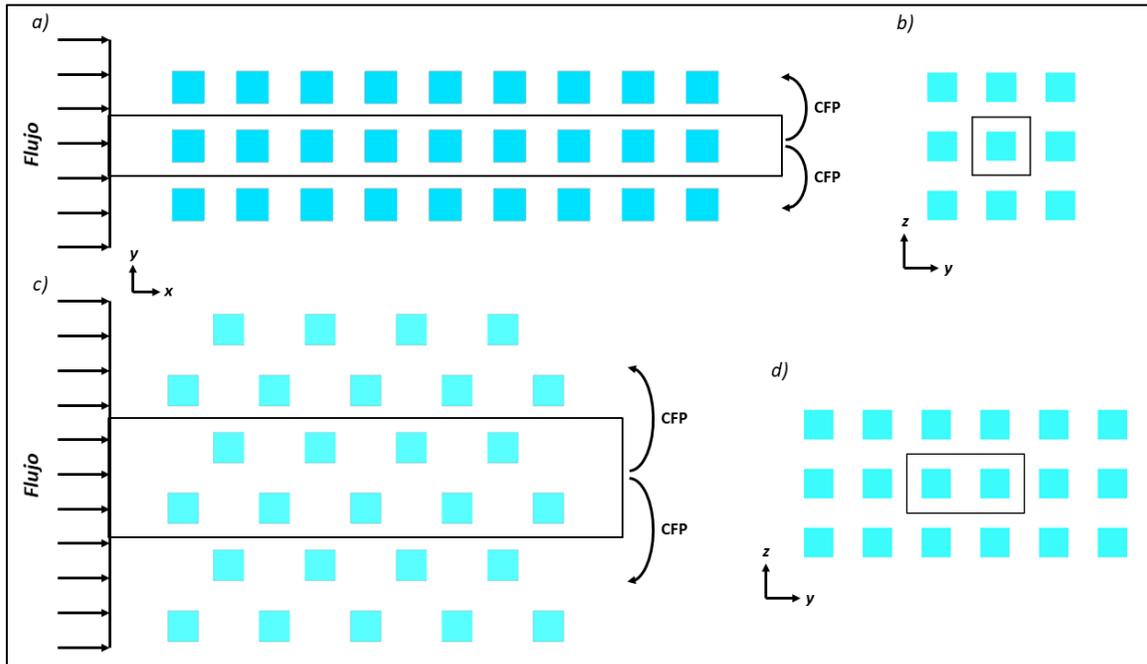


Figura 4.4 Condición de frontera periódica caso A.

4.2.2 Caso B

En el flujo externo la velocidad inicial es definida por la velocidad de referencia u_{ref} y el ángulo θ , el cual toma valores de 10° , 20° , 30° y 45° . Además, se considera la condición de no deslizamiento en la superficie del sólido. La temperatura inicial es de $80\text{ [}^\circ\text{C]}$ y la presión inicial es la presión atmosférica. Entonces se tiene:

$$u(x, y, z, 0) = U_{ref} \cos \theta \quad (4.16)$$

$$v(x, y, z, 0) = U_{ref} \sin \theta \quad (4.17)$$

$$w(x, y, z, 0) = 0 \quad (4.18)$$

$$T(x, y, z, 0) = 333.15 \text{ [k]} \quad (4.19)$$

$$P(x, y, z, 0) = P_{atm} \quad (4.20)$$

Del mismo modo que el caso A, se determina la concentración volumétrica inicial con las ecuaciones 4.8 y 4.9. A diferencia del caso A, aquí se aplican condiciones de frontera periódicas en las tres direcciones, indicando que el dominio de estudio se encuentra rodeado de dominios similares en las tres direcciones, ver figura 2.1. Lo anterior es debido a que en esta clasificación se estudia la influencia de la velocidad de flujo bajo diferentes ángulos de entrada.

Respecto al sólido se establecen las mismas condiciones iniciales y de frontera (CFP) que el caso A, las cuales son descritas por las ecuaciones 4.10, 4.11, 4.14 y 4.15.

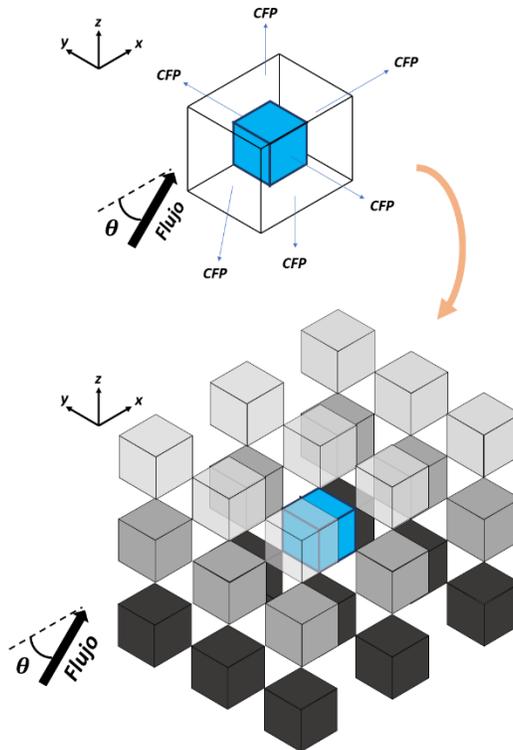


Figura 4.5 Condición periódica caso B.

Capítulo 5

Resultados

En este capítulo se muestran figuras en el plano xy y en tres dimensiones. Las figuras relativas al plano xy , se encuentran justo a la mitad de la distancia del eje z . Se muestran contornos de velocidad promedio (U, V) para la caracterización del flujo alrededor de los alimentos. Las variables mencionadas son las variables estadísticas en el lapso de tiempo adimensional de 0 a 30.

$$U = \frac{1}{t_{total}} \int u \, dt \quad (5.1)$$

$$U^2 = \frac{1}{t_{total}} \int u^2 \, dt \quad (5.2)$$

Donde u es la componente instantánea de velocidad en la dirección x . La componente V se obtiene de la misma manera que la ecuación 5.1 empleando la componente instantánea de velocidad v . A partir de las variables promediadas se calcularon las variables estadísticas y la energía cinética turbulenta (k):

$$\bar{u} = \frac{U}{U_{ref}} \quad (5.3)$$

$$\overline{u^2} = \frac{U^2}{U_{ref}^2} \quad (5.4)$$

$$U_{rms} = \sqrt{\overline{u^2} - (\bar{u})^2} = \sqrt{\overline{u' u'}} \quad (5.5)$$

$$k = \frac{1}{2}(\overline{u' u'} + \overline{v' v'} + \overline{w' w'}) \quad (5.6)$$

Los valores medios cuadráticos de las componentes de velocidad (U_{rms}) y la energía cinética turbulenta (k) también son empleados para describir el fenómeno del flujo que pasa a través de los sólidos. Por otro lado, en el sólido se hace uso de las variables de temperatura y humedad. Para la temperatura se emplean variables de temperatura global, temperatura superficial y temperatura uniforme, las cuales se definen por las ecuaciones 5.7, 5.8 y 5.9, respectivamente. Respecto al comportamiento de la humedad se utiliza la humedad global descrita por la ecuación 5.10.

$$T_{glob} = \frac{1}{V_{total}} \int T(x, y, z, t) \, dV \quad (5.7)$$

$$T_{surf} = \frac{1}{S_{total}} \int T(x, y, z, t) dS \quad (5.8)$$

$$T_{unif} = \sqrt{\left[\sum_{i=1}^{N_{surf}} (T_{surf}(t) - T(x, y, z, t)_i)^2 \right] / N_{surf}} \quad (5.9)$$

$$M_{glob} = \frac{1}{V_{total}} \int M(x, y, z, t) dV \quad (5.10)$$

Donde V es el volumen del sólido, S es la superficie del sólido, N_{surf} son los nodos que se encuentran en la superficie del alimento, $T(x, y, z, t)$ es la temperatura instantánea, $M(x, y, z, t)$ es la humedad contenida del alimento.

5.1 Caso A

5.1.1 Velocidad

El flujo alrededor del tren de muestras se presenta en la figura 5.1. El flujo al principio se encuentra con la cara frontal del primer cubo, así disminuyendo gradualmente la velocidad y en consecuencia aumentando la presión en esta zona. Así mismo en el centro de la cara frontal del primer cubo se presenta un punto de estancamiento (punto B en figura 5.1). En la parte posterior del primer cubo (punto I en figura 5.1) la presión es menor. El gradiente de presión entre las zonas mencionadas es la fuerza de arrastre en la dirección longitudinal.

Se observa que en los vértices de la cara anterior del primer cubo (punto A en figura 5.1) ocurre el desprendimiento de la capa límite, como consecuencia se tiene la aparición de vórtices en el punto indicado y detrás de este sólido se presenta la estela que abarca a los demás sólidos (punto C en figura 5.1). Además, se presentan zonas de recirculación en las zonas de separación entre cada muestra de alimento debido a su geometría (puntos I – VI en figura 5.1). Por otra parte, lejos de las muestras de alimento el flujo principal no es afectado por la estela, por lo que permanece uniforme (punto D figura 5.1). A pesar de que en la figura 5.1 se muestra el flujo para seis sólidos, el comportamiento de flujo para un tren de nueve muestras es similar debido a que el flujo es principalmente caracterizado por las primeras muestras.

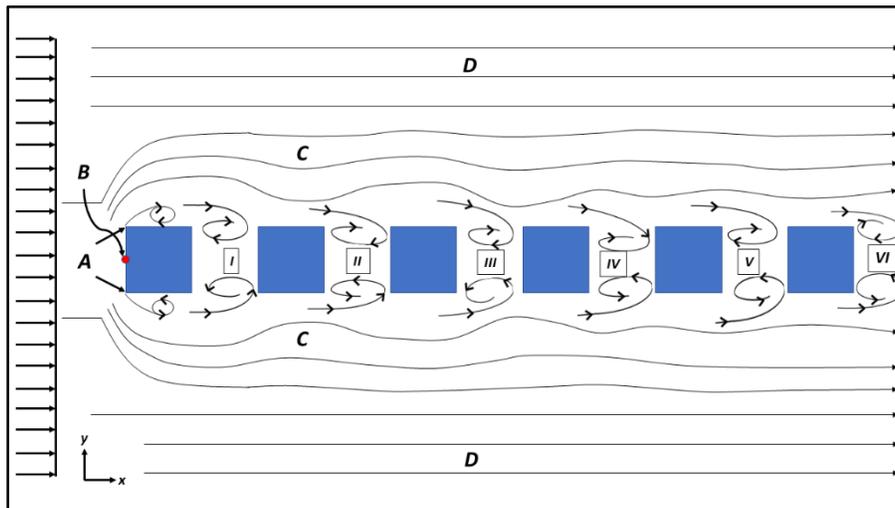


Figura 5.1 Esquema de flujo externo.

En la figura 5.2 se muestran los contornos de velocidad longitudinal promedio para los casos *I*, *II*, *III* y *IV*. Se puede observar que para todos los casos el comportamiento del flujo es como se describió anteriormente (ver figura 5.1). Para todos los casos, la velocidad disminuye en la cara frontal del primer sólido y cerca de la cara superior e inferior de este mismo se presentan contornos de velocidad negativa, indicando recirculaciones (vórtices) como consecuencia del desprendimiento de la capa límite. En comparación con el primer sólido, los sólidos restantes presentan magnitudes negativas menores en las caras superiores e inferiores, debido a que se encuentran dentro del flujo turbulento, estos son notables en el caso *IV*.

Por otro lado, en los espacios entre sólidos se presentan zonas de recirculación identificadas por valores negativos de velocidad. Estas zonas son provocadas por la interacción del flujo con la geometría y la longitud de separación entre sólidos. Se puede notar que cuando la separación es pequeña (figura 5.2 inciso a), la recirculación de la velocidad es significativa detrás del primer y segundo sólido debido a mayores valores negativos de velocidad, mientras que en los demás sólidos la velocidad tiende a valores nulos indicando recirculaciones con menor magnitud de velocidad. Esto apunta a que el flujo no influye en las zonas de separación, lo cual sugiere que a partir del tercer sólido y hasta el último sólido se consideren como uno mismo, es decir, una barra sólida. Sin embargo, al aumentar la separación entre alimentos (figura 5.2 incisos b y c) las zonas de recirculación son más relevantes. Se puede apreciar que cuando la separación es mayor, los contornos de velocidad negativa abarcan mayor área, presentando vórtices dentro de la zona de separación (casos II y III). Así mismo, es importante señalar que los contornos de velocidad mostrados en la parte superior e inferior del tren no son simétricos, debido a que se requiere mayor cantidad de tiempo para que las variables estadísticas converjan.

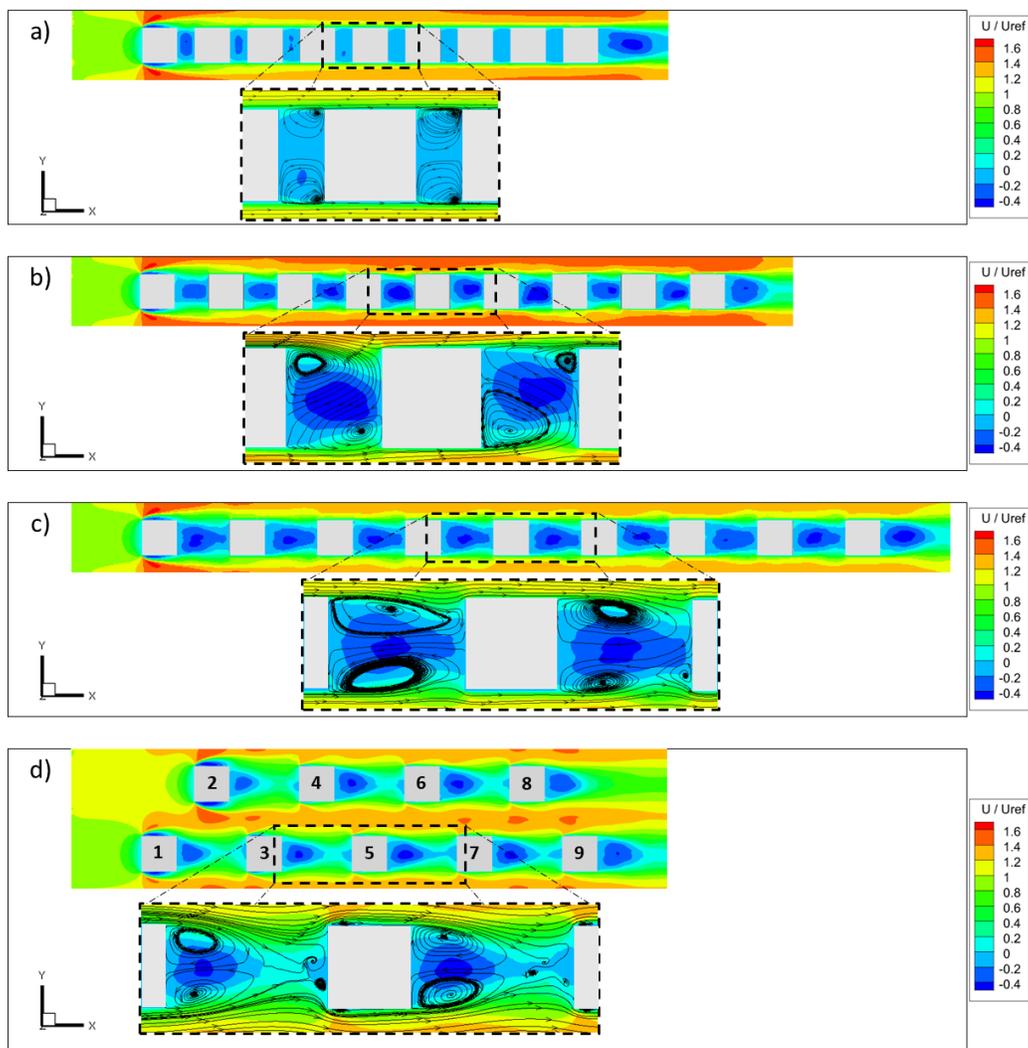


Figura 5.2 Contornos de velocidad U promedio para diferentes longitudes de separación: a) Caso I, b) Caso II, c) Caso III y d) Caso IV.

Respecto al caso **IV**, la separación longitudinal entre alimentos es considerablemente grande, provocando que las zonas de recirculación se encuentren más cercanas a la parte trasera de cada sólido. Además, se puede observar que a partir del tercer y hasta el último sólido, en las caras frontales se presentan recirculaciones por valores negativos de velocidad. Lo anterior es debido a que el flujo al atravesar por el sólido tiende a converger aguas abajo, chocando con la cara frontal del sólido que se encuentra detrás de este y con ello provocando recirculaciones en esta zona. Por otra parte, la separación transversal entre los cuerpos no repercute en el comportamiento del flujo a lo ya observado en los casos anteriores (**I-III**), debido a que en la parte superior e inferior de cada hilera se presentan contornos de velocidad ligeramente mayores que la velocidad de referencia. Lo anterior indica que los contornos de velocidad serán simétricos en cada hilera para tiempos mayores, donde las variables estadísticas convergen.

En la figura 5.3 se muestran los contornos de velocidad V promedio para los casos **I**, **II**, **III** y **IV**. Se puede notar que en el primer sólido para los casos **I**, **II** y **III** se presentan mayores magnitudes de velocidad en las esquinas de la cara frontal, positivas para la esquina superior y negativas para la esquina inferior, esto como consecuencia de la interacción del flujo con la geometría del sólido y el desprendimiento de capa límite. A partir del tercer sólido del caso **II** (figura 5.3b), se observan mayores magnitudes de velocidad V cerca de la cara frontal de cada cuerpo, tanto negativas como positivas, indicando recirculaciones con mayor magnitud en estas áreas, pues el tamaño y ubicación de los vórtices es diferente, las cuales son notorias en la figura 5.2b. No obstante, este fenómeno se repite en sólidos subsecuentes.

Analizando el caso **III**, se puede notar que a partir del segundo y hasta el último sólido se presenta el mismo comportamiento de velocidad V que se muestra en el primer sólido, pero en menor magnitud, ver figura 5.3c punto A. La presencia de estas regiones es consecuencia de aumentar la distancia de separación entre sólidos, formando vórtices similares tanto en tamaño como ubicación (figura 5.2c). Dado que el tamaño de los vórtices disminuye cerca de la cara frontal de cada cuerpo, representadas por magnitudes negativas de velocidad U , en las regiones de la esquina superior e inferior se presentan contornos de velocidad U positivos, indicando que el flujo converge en estas zonas. Con base a lo anterior, la velocidad V aumenta en estas esquinas por el efecto de bloqueo.

También para el caso **IV** se puede observar que todos los sólidos presentan magnitudes notorias de velocidad V en las esquinas de la cara frontal, aunque las más relevantes son las del primer sólido de cada hilera. Sin embargo, al ser mayor la distancia entre sólidos, permite que el flujo converja en zonas cercanas al centro de la cara frontal de cada sólido (figura 5.2d), provocando regiones de velocidad V considerable en las esquinas frontales del cuerpo y contornos negativos de velocidad U sobre la cara frontal e inferior, indicando recirculaciones.

Los contornos de velocidad U y V muestran que el flujo alrededor de los cuerpos es similar a partir del quinto sólido para los casos **I**, **II** y **III**. Los acercamientos de la figura 5.2 muestran que las recirculaciones son similares en la parte frontal y trasera de cada sólido. En el caso **II**, los vórtices no son simétricos respecto al eje longitudinal en medio del tren, pero sí lo son para el eje transversal que pasa al centro del cuerpo. Por lo que esta configuración se repite para los cuerpos sucesivos. Respecto al caso **IV**, se considera que el flujo alrededor del cuerpo es similar para todos los sólidos, porque la separación longitudinal y vertical es grande para no presentar interacción entre sí.

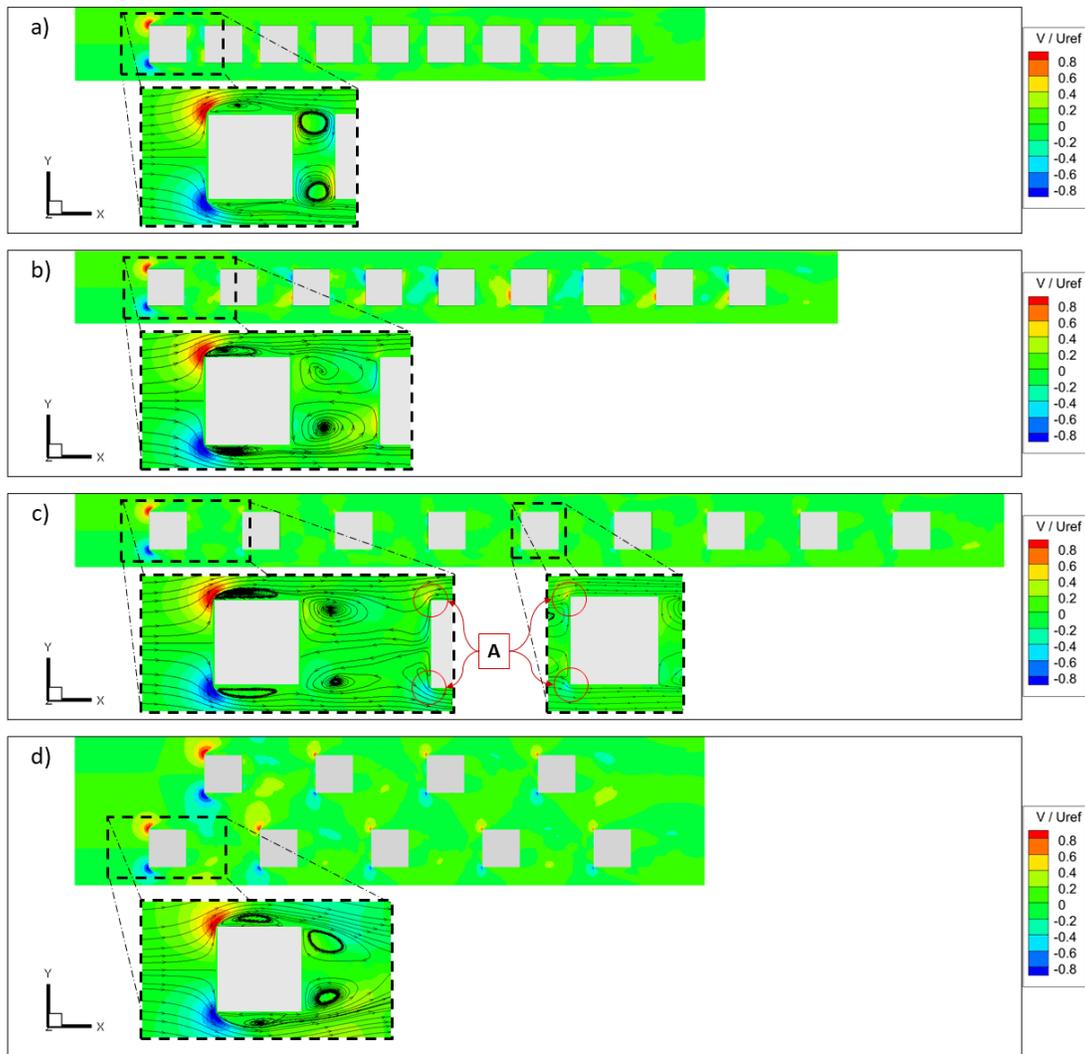


Figura 5.3 Contornos de velocidad V promedio para diferentes longitudes de separación:
a) Caso I, b) Caso II, c) Caso III y d) Caso IV.

Las figuras 5.4 y 5.5 muestran fluctuaciones de velocidad U_{rms} y V_{rms} . Es importante mencionar que los contornos de fluctuación mostrados no son simétricos, pues requiere mayor tiempo para que converjan las fluctuaciones.

En la figura 5.4 se puede observar que en el caso *I* los mayores valores se encuentran en el primer sólido en la cara superior, inferior y en la parte posterior del último sólido. La primera zona descrita es debido a la separación de capa límite y la otra zona es a causa de recirculaciones propias del tren. El hecho de que la separación entre sólidos sea reducida provoca que la intensidad turbulenta a partir del segundo sólido sea casi nula.

Los casos *II* y *III* presentan el mismo comportamiento que el caso *I* respecto al primer sólido. Sin embargo, se observa que la intensidad turbulenta en las zonas de separación entre sólidos es mayor comparada con el caso *I*, debido a recirculaciones de mayor magnitud (figura 5.2 puntos b y c). También se puede notar que a partir del quinto sólido se presentan altos valores cerca de las caras superiores e inferiores. Sin embargo, el área que comprende los sólidos S6, S7 y S8 del caso *II*

presenta mayores valores de fluctuación para U_{rms} y V_{rms} (figura 5.4b y 5.5b). Esto sugiere que en las zonas de separación las recirculaciones sean de mayor magnitud, lo cual se refleja con mayores áreas de velocidad negativa U (figura 5.2b), así como también mayores valores tanto positivos como negativos de la velocidad V (figura 5.3b). Además, es importante considerar que estos contornos de fluctuación no son simétricos respecto al eje de simetría marcado en la figura 5.4b, debido a que requiere de mayor tiempo para que las variables estadísticas converjan.

Por otro lado, en el caso **IV** se observa que todos los sólidos de las dos hileras presentan altos valores en las caras superiores e inferiores debido al desprendimiento de capa límite, lo cual es causado por la mayor separación entre sólidos en la dirección longitudinal. La cara trasera muestra bajos valores, debido a que es la zona con menor interacción con el flujo. Además, la región que separa a las dos hileras muestra bajos valores de fluctuación, describiendo flujo uniforme.

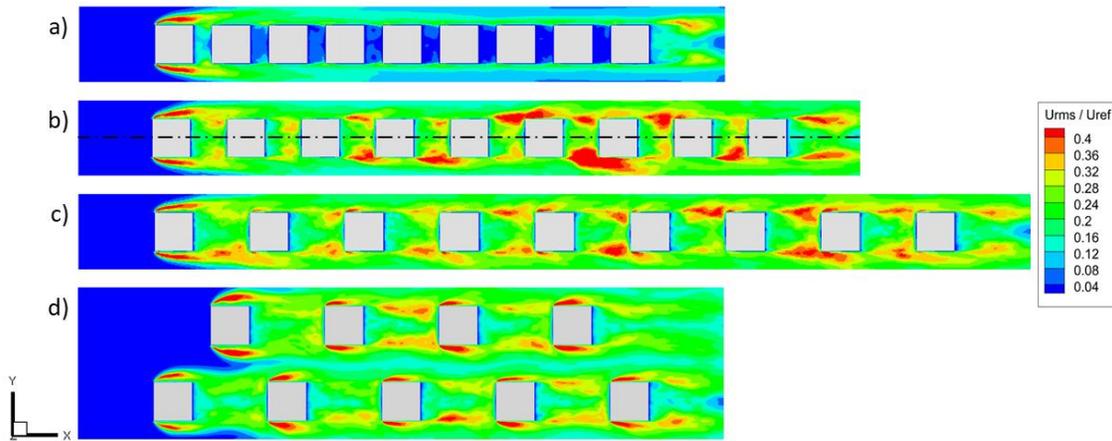


Figura 5.4 Contornos de U_{rms} para diferentes longitudes de separación: a) Caso I, b) Caso II, c) Caso III y d) Caso IV.

En la figura 5.5 se muestran los contornos V_{rms} , se consideran que por simetría los contornos V_{rms} del plano xy son similares a los contornos W_{rms} del plano xz . En el caso **I** se puede observar que los mayores valores se encuentran en el primer sólido detrás de la cara frontal, pero disminuye de manera gradual para los sólidos restantes. Lo anterior se relaciona con el desprendimiento de la capa límite y recirculaciones significativas del primer sólido. En los sólidos subsiguientes, los valores disminuyen considerablemente porque la interacción del flujo con la región de separación de sólidos es nula. Al final del tren se observan valores significativos debido a las recirculaciones formadas por el mismo tren.

En el caso **II** y **III** se puede notar que los mayores valores se presentan en las caras frontales a partir del quinto y cuarto sólido, respectivamente. Se considera que las recirculaciones favorecen la fluctuación en esta zona por la interacción del flujo que entra a la zona de separación y la cara frontal del cuerpo. En contraste, para el caso **III** las bajas fluctuaciones se encuentran detrás de cada sólido, debido a que el centro de los vórtices se encuentra separados de la cara trasera y la magnitud de velocidad negativa V , cercana a esta superficie, no es significativa.

Por otro lado, en el caso **IV** se observa que los mayores valores se encuentran entre los sólidos S3 – S9. En la cara frontal de estos sólidos se presentan regiones de mayor fluctuación debido a que el flujo converge y en consecuencia provoca recirculaciones sobre esta cara. No obstante, las bajas

fluctuaciones se encuentran detrás de cada sólido y en la región que separa a las dos hileras. La primera zona identificada se asocia a los centros de vórtices separados de las caras traseras y la segunda zona es en relación con la grande longitud de separación vertical. La región que separa las hileras presenta características de flujo uniforme, las cuales concuerdan con los bajos valores de fluctuación en esta zona.

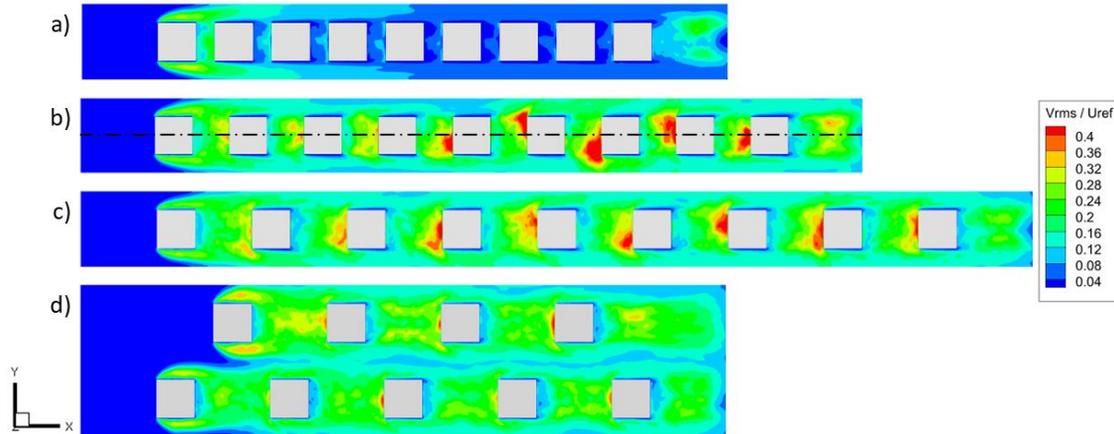


Figura 5.5 Contornos de V_{rms} para diferentes longitudes de separación: a) Caso I, b) Caso II, c) Caso III y d) Caso IV.

La energía cinética turbulenta se obtuvo con la ecuación 5.6, la cual se muestra en la figura 5.6. En el caso **I**, se observa que la mayor intensidad se encuentra en el primer sólido y detrás del tren, mientras que a partir del segundo sólido la intensidad turbulenta disminuye gradualmente. Se establece que los casos **III** y **IV** muestran valores más representativos de la energía cinética turbulenta, al considerar mayor longitud de separación longitudinal en esta zona.

En el caso **III**, la intensidad turbulenta es considerable en el primer sólido para la cara superior e inferior, debido al desprendimiento de capa límite en las esquinas frontales. Para los sólidos restantes, la turbulencia es significativa en la cara superior, inferior y frontal. No obstante, regiones cercanas a la cara trasera de cada sólido muestra baja intensidad turbulenta, debido a que es la zona donde tiene menor interacción con el flujo y por recirculaciones separadas de las caras traseras.

El caso **IV**, muestra mayor turbulencia en los alrededores de cada hilera, incluyendo las zonas de separación. Sin embargo, la turbulencia disminuye conforme se aleja de cada hilera en la dirección vertical. Se observa que la región de separación entre hileras muestra valores bajos, lo cual se relaciona con el flujo uniforme. Además, las caras traseras presentan baja turbulencia por su geometría, como en el caso **III**.

Se obtienen perfiles de las variables cuadráticas (U_{rms} y V_{rms}) y variables promedio (U y V) para todos los sólidos en dos posiciones, con el fin de analizar más detenidamente el flujo alrededor de los sólidos. La primera posición a una distancia $y/L_{ref} = 0.05$ (figura 5.7) y la segunda posición se encuentra sobre $x/L_{ref} = 0.5$ (figura 5.8).

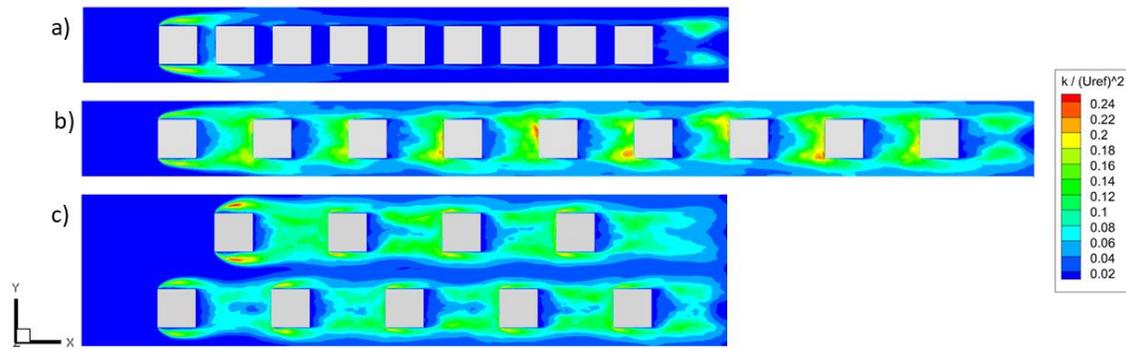


Figura 5.6 Energía cinética turbulenta: a) Caso I, b) Caso III y c) Caso IV.

En la figura 5.7 para los casos *I*, *II* y *III*, la velocidad U del primer sólido (S1) aumenta significativamente para después disminuir a valores negativos, lo cual indica que a esta distancia se encuentran las recirculaciones generadas por el desprendimiento de capa límite. Después la velocidad U aumenta hasta valores positivos, donde el flujo no es afectado por la recirculación. Así mismo, la variable U_{rms} muestra que el primer sólido aumenta sus valores en el inicio para después disminuir, la distancia en que ocurre este fenómeno concuerda con la del comportamiento de velocidad U de positivo a negativo. A partir de la longitud $x/L_{ref} = 0.4$, la fluctuación longitudinal tiende a ser constante porque se encuentra dentro de la estela y no hay presencia de recirculación en esta zona. Por otra parte, los sólidos restantes (S2-S9) muestran perfiles de velocidad U constante cercanos al valor de velocidad de referencia, debido a que se encuentran suficientemente lejos de la cara superior para afectar al flujo por condición de no deslizamiento en la superficie del sólido. Con base en lo anterior estos sólidos también muestran fluctuaciones constantes y parecidas entre cada sólido, debido a que se ubican dentro de la estela donde el flujo es turbulento, como se aprecia en el caso *I* y *II*. No obstante, para el caso *III* los perfiles de fluctuación de los sólidos (S2-S9) presentan la misma tendencia que el primer sólido, pero con mayores valores en el inicio del sólido. Lo anterior es debido a que la separación entre sólidos es grande, permitiendo que el flujo converja en la cara frontal cerca de las esquinas, siendo más notorio el desprendimiento de capa límite.

La componente de velocidad V para el primer sólido muestra en el inicio valores altos, debido a la interacción del flujo con la geometría del sólido, desviando el flujo hacia las esquinas frontales del sólido (figura 5.3), alcanzando el máximo valor. En longitudes subsecuentes la velocidad V disminuye, debido al flujo uniforme (paralelo al eje longitudinal) y después alcanza valores negativos correspondientes a la recirculación causada por el desprendimiento de capa límite. Las fluctuaciones V_{rms} alcanzan el valor máximo en el inicio, para después disminuir y mantenerse constante, lo cual se relaciona con la disminución de velocidad V hasta valores nulos. Las oscilaciones de V_{rms} son provocadas por los valores negativos de velocidad V que se acercan al valor nulo cuando se tiene la distancia $x/L_{ref} = 1.0$. Para los sólidos restantes (S2-S9), la componente de velocidad es baja a lo largo del sólido, pero en la entrada los valores son ligeramente mayores, debido a que el flujo converge en la cara frontal (cerca de las esquinas) por aumentar la longitud de separación. Esto cambia la dirección del flujo, para que sea paralelo a esta cara. Entonces al aumentar la separación entre alimentos, la variable V también aumenta al inicio. Esto se ve reflejado con las altas fluctuaciones V_{rms} que se encuentran en el inicio, donde ocurre la interacción entre el flujo con la cara frontal de cada sólido. Se puede notar que entre más aumenta la distancia de separación, la fluctuación V_{rms} de cada sólido es similar en toda la longitud.

Lo descrito anteriormente para los casos *I-III* ocurre de la misma manera para el caso *IV*. No obstante, la presencia de dos hileras provoca que los sólidos S1 y S2 muestren perfiles similares de velocidad U , V y la fluctuación V_{rms} . Como la separación longitudinal entre sólidos es considerablemente grande, en la región trasera de cada sólido el flujo converge cerca de la cara frontal del sólido subsecuente. Esto provoca que el flujo alrededor del primer cuerpo de cada hilera sea similar para los demás sólidos. Por esta razón, las fluctuaciones U_{rms} de los sólidos S3-S9 tienen la misma tendencia que S1 y S2, pero mayor debido a que se encuentran dentro de la estela. Por otra parte, las fluctuaciones V_{rms} de S3-S9 son ligeramente menores que los sólidos S1 y S2, porque la velocidad V tiende a valores nulos.

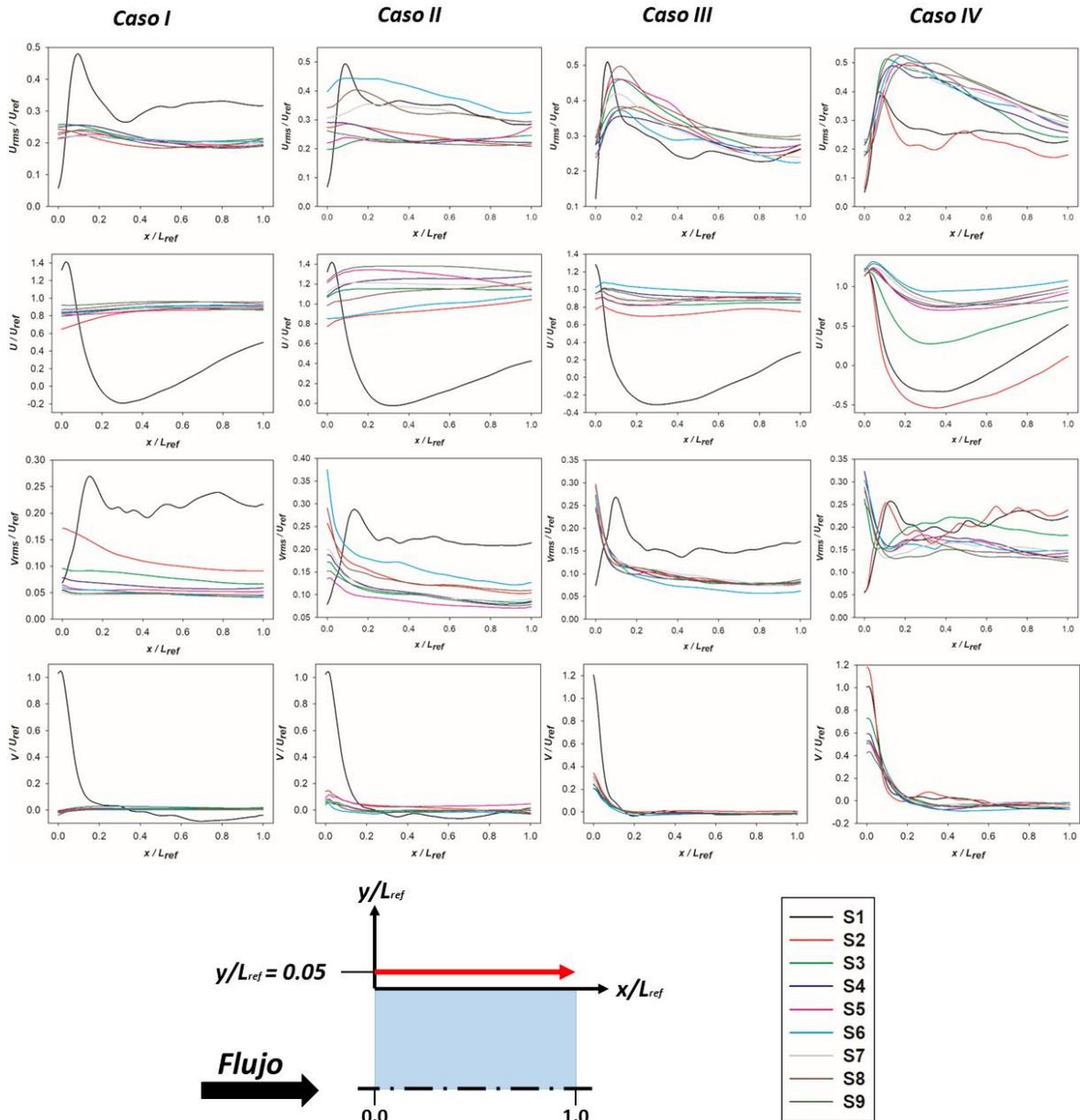


Figura 5.7 Perfiles de velocidad

En la figura 5.8 para los casos *I*, *II* y *III*, la componente U del primer sólido muestra valores negativos cerca de la superficie del sólido para después aumentar a valores positivos, los cuales se atribuyen a recirculaciones por el desprendimiento de capa límite. Esto a su vez genera las mayores fluctuaciones U_{rms} en zonas cercanas a la superficie del sólido. Se considera que a partir de la distancia $y/L_{ref} = 0.3$ y distancias mayores, la velocidad U es constante, lo cual indica que el flujo es uniforme y en consecuencia se presentan fluctuaciones longitudinales bajas. Para los demás sólidos (S2-S9), la velocidad U es baja cerca de la superficie, debido a los efectos de esfuerzos viscosos. Después la velocidad es constante por el flujo uniforme, no obstante, es ligeramente menor que la que se presenta en el primer sólido por la interacción del flujo con los demás cuerpos que conforman al tren.

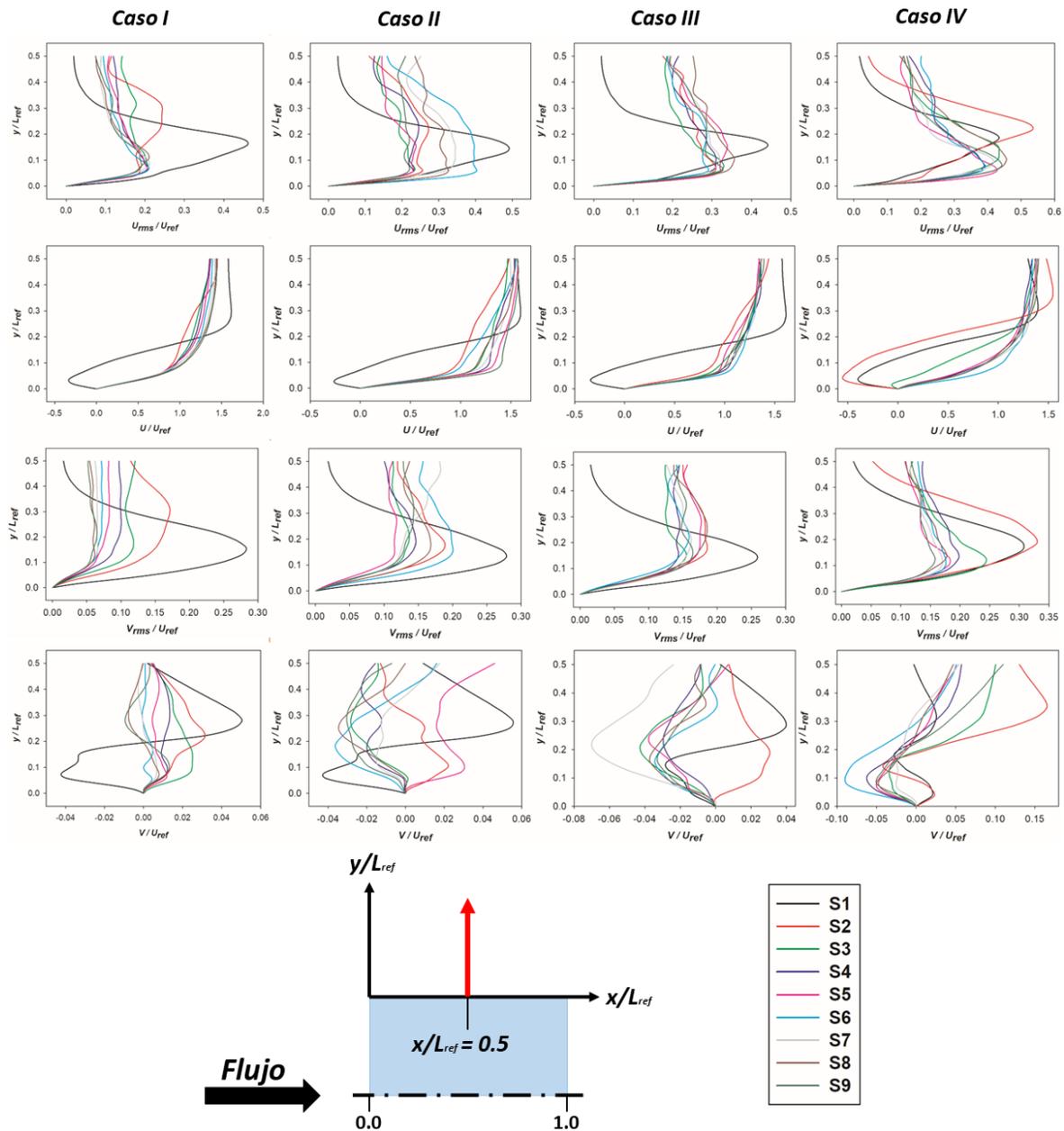


Figura 5.8 Perfiles de velocidad cuadráticos y promedio.

Así mismo, la componente V para el primer sólido de los casos **I-II-III** y los sólidos S1-S2 del caso **IV**, presentan magnitudes negativas cerca de la superficie del sólido asociados al desprendimiento de capa límite. Después la componente presenta valores positivos los cuales son causados por la dirección del flujo, causada por la interacción de este mismo y el sólido. Cuando la distancia es igual a $y/L_{ref} = 0.5$, la velocidad V tiende a cero, porque es la zona donde se encuentra flujo uniforme. Con base a lo anterior las fluctuaciones V_{rms} son mayores cerca de superficie a causa de recirculaciones para después disminuir a valores nulos por flujo uniforme.

En los casos **I** y **II**, la velocidad V de los sólidos (S2-S9) no son similares entre ellos, algunos presentando valores positivos y otros negativos, pues se considera que los valores son muy pequeños y las variables estadísticas no han convergido. Como son valores de velocidad V bajos comparados con los de la componente U , estos no son percibidos en la figura 5.3. No obstante, se presentan fluctuaciones V_{rms} con bajos valores en comparación con las que presenta el primer sólido. Para los casos **III** y **IV** con los sólidos (S2-S9) y (S3-S9), respectivamente, muestran perfiles similares de V a la del primer sólido. Esto es en relación con la recirculación cercana a la esquina frontal, lo que provoca que el flujo converja sobre la cara superior. La dirección del flujo implica que la velocidad V aumente negativamente cerca de esta cara. En zonas más apartadas de la superficie, la estela provoca que la magnitud V aumente ligeramente.

5.1.2 Temperatura

Se muestra la temperatura superficial instantánea de los cuerpos sólidos para el caso II en la figura 5.9, donde la longitud de separación entre cada sólido es de $N_2 = 1.0 L_{ref}$. Se observa que conforme el tiempo transcurre, la cara frontal del primer sólido aumenta su temperatura de manera significativa, debido a que es la primera zona donde interactúa el flujo de aire caliente. Se puede apreciar que el perfil de temperatura que se muestra en esta cara es simétrico [11]. En relación con las caras laterales del mismo sólido, la temperatura es menor, debido a que el aire ha disminuido su temperatura como consecuencia de la interacción entre la cara frontal y el flujo, indicando menor transferencia de calor sobre estas zonas por la pequeña diferencia de temperaturas entre las caras laterales y el aire. Sin embargo, se puede notar que los bordes y vértices presentan temperaturas altas, las cuales son apreciables en los primeros sólidos, ver figura 5.9 inciso e y f. Lo anterior es debido a que la transferencia de calor por convección es en dos direcciones para los bordes, mientras que en la esquina la transferencia de calor es por tres direcciones.

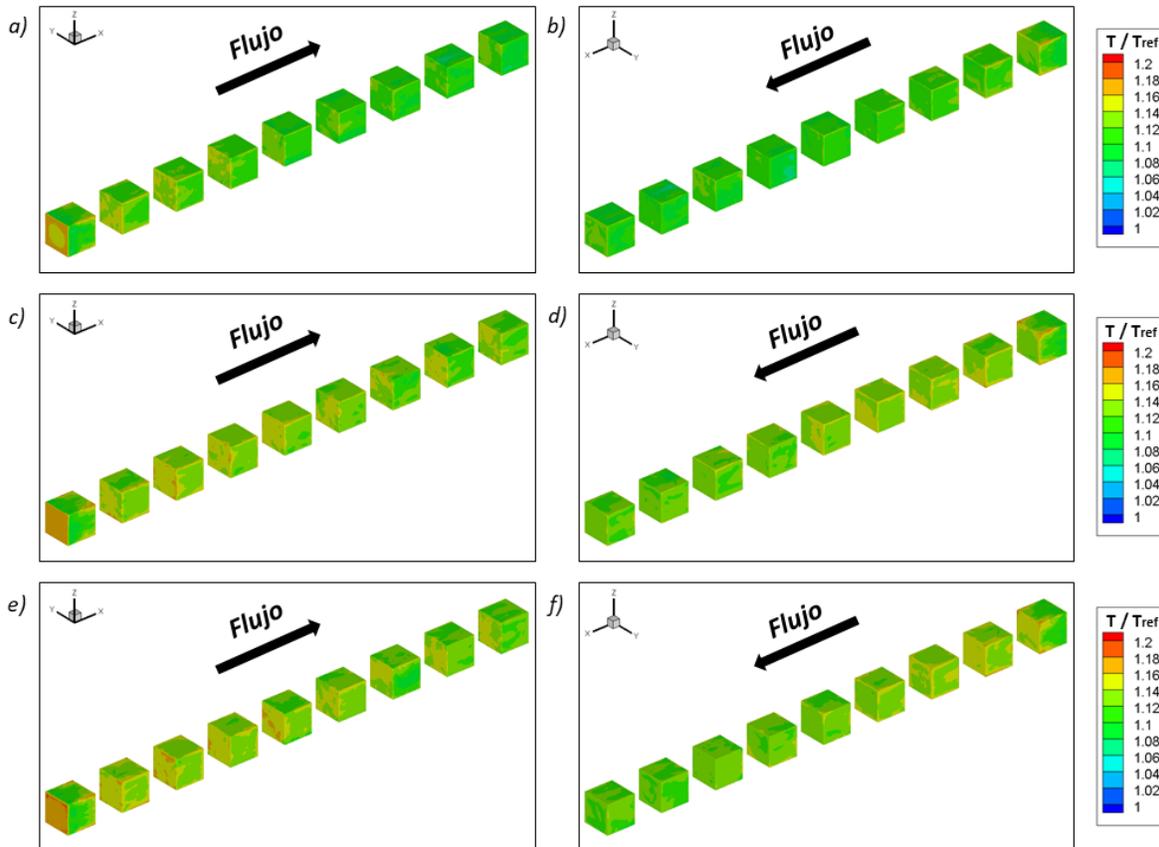


Figura 5.9 Temperatura superficial para diferentes instantes de tiempo: $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 10$ (a, b), $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 20$ (c, d) y $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 30$ (e, f). Las imágenes (a, c, e) son vistas frontales y (b, d, f) vistas traseras.

En el último instante de tiempo (figura 5.9 incisos e y f), se puede notar que a partir del segundo sólido la temperatura de la cara frontal de los demás sólidos no presentan contornos simétricos como la del primer sólido, no obstante, presentan pequeñas regiones de temperatura significativa. Esto es debido a que las separaciones entre los alimentos presentan zonas de recirculación, donde las fluctuaciones de velocidad incrementan, permitiendo que la transferencia de calor por

convección aumente (figura 5.4b y 5.5b). Por esta razón las caras frontales de los sólidos mencionados presentan pequeñas zonas de altas temperaturas, ver figura 5.9 incisos a, c y e. Por otra parte, las caras traseras de los sólidos tienen temperaturas menores, debido a que se presentan velocidades de menor magnitud cerca de estas caras (ver figura 5.2b), indicando baja turbulencia (figura 5.6), lo cual perjudica la transferencia de calor por convección.

Respecto a las caras laterales, los primeros cuatro sólidos presentan más regiones de altas temperaturas en comparación con los últimos sólidos, los cuales presentan temperaturas superficiales homogéneas. Lo anterior es a causa de la disminución de temperatura del flujo para esta región, debido al calor suministrado a los primeros sólidos.

Analizando los cuatro casos para el último instante de tiempo (figura 5.10), se observa que la mayor temperatura se encuentra en la cara frontal del primer sólido del tren, así como en sus bordes y vértices. Para el caso **IV**, se hace referencia a los primeros sólidos de cada hilera. Dado que este comportamiento se presenta en todos los casos, no se considera dentro de las descripciones subsiguientes relacionadas a la figura 5.10.

Para el caso **I**, se observa que las mayores temperaturas se presentan en las caras laterales, principalmente en los bordes y vértices, pues se considera que la transferencia de calor por convección es mayor en estas zonas. Por otro lado, las caras frontales y traseras de los sólidos presentan bajas temperaturas. Como este caso presenta la menor longitud de separación contemplada, la intensidad turbulenta no es favorable en las zonas de separación de sólidos debido a que las recirculaciones son de menor magnitud, las cuales son representadas por bajos valores de velocidad U , ver figura 5.2a y 5.6a. Por esta razón la transferencia de calor por convección es menor en estas caras.

Por otro lado, se puede notar que cuando la longitud es mayor como en los casos **II** y **III**, se presentan zonas de mayor temperatura en las caras frontales de los sólidos. No obstante, las caras traseras de los sólidos muestran menor temperatura superficial. Así mismo se considera que las caras frontales de los últimos sólidos del caso **II** muestran las temperaturas más bajas. Lo anterior es debido a que las fluctuaciones de velocidad (U_{rms} y V_{rms}) son mayores cerca de la cara frontal de cada sólido, con ello favoreciendo la transferencia de calor por convección. Esto es causa de magnitudes negativas de velocidad significativas en esta región, apuntando a recirculaciones de mayor magnitud. Por el contrario, en zonas cercanas a la cara trasera, las fluctuaciones de velocidad son menores porque es la zona que menor está expuesta al flujo, lo cual perjudica la transferencia de calor, ver figura 5.4 y 5.5 incisos b y c.

Además, en el caso **III** se observa que la temperatura en la cara trasera de los sólidos es homogénea, y ligeramente mayor que la del caso **II**. Esto es debido a que los vórtices predominantes que se forman en las regiones de separación del caso **III**, son similares tanto en tamaño como ubicación (figura 5.2c), provocando que la transferencia de calor sea homogénea. Lo anterior no sucede con el caso **II**, pues muestra un par de vórtices en cada separación con tamaño y ubicaciones diferentes (figura 5.2b).

El arreglo del caso **IV** provoca que la cara frontal de cada sólido muestre mayor temperatura en comparación con sus demás caras. Como la separación longitudinal es muy grande, la zona de recirculación que se genera detrás del sólido no abarca toda la región de separación. Además, se

debe considerar que la separación vertical es lo suficientemente grande para que no haya interacción entre cada hilera, pues en la zona de separación la turbulencia es menor, considerando flujo uniforme. En consecuencia, el flujo converge antes de encontrarse con la cara frontal del sólido subsiguiente, presentando las mismas características del flujo que cuando se encuentra con el primer sólido de cada hilera. Lo que provoca que la transferencia de calor en la cara frontal sea mayor en comparación con las demás caras. Además, los bordes de los sólidos muestran mayor temperatura, debido a que la transferencia de calor por convección es en dos direcciones. No obstante, se puede notar que la cara trasera de cada sólido presenta bajas temperaturas, porque es la zona que menos se encuentra expuesta al flujo de aire caliente, por lo que presenta bajos niveles de intensidad turbulenta, ver figura 5.6c.

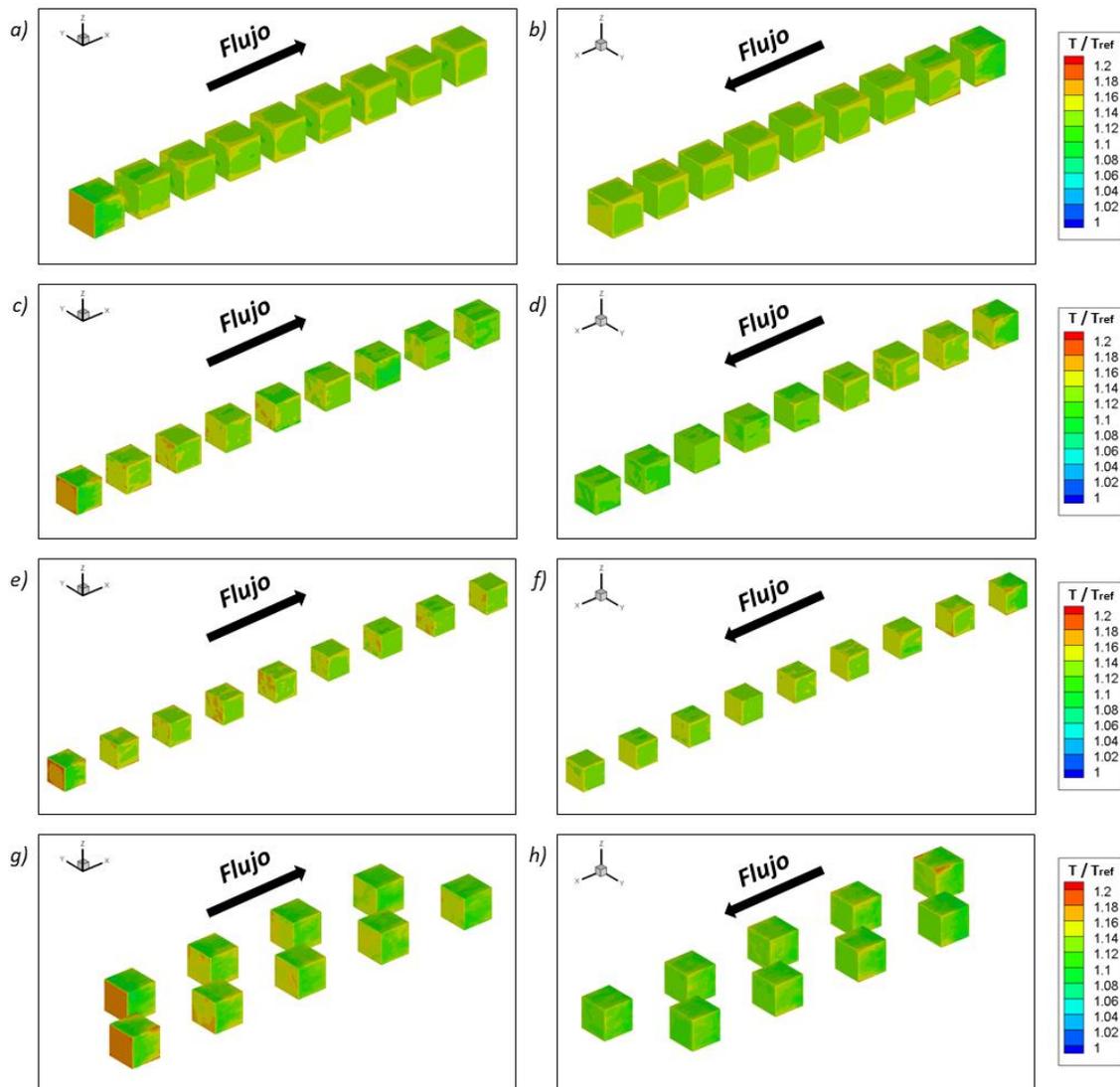


Figura 5.10 Temperatura superficial instantánea en $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 30$. Caso I: (a, b), caso II: (c, d), caso III: (e, f) y caso IV: (g, h).

En la figura 5.11 se muestran los contornos de temperatura interna instantánea del caso II en el plano xy justo a la mitad del sólido, debido a la geometría se considera que el perfil de temperatura

en el plano xy es similar al plano xz . Una vez que el flujo de aire caliente entra en contacto con los sólidos, aumenta la temperatura superficial como consecuencia de transferencia de calor por convección. En el momento en que la temperatura superficial supera la temperatura de global del sólido (T_{ref}), inicia la transferencia de calor por conducción de la superficie hacia el interior del cuerpo. La temperatura superficial debe ser considerablemente alta para que la transferencia de calor hacia el sólido sea mayor. Para el primer tiempo adimensional (figura 5.11a), se observa que en el interior de los sólidos la temperatura que predomina es la temperatura de referencia (T_{ref}), mientras que la temperatura en la superficie es mayor. Conforme el tiempo transcurre (figura 5.11b), la transferencia de calor por conducción aumenta como consecuencia del incremento de temperatura superficial, aumentando la temperatura en regiones cada vez más cercanas al centro del alimento. Por lo tanto, el centro del alimento será la última región en aumentar la temperatura.

En la figura 5.11c se observa que la temperatura en la cara frontal es muy alta, pero abarca una pequeña región. Además, en los vértices frontales de los primeros cinco sólidos se observan temperaturas altas, debido a que conforman los bordes de la superficie. Sin embargo, después del quinto sólido no se presenta este fenómeno, lo cual indica que la transferencia de calor es menor. Para esta zona se considera que el flujo ha disminuido ligeramente su temperatura, debido a la interacción con los primeros sólidos, cediendo energía. No obstante, el calor suministrado es considerable para todos los sólidos, pues presenta contornos de temperatura interna similares.

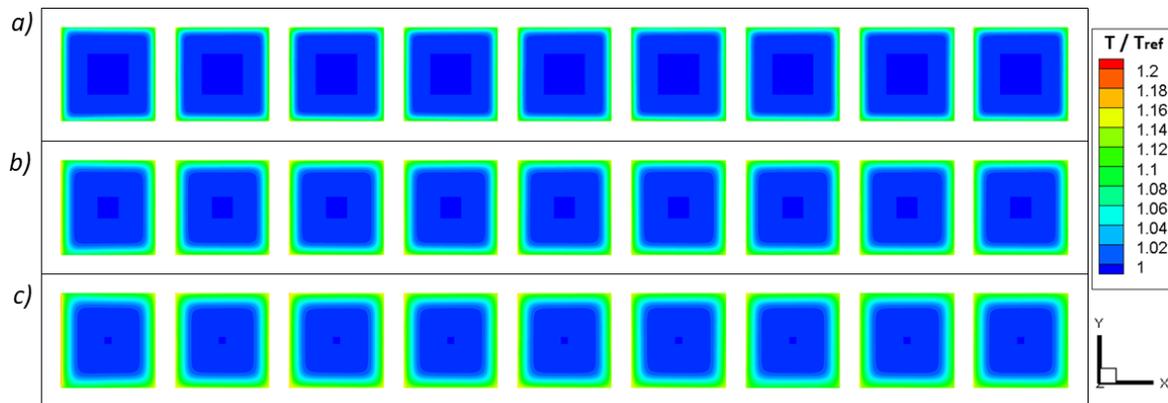


Figura 5.11 Temperatura interna del caso II en el plano $z/L_{ref} = 1.0$, para: **a)** $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 10$, **b)** $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 20$ y **c)** $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 30$.

En la figura 5.12 se muestra la temperatura interna para todos los casos. Se observa que la temperatura en la cara frontal del primer sólido es mayor, la cual abarca una pequeña región. Se estima que, al incrementar el tiempo de secado, esta región tendrá mayor área debido a que la transferencia de calor por convección es mayor en esta superficie. Esto ocurrirá de la misma manera para bordes y esquinas de cada sólido, siendo las primeras zonas en alcanzar temperaturas altas.

No obstante, se observa que los contornos de temperatura interna son similares entre cada caso para el último instante de tiempo. Aunque la distancia de separación es diferente para cada simulación, la temperatura interna será diferente para mayores tiempos de secado. Esto es debido a que las simulaciones se encuentran en la etapa de secado constante, donde la temperatura superficial es alta, pero incrementa lentamente.

Por este motivo, en todos los casos se observa que el perfil de temperatura interno es similar a partir del segundo sólido y hasta el último. No obstante, los casos **II** y **III** muestran temperaturas mayores en los vértices de los sólidos, lo que indica que la transferencia calor por conducción es mayor. Esto favorece el aumento de temperatura interna, lo que será notable en tiempos mayores.

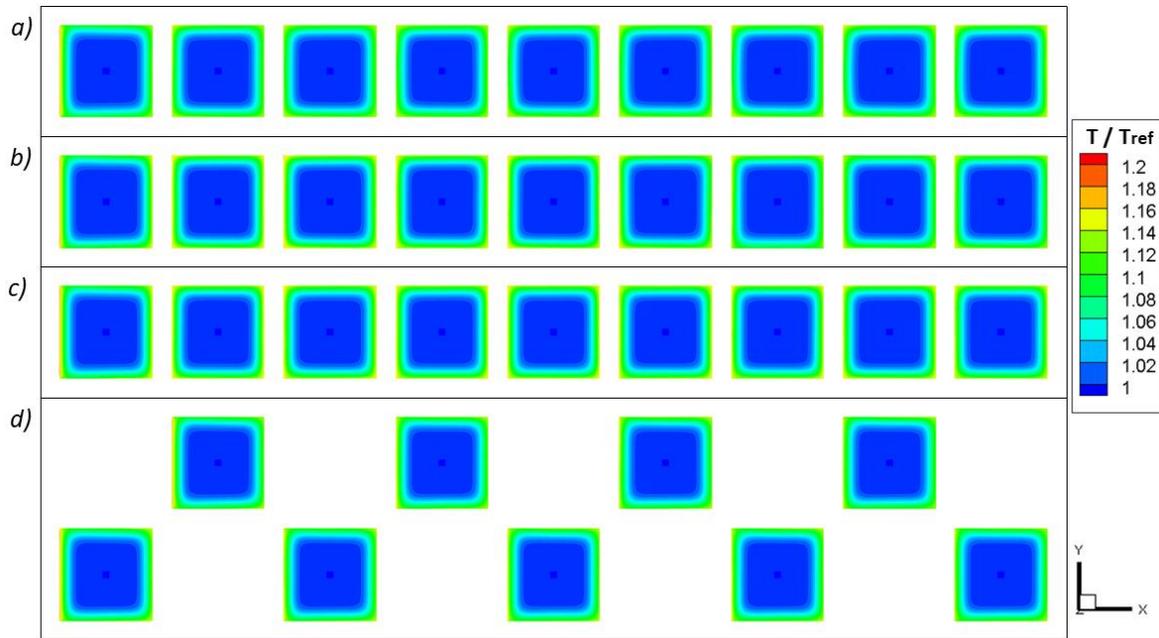


Figura 5.12 Temperatura interna en el plano $z/L_{ref} = 1.0$ y $t/(L_{ref} / U_{ref}) = 30$, para: a) caso I, b) caso II, c) caso III y d) caso IV.

La figura 5.13 muestra la temperatura global (T_{glob}) para los cuatro casos de acuerdo con la ecuación 5.7. En el inicio todos los sólidos incrementan su temperatura global de manera similar. Lo anterior se debe a que la temperatura inicial del aire se asigna a todo el dominio cuando el flujo se ha desarrollado, por lo que en el inicio la temperatura del aire que rodea a cada sólido es similar. Entonces la transferencia de calor por convección y conducción en el inicio es similar en cada sólido, debido a que la temperatura superficial es homogénea.

Conforme el tiempo transcurre la temperatura superficial incrementa, por lo que conducción también lo hace. Si bien los contornos de temperatura interna son similares para cada sólido, la temperatura superficial es diferente debido a la longitud separación entre ellos. Esto provoca que la temperatura global de cada sólido sea distinta, siendo el último instante de tiempo el más significativo. En el caso **I** y **III** se observa que el primer sólido tiene menor temperatura global en comparación con los demás sólidos que presentan temperaturas similares, esto a pesar de presentar en su cara frontal altas temperaturas. Lo anterior es debido a que los sólidos restantes se encuentran dentro de la estela, donde se favorece la transferencia de calor por convección, como consecuencia de la formación de recirculaciones, promoviendo mayor mezcla del fluido con temperaturas bajas (zonas cercas al sólido) y temperaturas altas (zonas lejanas al sólido). Además, se puede notar en la figura 5.12 que la cara frontal no presenta una región significativa de temperaturas altas. Analizando el comportamiento de temperatura de los casos **I** y **III**, se puede observar que la temperatura global de todos los sólidos del caso **III** es mayor en comparación con el

caso *I*, debido a la longitud de separación entre sólidos, pues la longitud del caso *III* es tres veces mayor que la del caso *I*.

Por otra parte, en el caso *II* el perfil de temperatura global de los sólidos son distintas. Los últimos sólidos (S6-S9) presentan temperatura global ligeramente menor en comparación con la del primer sólido. Esto es causado por la baja temperatura superficial en las caras laterales y traseras. Se considera que estos sólidos tardan más en aumentar su temperatura porque el aire cedió parte de su energía en los cuerpos cercano a la entrada.

Respecto al caso *IV* se observa que la temperatura global de todos los sólidos tiene tendencia similar, donde la temperatura global de S1 es ligeramente mayor por presentar bordes con mayor temperatura (figura 5.10 incisos g y h). El comportamiento de temperatura global es similar tanto para la primera hilera (S2, S4, S6 y S8) como la segunda hilera (S1, S3, S5, S7 y S9), pues la separación longitudinal y vertical es lo suficientemente grande para que el flujo converja detrás de cada sólido, ver figura 5.2d y 5.6c. Esto indica la nula interacción entre hileras como entre sólidos, mostrando contornos de temperatura superficial similares para cada sólido.

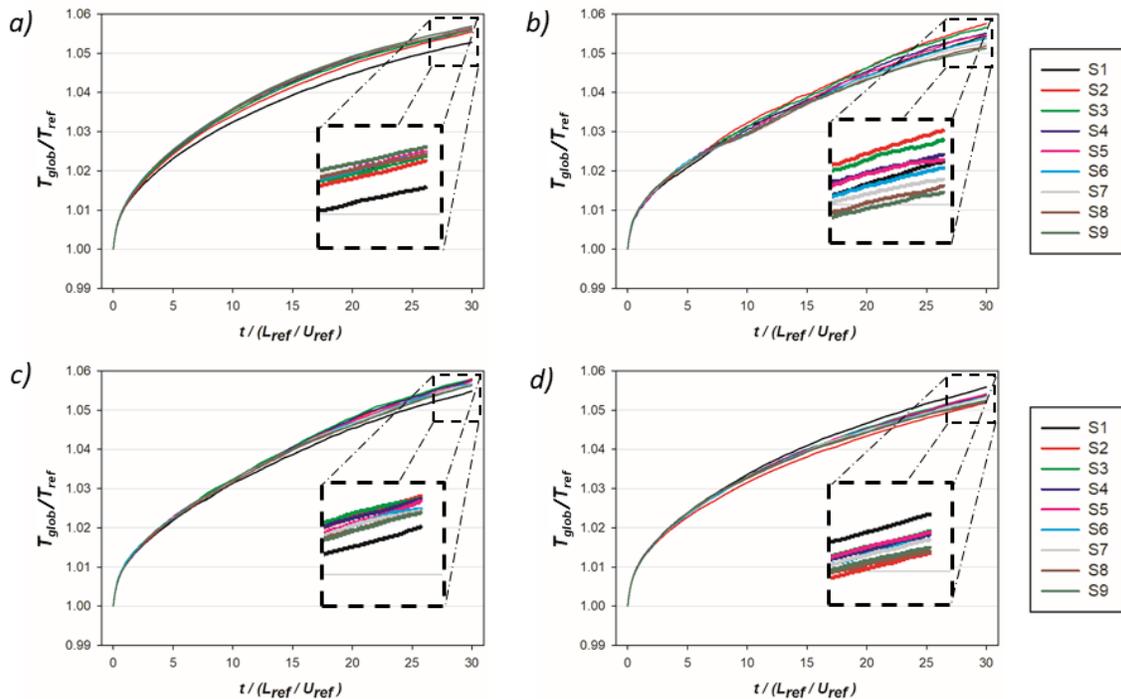


Figura 5.13 Temperatura adimensional global: a) Caso I, b) Caso II, c) Caso III y d) Caso III.

5.1.3 Humedad

En el proceso de deshidratación la temperatura está relacionada con la humedad. Una vez que se transfiere calor al alimento se provoca un aumento de temperatura superficial, proporcionando calor para la evaporización de humedad. La humedad superficial es removida rápidamente en los primeros instantes de tiempo, debido a altas temperaturas y la exposición al flujo. Es por esto que en la figura 5.14 se observan bajos valores de humedad en la superficie de los sólidos. No obstante, el proceso de difusión de masa dentro del alimento es lento, debido a que el coeficiente de difusión de masa es menor que el coeficiente de calor. De forma general, se aprecia que los bordes y vértices tienen los valores más bajos de humedad, debido a que se presentan altas temperaturas en estas zonas, ver figura 5.10.

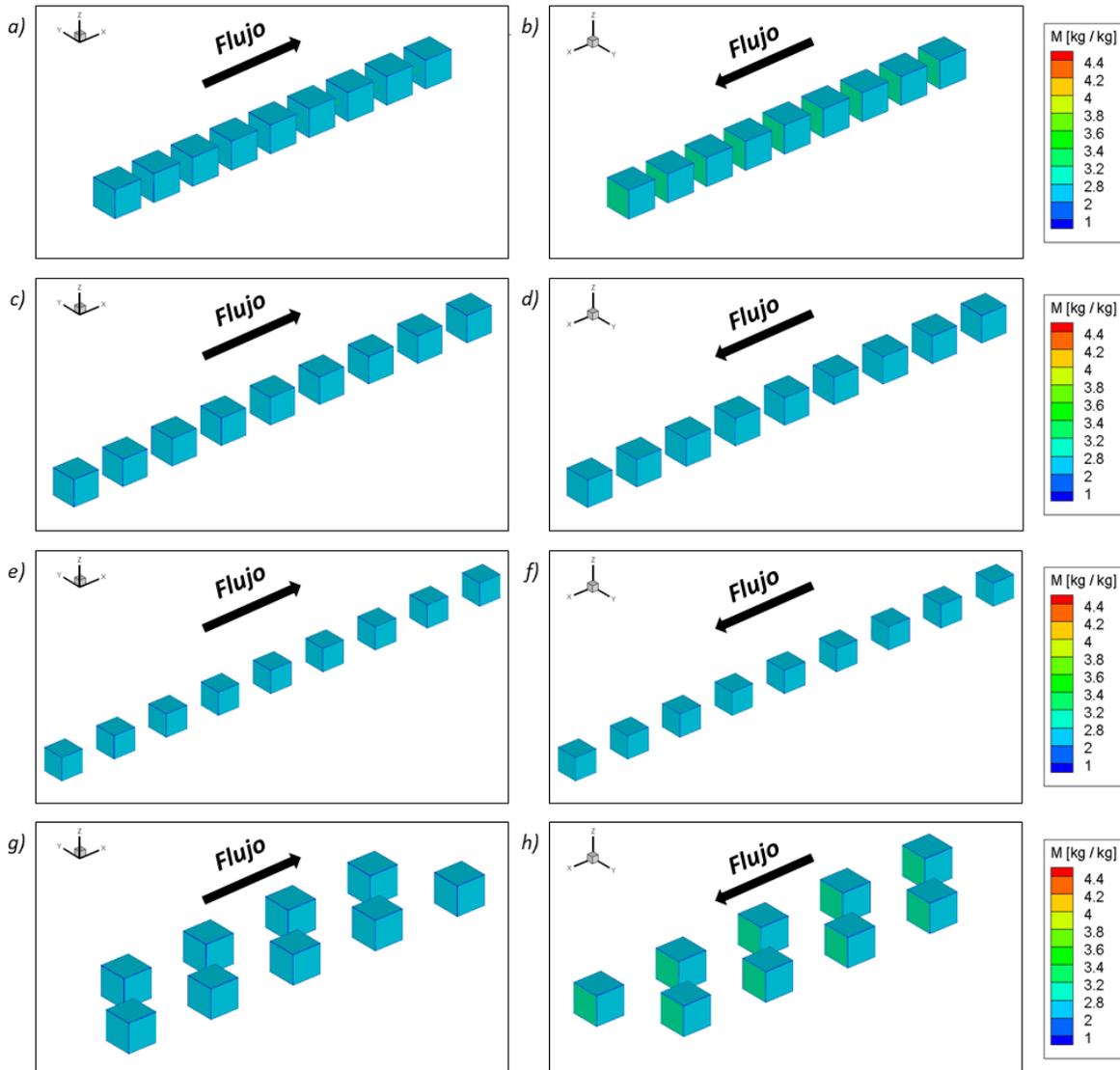


Figura 5.14 Humedad superficial en $t/(L_{ref} / U_{ref})=30$. Caso I: a)-b), caso II: c)-d), caso III: e)-f) y caso IV: g)-h).

En el caso I se puede observar que la humedad en las caras traseras de cada sólido es mayor a las demás caras, debido a la reducida separación entre alimentos provocando bajos niveles de

intensidad turbulenta en esta región (figura 5.6a). Lo anterior perjudica la transferencia de calor y la remoción de humedad en esta zona. Para el caso **II** y **III** se observa que la humedad superficial es similar en todos los sólidos mostrando niveles bajos de humedad en la superficie, indicando que la remoción de humedad superficial es homogénea. Lo anterior es relacionado con el aumento de separación entre sólidos, lo cual beneficia la remoción de humedad por mayor intensidad turbulenta en las zonas de recirculación.

Respecto al caso **IV**, se encuentran mayores valores de humedad en las caras traseras de los sólidos (similar al caso **I**). Esto se relaciona con la amplia separación entre sólidos, pues permite que el flujo converja cerca del sólido trasero de la respectiva hilera. Esto sugiere que la separación entre sólidos es sumamente grande, provocando que las recirculaciones se ubiquen cerca de la cara trasera de cada sólido. Lo anterior indica que no hay mayor interacción entre cada sólido, presentando bajos valores de fluctuación de velocidad cerca de la cara trasera. En consecuencia, se tienen bajas temperaturas y por ende mayor contenido de humedad en esta cara.

Por otro lado, la evaporación de la humedad superficial y los gradientes de temperatura dentro del alimento inducen el movimiento interno de humedad. En la figura 5.15 se muestra la humedad interna para los cuatro casos. Los contornos de humedad de los sólidos son similares entre sí respecto a cada caso, debido a que el proceso de difusión masa es lento. Por tal motivo, se optó por mostrar los sólidos de acuerdo con su ubicación. Los casos **I**, **II**, y **III** exponen los sólidos: S1, S3, S6 y S9. Respecto al caso **IV**, se muestran los sólidos: S1, S2, S5, S6, S8 y S9.

De forma general, se observa que los valores más bajos de humedad se ubican en esquinas y zonas cercanas a la superficie, correspondientes a las zonas de mayor temperatura, mientras que en la mayor parte del sólido predomina la humedad inicial. Esto apunta que la remoción de humedad superficial es más rápida en comparación con la difusión de humedad interna [11, 12]. La difusión de humedad es un proceso muy lento en comparación con la difusión de calor, pues el coeficiente difusivo de humedad también depende de la temperatura dentro de la muestra. Dentro del alimento cuando el contenido de humedad es alto, presenta bajas temperaturas, por lo que el coeficiente difusivo es de menor magnitud y cuando el contenido de humedad es bajo, debido a que la humedad fue evaporada por altas temperaturas, el coeficiente difusivo también aumenta [12].

En el interior de cada sólido la humedad empieza a tener un movimiento del centro hacia su superficie, debido a los gradientes de humedad. Al haberse evaporado la humedad en su superficie, esta es remplazada por la humedad que proviene de regiones cercanas a su superficie, por lo que la superficie no adquiere valores nulos de humedad. Se considera para este instante de tiempo que el proceso de secado se encuentra en la etapa de secado constante, pues los valores bajos de humedad interna se encuentran muy cercano a la superficie predominando la humedad inicial del alimento. Además, para todos los casos, las esquinas presentan los valores más bajos de humedad, esto es debido a la presencia de altas temperaturas en esta zona, proporcionando mayor calor a la humedad para ser removida.

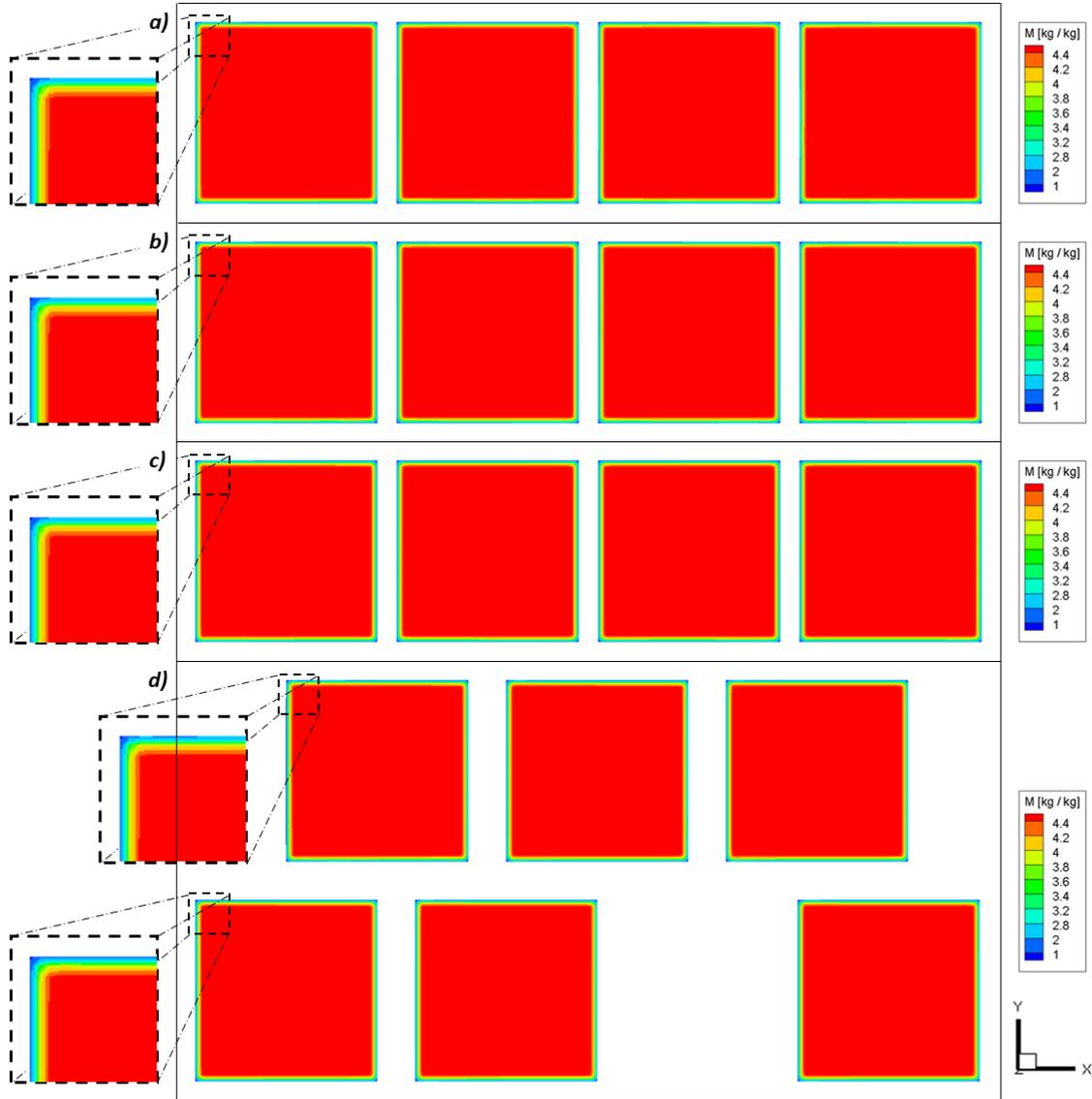


Figura 5.15 Humedad interna en $t/(L_{ref}/U_{ref})=30$ para: a) caso I, b) caso II, c) caso III y d) caso IV.

Para analizar con mayor detenimiento la humedad contenida en el sólido se utiliza la ecuación 5.10, donde el comportamiento de la humedad global es descrito por la figura 5.16. Se puede considerar que, a partir del décimo instante de tiempo adimensional, el proceso de deshidratación se encuentra en la etapa de secado constante, donde domina la velocidad de evaporización de humedad. Por lo que las curvas de humedad de todos los casos presenten el mismo comportamiento.

Antes de la etapa de secado constante, en los casos *I*, *II* y *III* se observa que la humedad del primer sólido es mayor en comparación con los demás. Esto se relaciona con la temperatura global del primer sólido para este intervalo de tiempo (ver figura 5.13), la cual es la más baja para los casos mencionados. Se puede argumentar que al ser menor la transferencia de calor dentro del sólido, la difusión de humedad es menor por el bajo suministro de energía, provocando que la remoción de

humedad disminuya. Sin embargo, para tiempos subsiguientes se puede observar que la curva de humedad del primer sólido tiende a comportarse de igual manera que los otros sólidos.

Además, conforme la separación entre sólidos aumenta, el primer sólido empieza a tener menor contenido de humedad, presentando perfiles de contenido de humedad similar a los demás sólidos (S2-S9). Esto se debe a mayores fluctuaciones de velocidad, que aumentan conforme aumentan la longitud de separación.

Respecto al caso **IV**, se puede apreciar que para la primera hilera (S1, S3, S5, S7 y S9) y la segunda hilera (S2, S4, S6, y S8), la remoción de humedad es similar a excepción del primer sólido de la segunda hilera (S2). La curva de humedad difiere por el comportamiento de su temperatura global en el inicio, como se mencionó anteriormente. Para tiempos subsiguientes la remoción de la humedad en la superficie predomina la velocidad de remoción de humedad, por lo que la humedad interna que reemplaza a la de la superficie no se ve afectada por ubicarse cerca de esta zona.

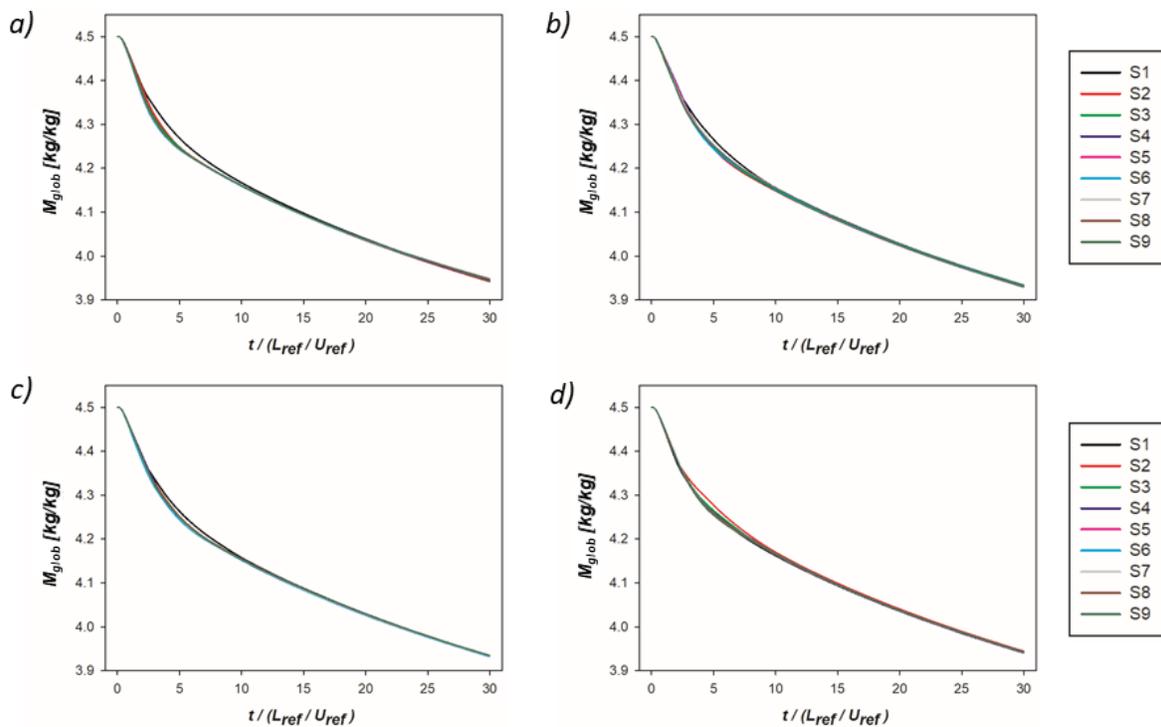


Figura 5.16 Temperatura adimensional global: a) Caso I, b) Caso II, c) Caso III y d) Caso III.

Esto indica que la remoción de humedad es similar para todos los casos debido a que se encuentra en la etapa de secado contante. Sin embargo, los contornos mostrados en la figura 5.14 sugieren que el caso **I** y **IV** presentaran mayor contenido de humedad en los alimentos que los casos **II** y **III** para un tiempo mayor de secado.

5.2 Caso B

En el caso anterior se observó que el comportamiento de temperatura y humedad es similar en sólidos que se encuentran lejos de la entrada. Lo anterior indica que las primeras muestras presentan altas temperaturas en su superficie, afectando la transferencia de calor y humedad homogénea dentro del alimento. En consecuencia, se considera a un sólido que no se ve afectado por la entrada del flujo, donde no se manifiestan zonas de alta temperatura superficiales que perjudiquen la deshidratación del alimento. Esto hace referencia a un sólido que se puede encontrar detrás del quinto sólido (para el caso **III**), pero que interactúa con sólidos que lo rodean en las tres direcciones. Lo anterior alude a simulaciones donde el dominio tiene condiciones de frontera periódicas, indicando que el dominio comparte información con dominios similares en las tres direcciones, ver figura 4.5. Para ello se considera el alimento con las mismas especificaciones de la sección anterior (temperatura y contenido de humedad inicial), además de establecer la separación entre sólidos para las tres direcciones referidas al caso **III**, debido a que este caso presentó contornos de temperatura óptimos para la deshidratación.

No se considera la mínima separación entre alimentos, debido a que el ángulo de entrada del flujo no tiene trascendencia en las pequeñas zonas de separación. Además, en el caso **II** se observó que la separación entre alimentos definida permite recirculaciones en esta zona, favoreciendo la transferencia de calor en el sólido. Sin embargo, la temperatura global de los sólidos en los últimos instantes de tiempo presenta comportamientos diferentes entre ellos, lo cual afecta negativamente al contenido de humedad en tiempos subsecuentes.

5.2.1 Velocidad

En la figura 5.17 se muestran los contornos de velocidad promedio para diferentes perfiles de entrada. Cuando el perfil de entrada adquiere el ángulo de θ_1 , el comportamiento de la componente U presenta contornos negativos tanto al frente como en la parte trasera del sólido. Los valores negativos ubicados en la zona frontal son causados por el sólido que se encuentra enfrente, mientras que los valores negativos de velocidad de la parte trasera son atribuidos del sólido que se estudia (figura 5.17b). Así mismo, los valores negativos de velocidad indican recirculaciones en las zonas mencionadas, para la zona trasera los vórtices no son simétricos debido a que uno de ellos es cercano a la esquina superior y presenta menor área, lo cual es contrario al vórtice inferior (puntos B y C de figura 5.17a). Además, en la esquina frontal superior se presenta una pequeña región de velocidad negativa, la cual describe el desprendimiento de capa límite generando recirculaciones (punto A de figura 5.17a). En la parte inferior del sólido se presenta mayor velocidad U , describiendo flujo uniforme por las líneas de trayectoria. Por otro lado, la componente de velocidad V presenta mayores valores en las esquinas de la cara frontal, siendo la esquina superior la más sobresaliente. Esto se debe a que la velocidad transversal incrementa por la zona de recirculación, mientras que en la esquina frontal inferior el flujo converge por la inclinación, siendo la velocidad V de menor magnitud y con dirección contraria.

Al aumentar la inclinación a θ_2 , los vórtices ubicados al frente del sólido reducen su magnitud por bajos valores negativos de velocidad U (figura 5.17 incisos d y e). En la cara superior se observan contornos negativos como consecuencia del desprendimiento de capa límite en la esquina frontal, los cuales muestran una mayor región (punto A de figura 5.17d). También en la región trasera se

presentan contornos negativos, mostrando vórtices asimétricos como consecuencia del desprendimiento de capa límite en las esquinas traseras, debido a que el flujo converge en la cara superior e inferior (punto B y C figura 5.17d). La componente de velocidad transversal aumenta su magnitud en la cara frontal cerca de la esquina superior, debido a que la zona de recirculación presenta una menor región, permitiendo que el flujo sea paralelo a la cara frontal.

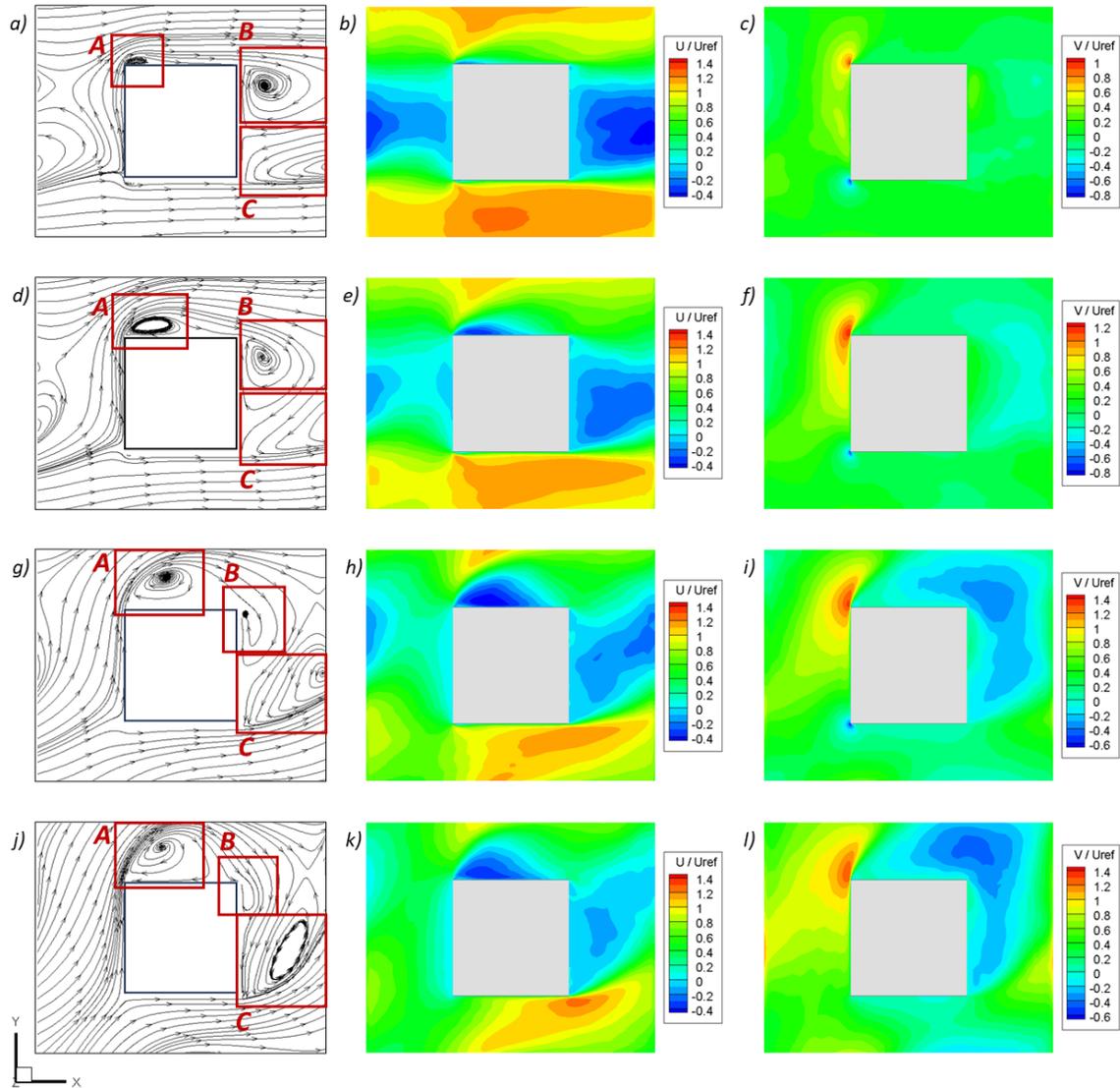


Figura 5.17 Líneas de trayectoria y contornos de velocidad promedio en $t/(L_{ref} / U_{ref})=30$ para $\theta_1=10^\circ$ (a-c), $\theta_2 = 20^\circ$ (d-e), $\theta_3 = 30^\circ$ (g-i) y $\theta_4 = 45^\circ$ (j-l).

La simulación relativa a la inclinación de θ_3 (figura 5.17 g-i), muestra contornos de velocidad negativa U de mayor área en la cara superior, propios del desprendimiento de capa límite (punto A figura 5.17g). Se puede observar que el centro del vórtice se encuentra más alejado de la cara superior y que abarca mayor área comparada con las inclinaciones anteriores. Esto es debido a que parte del flujo es paralelo a la cara frontal, lo cual concuerda con las líneas de trayectoria y con los contornos considerables de velocidad V cerca de la esquina frontal. En la región trasera se presentan dos vórtices asimétricos (punto B y C figura 5.17g). El que se encuentra cercano a la esquina superior

es de menor tamaño, debido a que el vórtice generado en la esquina delantera es de mayor área, abarcando la cara superior con mayor velocidad transversal. El otro vórtice se ubica más lejos de la cara trasera y es más alargado, lo cual se caracteriza con mayores contornos negativos de velocidad longitudinal y las líneas de trayectoria.

Cuando el flujo de entrada presenta la inclinación de θ_4 , se puede notar que los contornos positivos de velocidad V en la cara superior y U cercanos a la esquina inferior trasera son de mayor magnitud, debido a que se presenta un punto de estancamiento en la esquina frontal inferior, provocando que el flujo sea paralelo a estas caras. En los extremos de estas caras, se generan vórtices sobre la cara frontal y en la región trasera del sólido (puntos A y C figura 5.17j). Los cuales concuerdan con los valores negativos de U y V en la región superior y trasera del cuerpo, respectivamente. Se puede notar que la zona de recirculación no es simétrica, porque el vórtice en la región superior del cuerpo es de menor tamaño en comparación con el otro vórtice que presenta una forma alargada. Lo anterior es debido a que la separación en la dirección transversal (Q) es menor que la longitudinal (W), indicando que el cuerpo colindante con la cara superior es más próximo que el que se encuentra en la región trasera. Esto provoca que la zona de separación vertical no permita al vórtice tener una región alargada, limitando su forma. El vórtice mostrado en el punto B no es tan significativo como en inclinaciones anteriores, debido a que el vórtice referido al punto A abarca mayor superficie.

Se analiza la energía cinética turbulenta (figura 5.18) con base en la ecuación 5.6. Al presentar ángulos de inclinación de θ_1 y θ_2 , los valores más sobresalientes de intensidad turbulenta se encuentran cerca de la esquina frontal superior, ver figura 5.18 inciso a y b. Lo cual se relaciona con las recirculaciones provocadas por el desprendimiento de capa límite. En regiones cercanas a la cara inferior se presentan bajos niveles de turbulencia, debido a que en esta zona se presenta flujo uniforme, ver figura 5.17 incisos a y d. También en zonas cercanas a la cara trasera se encuentra baja intensidad turbulenta, debido a la presencia de bajas velocidades tanto de las componentes U y V por la interacción de geometría con el flujo.

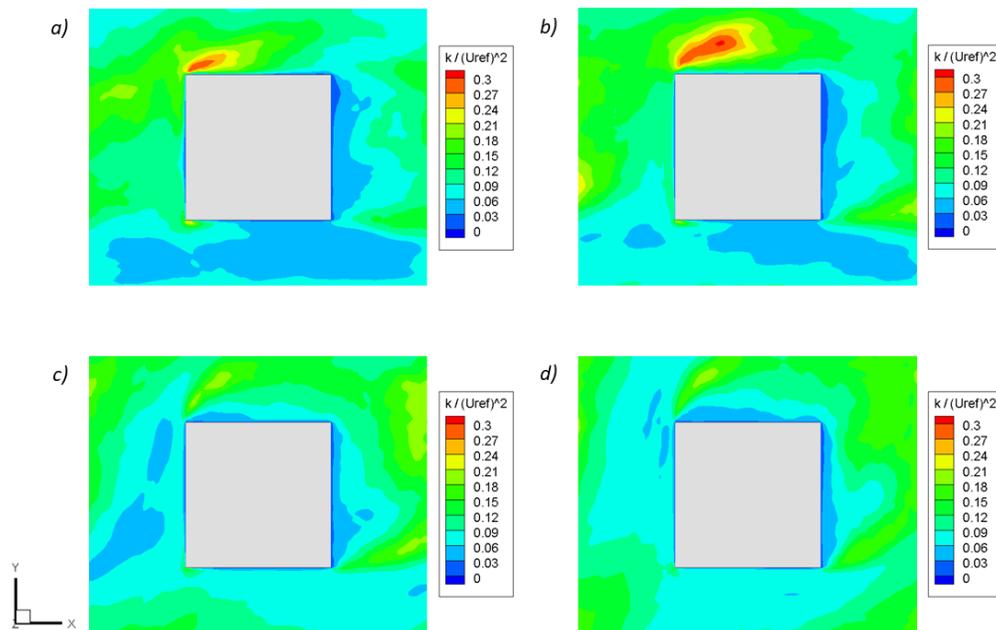


Figura 5.18 Intensidad turbulenta para diferentes ángulos de entrada. 10°: a), 20°: b), 30°: c) y 45°: d).

Cuando las inclinaciones son mayores a θ_2 (figura 5.18 inciso c y d), la turbulencia observada en la esquina frontal disminuye, pero tiene valores considerables en zonas alejadas a la cara superior y trasera del sólido, lo cual se relaciona con las recirculaciones ubicadas por contornos de velocidad negativa de las componentes U y V . No obstante, en zonas cercanas a estas caras la turbulencia es baja por tener menor interacción con el flujo. Por otro lado, en regiones cercanas a la cara frontal e inferior se observa que la turbulencia es menor, debido a que el flujo es paralelo a estas caras, mostrando características de flujo uniforme.

5.2.2 Temperatura

Dado que el perfil de entrada depende del ángulo de inclinación respecto al plano xy , es de interés analizar la transferencia de calor sobre la superficie del alimento T_{surf} , por tal motivo se utiliza la ecuación 5.8. Además, se considera la fluctuación de la temperatura superficial T_{unif} , la cual es definida por la ecuación 5.9. Esta temperatura define la fluctuación de la temperatura local con la de su superficie, la cual debe tender a cero cuando el tiempo es demasiado grande. Lo anterior indica que se ha alcanzado la temperatura uniforme. En la figura 5.19 y 5.20 se muestra la temperatura y las fluctuaciones de temperatura superficial, respectivamente.

En la figura 5.19 se puede observar de forma general que, en los primeros instantes, la temperatura de todas las caras aumenta de manera similar hasta alcanzar la temperatura adimensional de 1.15. A partir de este valor, el comportamiento de la temperatura superficial es diferente en las caras C1, C2, C3 y C4. Por otro lado, las caras C5 y C6 aumentan su temperatura de forma similar sin importar la inclinación del flujo, presentando mayor incremento de temperatura en el inicio. Esto apunta a que la transferencia de calor por convección en estas caras es similar.

Cuando se presenta la mínima inclinación (θ_1), la cara C1 aumenta su temperatura rápidamente hasta alcanzar la temperatura cercana a 1.2, mientras que la cara opuesta C2 requiere de mayor tiempo para igualar la temperatura de C1. Lo anterior se relaciona con la zona de recirculación cercana a la cara C1, presentando mayor turbulencia sobre esta cara, favoreciendo la transferencia de calor por convección. Sin embargo, cerca de la cara C2 la turbulencia es menor perjudicando la transferencia de calor. Aunque se genera una zona de recirculación sobre la cara C4 y por consiguiente la intensidad turbulenta incrementa, no es suficiente para que esta cara aumente la temperatura rápidamente, debido a que el vórtice abarca una región pequeña. Además, cerca de cara C3 la intensidad turbulenta es baja. Por este motivo, las caras C3 y C4 requieren de mayor tiempo para incrementar la temperatura superficial en el inicio.

En relación con lo mencionado anteriormente, el rápido aumento de temperatura superficial para mantenerse constante en un intervalo muy corto de tiempo de la cara C1, se refleja con un pico de bajas fluctuaciones en un tiempo reducido, mostradas en la figura 5.20 en θ_1 . En el caso contrario, al requerir más tiempo para incrementar la temperatura superficial de C2, las fluctuaciones son elevadas en un tiempo mayor, porque la temperatura es menos uniforme en ese instante de tiempo. No obstante, al transcurrir el tiempo, las fluctuaciones de temperatura disminuyen hasta alcanzar bajos valores, semejantes a los de la cara C1. Se puede considerar que el instante en que ambas caras presentan bajas fluctuaciones de temperatura similares es en $t = 10$, lo cual apunta que a partir de este tiempo la temperatura es homogénea y similar para C1 y C2. Por otro lado, las fluctuaciones de las caras C3 y C4 son similares, mostrando altos valores en los primeros instantes, para luego reducir considerablemente en $t = 10$. Esto indica que la temperatura superficial requiere mayor tiempo para ser homogénea.

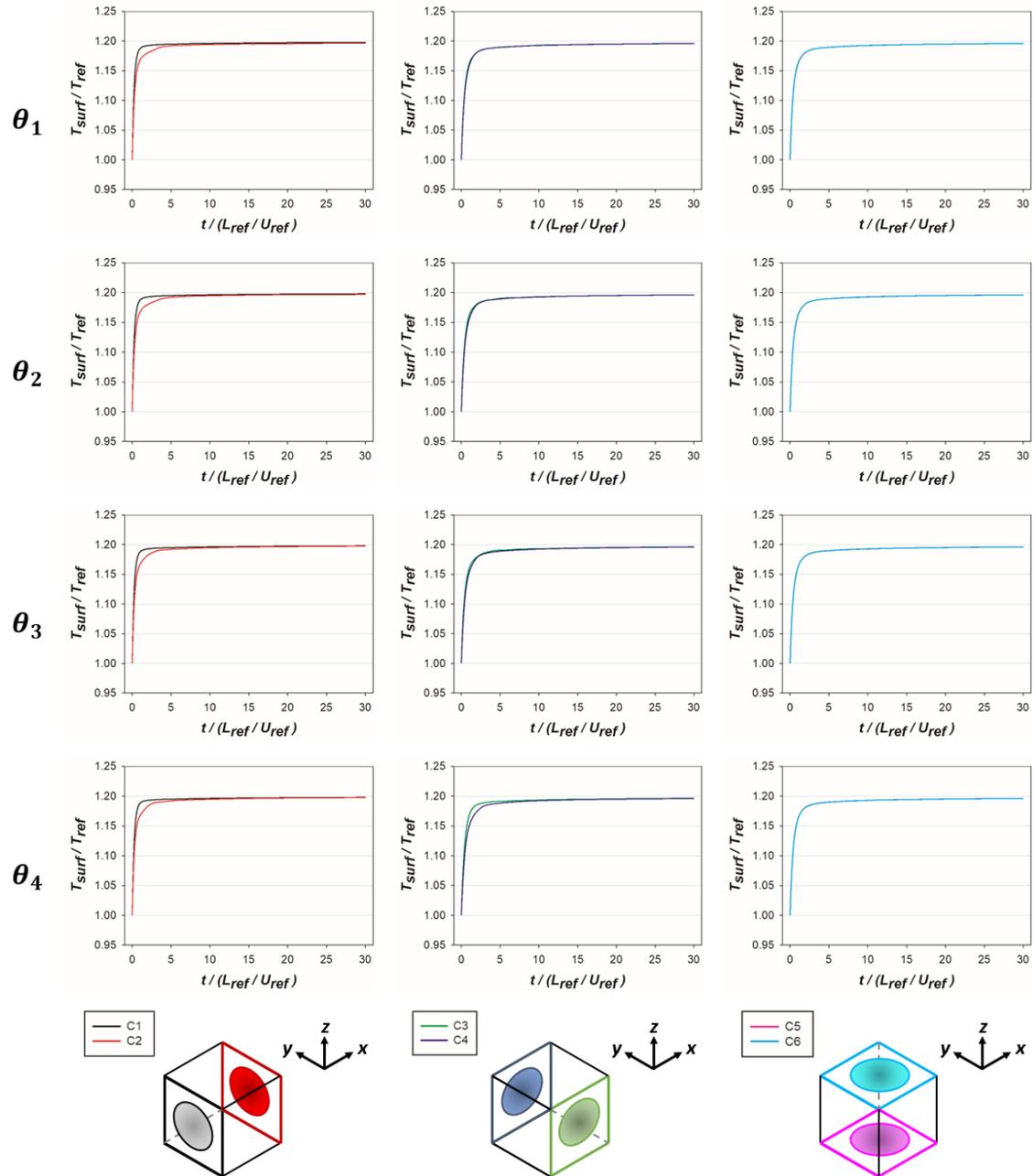


Figura 5.19 Temperatura superficial para $\theta_1=10^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$ y $\theta_4 = 45^\circ$.

Al considerar la inclinación de θ_2 y θ_3 , la cara C1 incrementa su temperatura más rápido que la cara C2, como en el caso anterior (figura 5.19). La inclinación del flujo con θ_2 y θ_3 provoca que las componentes de velocidad U y V incrementen en la cara C3 y C1, respectivamente. Esto indica que, en la separación frontal, la zona de recirculación disminuye, debido a que el flujo interactúa en esta zona para abarcar la cara frontal (C1) e inferior (C3), ver figura 5.17. Aunque la turbulencia es menor por ser el flujo paralelo a estas caras, no perjudica la transferencia de calor. Esto se debe a que son las primeras caras en interactuar con el flujo y con ello incrementando más rápido la temperatura superficial. Por ello las fluctuaciones máximas de la cara C1 son menores que la de C2, además de reducir valores en un corto tiempo. Para las caras C3 y C4, se observa que el incremento de

temperatura es similar, no obstante, las fluctuaciones de temperatura de C3 muestran lo contrario. En ambas caras la fluctuación de temperatura incrementa significativamente en un tiempo muy corto, pero después la cara C3 baja a valores significativamente bajos en intervalo de tiempo muy reducido respecto a la cara C4. Esto refiere a que la temperatura superficial de C3 tiende a ser uniforme en un lapso menor que la cara C4 y es más notable en θ_3 , cuando las fluctuaciones de temperatura de C4 requieren de mayor tiempo para disminuir las fluctuaciones de temperatura.

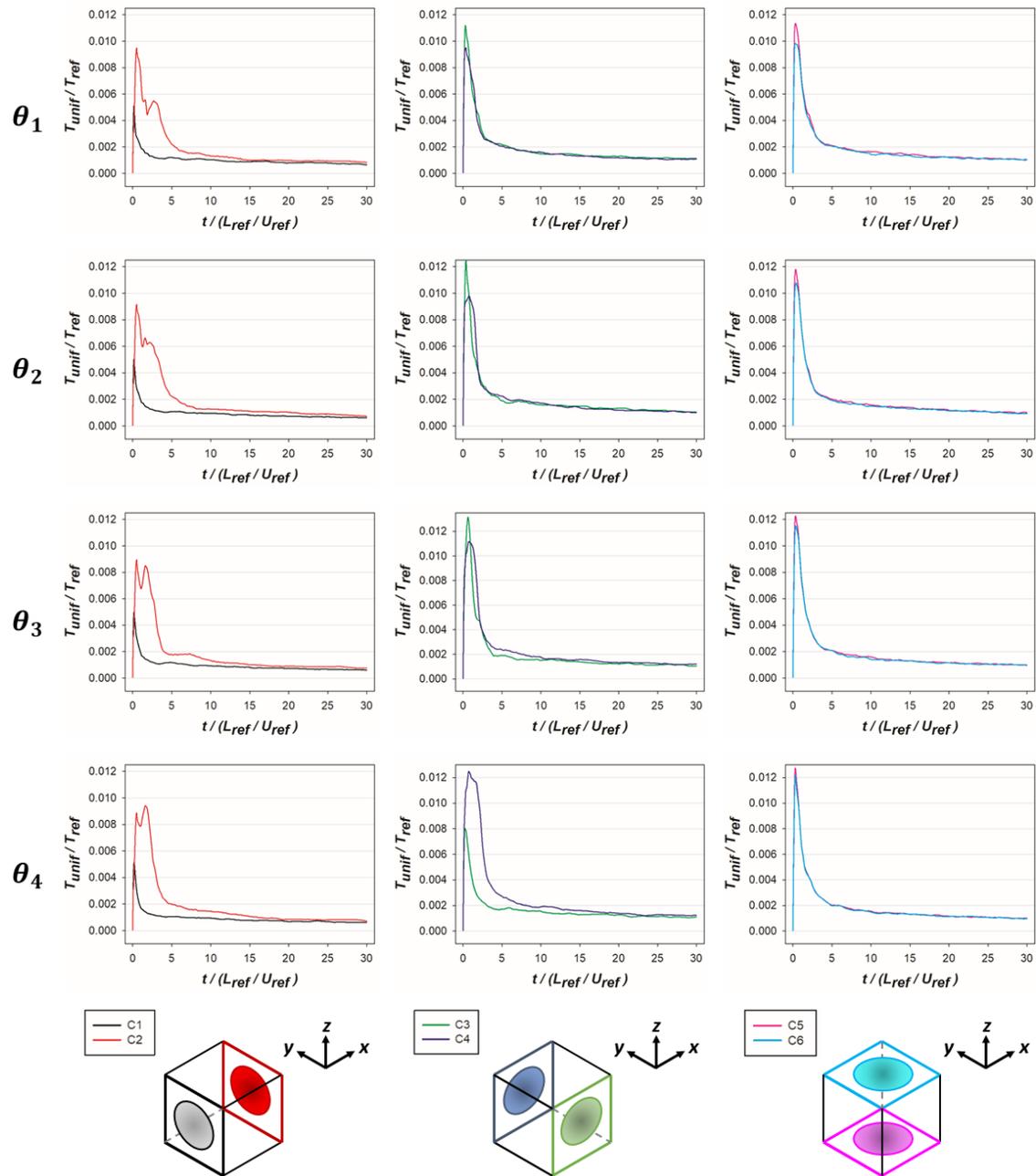


Figura 5.20 Temperatura uniforme de la superficie para $\theta_1=10^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$ y $\theta_4 = 45^\circ$.

Al presentar la inclinación de θ_4 , las caras C1 y C3 incrementan su temperatura más rápidamente que sus respectivas caras opuestas (C2 y C4). Como el flujo tiene mayor interacción con las C1 y C3, la transferencia de calor aumenta, porque el flujo no queda estancado en estas caras, presentando flujo uniforme. Por ello la baja turbulencia no afecta negativamente a la transferencia de calor. En consecuencia, las fluctuaciones máximas de temperatura de C1 y C3 son menores en comparación que sus caras contrarias y reducen a valores bajos en un tiempo muy corto. Por otro lado, las caras C2 y C4 requieren mayor tiempo para alcanzar temperaturas similares a C1 y C3. Aunque se presentan zonas de recirculación sobre C2 y C4 por el ángulo de incidencia del flujo, los centros de los vórtices se encuentran ligeramente alejados de las superficies mencionadas. Es claro que las recirculaciones muestran valores de turbulencia considerables, pero cerca de las caras se presentan bajos niveles de turbulencia, lo cual perjudica a la transferencia de calor en el inicio.

Para las cuatro inclinaciones en el tiempo final, se considera que la temperatura superficial del cuerpo es homogénea, debido a que las fluctuaciones de temperatura son muy bajas. Esto indica que los contornos internos de temperatura son similares entre cada inclinación. Al presentar temperatura uniforme en las seis caras, la conducción de calor dentro del sólido no es diferente entre los casos planteados, pues los cambios significativos de temperatura interna son en el inicio, en un tiempo corto. Entonces, se analiza la temperatura global del sólido T_{glob} empleando la ecuación 5.7. En la figura 5.21 se puede notar que la temperatura global es la misma para las cuatro inclinaciones, sin embargo, para el último instante de tiempo la temperatura global tiende a ser mayor cuando se presenta el ángulo de θ_4 . Esto es a causa de mayores zonas de recirculación ubicadas sobre la cara superior y trasera del sólido, favoreciendo la transferencia de calor por convección. En contraste con las inclinaciones θ_1 y θ_2 , las cuales presentan menores temperaturas porque la mayor área de recirculación se encuentra detrás del sólido, ver figura 5.17.

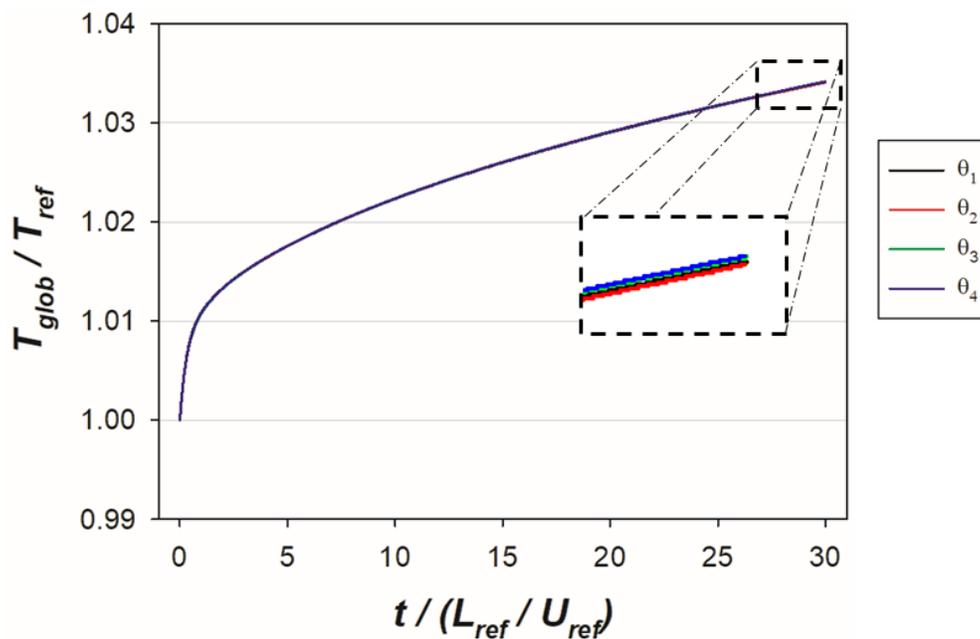


Figura 5.21 Temperatura global para $\theta_1=10^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$ y $\theta_4 = 45^\circ$.

5.2.3 Humedad

En la sección anterior se observó que la temperatura superficial del sólido eleva su temperatura rápidamente en el inicio hasta mantener una temperatura cercana a la del aire, relacionándose con el comportamiento de humedad interna. En la figura 5.22 se puede observar que al inicio la remoción de humedad interna es muy pequeña, por lo que tiende a ser constante. Esto es debido a que la temperatura superficial no ha alcanzado la temperatura máxima, por lo que el calor suministrado a la superficie es bajo para remover humedad.

Después la humedad que se ubica en la superficie del cuerpo es la primera en evaporarse, debido a que la temperatura superficial es mayor. Entonces comienza el proceso de difusión de humedad dentro del cuerpo, por los gradientes de humedad y temperatura interna. Al evaporarse la humedad superficial, esta es remplazada por humedad interna que proviene de regiones cercanas a la superficie. Por este motivo la velocidad de remoción de humedad superficial condiciona esta etapa, la cual es constante provocando que el contenido de humedad también decremente de la misma manera como se observa la figura 5.22. Esto provoca que en el interior, el contenido de humedad decremente en zonas cercanas a la superficie y conforme el tiempo de secado aumenta, estas zonas abarcan mayor área interna del alimento con bajo contenido de humedad. Sin embargo, el centro del sólido presenta zonas de mayor contenido de humedad siendo esta zona la más difícil de remover, debido a que se ubica la humedad en forma ligada. Por lo que, a tiempos mayores de secado, la difusión de humedad interna rige la remoción de humedad, debido a que es un proceso muy lento por requerir mayor tiempo para suministrar humedad a la superficie. Esto debe generar un cambio de pendiente en la velocidad de disminución de contenido de humedad, lo cual requiere de mayor tiempo las simulaciones para observar este fenómeno.

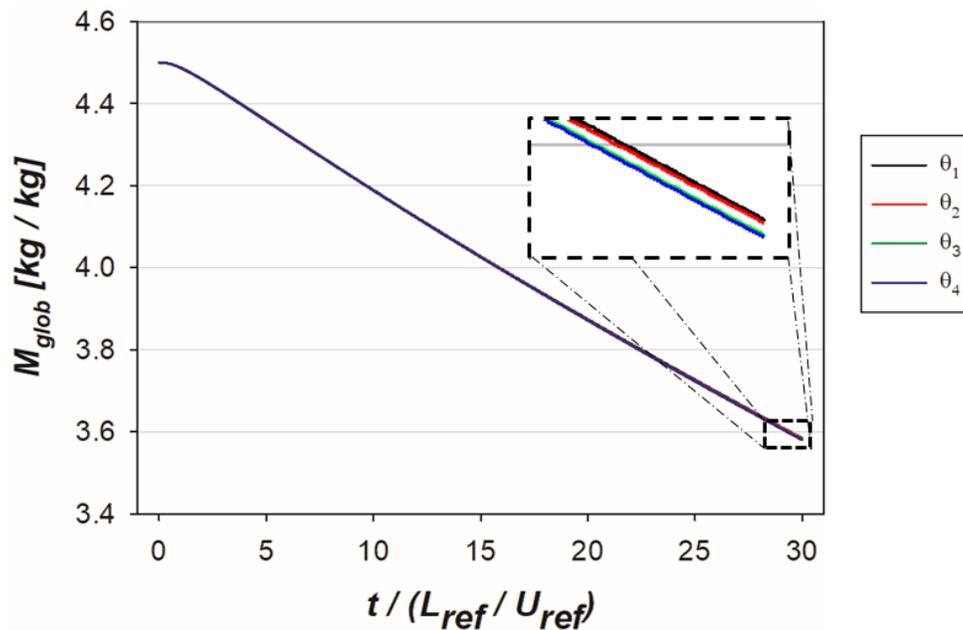


Figura 5.22 Humedad global para $\theta_1=10^\circ$, $\theta_2 = 20^\circ$, $\theta_3 = 30^\circ$ y $\theta_4 = 45^\circ$.

La temperatura superficial del sólido presenta cambios considerables en los primeros instantes de tiempo, los cuales repercuten en el contenido de humedad del alimento. La cara C1 es la que aumenta rápidamente en comparación con las demás caras para los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 . Sin embargo, las caras C1 y C3 son las primeras en aumentar su temperatura cuando el flujo tiene la inclinación de θ_4 . Lo cual indica que la remoción de humedad superficial sobre estas caras es mayor. Este fenómeno ocurre en el inicio del proceso y el tiempo en que la temperatura superficial de todas las caras tiende a ser uniforme (figura 5.19) es diferente para cada inclinación, lo cual se refleja por menores fluctuaciones de temperatura (figura 5.20). No obstante, los intervalos de tiempo son cortos, por lo que no influye en el decremento del contenido de humedad, pues esta disminuye de manera similar para las cuatro inclinaciones propuestas (figura 5.22).

Para tiempos subsecuentes, la temperatura superficial tiene un comportamiento homogéneo, debido a que las fluctuaciones de temperatura son pequeñas. Esto indica que el suministro de calor para la evaporización de la humedad es la misma en todas sus caras, lo cual se refleja con la disminución de humedad dentro del alimento, mostrando el mismo comportamiento a lo largo del tiempo. Sin embargo, en el tiempo final, el contenido de humedad que muestra la inclinación θ_4 tiende a ser menor en comparación con las inclinaciones θ_1 , θ_2 y θ_3 .

El bajo contenido de humedad de θ_4 se relaciona con la temperatura global del sólido, la cual es mayor. Lo que señala que la transferencia de calor por conducción es mayor. Lo anterior se relaciona con las zonas de recirculación sobre las caras C2 y C4, abarcando una región extensa por las magnitudes negativas de U y V (figura 5.17 inciso k y l). Además, la interacción del flujo con las caras C1 y C3 provocan que el flujo sea paralelo a ellas, facilitando la remoción de humedad aguas abajo, debido a que el flujo no se estanca.

Por otro lado, las inclinaciones θ_1 , θ_2 y θ_3 muestran que la velocidad de U y V son menores en C3 y C1 respecto a θ_4 , lo cual disminuye la remoción de humedad evaporada. Además, el vórtice que se genera sobre la cara C4 es sobresaliente hasta que la inclinación del flujo es de θ_4 , presentando mayor turbulencia que favorece el decremento de humedad. Así mismo los vórtices que se generan en la parte trasera del cuerpo (C2) no son simétricos, pues uno de ellos es cercano al cuerpo con menor tamaño y el otro está separado con forma alargada. Al aumentar la inclinación el vórtice cercano al cuerpo disminuye de tamaño hasta no tener presencia en θ_4 , mientras que el otro vórtice es más grande y cercano al sólido (figura 5.17 punto B y C). Si bien estos dos vórtices favorecen la transferencia de humedad de la superficie al flujo, la inclinación θ_4 muestra que la turbulencia sobre la cara trasera (C2) es similar a las inclinaciones θ_1 , θ_2 y θ_3 . Por lo que esta región no afecta en mayor medida a la turbulencia al incrementar la inclinación, mostrando que la turbulencia sobre la cara C4 es la influyente. Entonces, con base a lo anterior se considera que la inclinación θ_4 favorece la remoción de humedad.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo se realizaron simulaciones numéricas de la deshidratación convectiva para analizar la transferencia de calor y masa en los alimentos. Las simulaciones se clasifican en los casos: A y B. En el caso A se definió un tren de sólidos, el cual se encuentra en la entrada de la cámara de secado. En esta sección se simularon cuatro arreglos de tren con diferentes longitudes de separación entre alimentos (N_1 , N_2 , N_3 y N_4). Por otro parte, el caso B describe al dominio dentro de la cámara de secado y lejos de la entrada de esta misma, donde el flujo se encuentra desarrollado. Se realizaron simulaciones en base a la inclinación del perfil de entrada (θ_1 , θ_2 , θ_3 y θ_4).

En el caso A se puede asumir que los primeros sólidos son los que presentan mayores gradientes de temperatura superficial, siendo la cara frontal del primer sólido la más importante. Esto afecta al proceso de deshidratación, pues temperaturas altas propiciarían al quemado del alimento, lo cual se caracteriza por el cambio de color y textura. Además, esto no beneficia la remoción de humedad porque puede crear una barrera superficial que no permita el flujo de humedad del centro hacia el exterior del sólido. Entonces es importante que el sólido adquiera alta temperatura superficial, pero de forma homogénea, para así aumentar la temperatura global del alimento y en consecuencia incrementar la remoción de humedad. En los casos *I*, *II* y *III* la temperatura superficial de los sólidos es similar a partir del quinto sólido, donde se considera que los contornos de temperatura son uniformes por no presentar regiones de temperaturas altas como los primeros sólidos. Los bordes y esquinas son zonas que siempre van a presentar pequeñas regiones de alta temperatura, los cuales no pueden minimizarse por su geometría, es por ello que se omiten. La consideración de temperatura uniforme se relaciona con el flujo alrededor de los cuerpos, pues la zona de recirculación que se genera en cada separación es similar desde el quinto cuerpo, para cada caso.

Por otro lado, la separación entre alimentos es un factor importante para el proceso de secado. El caso *I* presenta contornos de velocidad cercanos al valor nulo en las regiones de separación, indicando que las recirculaciones son de menor magnitud, pues no favorecen la transferencia de calor en las caras cercanas a esta región. Así mismo, la remoción de humedad superficial es afectada en estas zonas de separación, presentando mayores valores de humedad en la cara frontal y trasera que las caras laterales. Al aumentar la separación de alimentos, se presentan valores negativos de velocidad considerables, los cuales indican mayores regiones de recirculación incrementando la transferencia de calor y la remoción de humedad superficial (caso *II* y *III*). El hecho de presentar menores valores de humedad en la superficie del alimento provoca que la difusión de humedad dentro del sólido sea más rápida, lo cual es importante porque el proceso de difusión de masa es lento en comparación con la difusión de calor. Entonces la longitud de separación entre alimentos establecida en el caso *III* favorece la transferencia de calor y la remoción de humedad en comparación con los casos *I* y *II*. Sin embargo, presentar mayores longitudes de separación entre alimentos es contraproducente para el proceso de secado como se presenta en el caso *IV*. Aunque este caso cuenta con dos hileras, las cuales no se ven afectadas entre sí porque presentan contornos

de velocidad similares al caso II y III, el flujo converge cerca de las caras frontales de los sólidos (S3-S9) mostrando altas temperaturas en esta superficie y bajas temperaturas en la cara trasera. Este mismo comportamiento se presenta en todos los sólidos, lo cual indica la nula interacción entre sólidos, tanto en la dirección longitudinal como la vertical. En consecuencia, la humedad en la superficie es mayor en la cara trasera de cada sólido perjudicando la remoción. Con base en lo anterior, el arreglo III favorece la uniformidad de la transferencia de calor y masa en la superficie de los sólidos, a excepción de los primeros sólidos ubicados cerca de la entrada.

Entonces en el caso B se consideró la distancia de separación (longitudinal y vertical) entre alimentos propuesta para el caso III. Las simulaciones relativas a este caso mostraron que el ángulo del flujo de entrada influye en la deshidratación del alimento. La temperatura superficial del sólido presenta cambios considerables en los primeros instantes de tiempo, donde la cara C1 es la que aumenta rápidamente en comparación con las demás caras para los ángulos θ_1 , θ_2 y θ_3 . Sin embargo, las caras C1 y C3 son las primeras en aumentar su temperatura cuando el flujo tiene la inclinación de θ_4 . El tiempo en que la temperatura superficial de todas las caras tiende a ser uniforme es diferente para cada inclinación, lo cual se refleja por menores fluctuaciones de temperatura. Esto indica que en el inicio la temperatura superficial no es homogénea, provocando zonas de mayor humedad en superficies de baja temperatura y zonas de menor humedad para el caso contrario.

En el tiempo final, la temperatura superficial (C1, C2, C3, C4, C5 y C6) es homogénea para las cuatro inclinaciones, no obstante, la temperatura global y el contenido de humedad del cuerpo son diferentes. Al presentar el flujo la inclinación de θ_4 , el contenido de humedad del sólido es menor y la temperatura global es mayor, debido a las zonas de recirculación que se presentan. Esto indica que el ángulo de entrada del flujo o la inclinación del sólido beneficia a la transferencia de calor por conducción y transferencia de masa del cuerpo. Aunque la transferencia de calor no es homogénea para los primeros instantes de tiempo, si lo es para tiempos mayores donde se encuentra la etapa de secado constante y la etapa de decremento, las cuales son de mayor interés.

Con base en los resultados, se propone la mayor separación entre alimentos (N_3) la cual presenta transferencia de calor y de masa uniforme. Los primeros sólidos del tren presentan contornos de temperatura no deseables para el proceso, lo cual no puede evitarse debido a que es la región de entrada, donde tiene interacción el flujo con los alimentos. Aumentar la separación a la propuesta no favorece la transferencia de calor, además de que reduce el número de muestras de alimento dentro de la cámara de secado, implicando menor producción a nivel industrial. Inclinarse el flujo de entrada también favorece el proceso de deshidratación, lo cual es similar a inclinar la muestra de alimento y que el perfil del flujo no tenga inclinación. El ángulo sugerido es de 45° , trascendiendo en la remoción de humedad, lo cual es importante para la etapa de decremento de secado donde la humedad es más difícil de extraer requiriendo mayor tiempo de secado.

Bibliografía

- [1] Peinado Martínez, J. L., Vidal Herrera, R., Grado Díaz, J. A., & Gándara Fernández, J. A. "Deshidratación de alimentos utilizando energía solar térmica". *Cultura Científica Y Tecnológica*, vol. 50, no. 2, pp. 99-107, 2013.
- [2] Fito Maupoey, P., Andrés Grau, A. M., Barat Baviera, J. M. & Albors Sorolla, A. M. "Introducción al secado de alimentos por aire caliente". España, Universidad Politécnica de Valencia, 1.a edición, 2016.
- [3] De Michelis, A. & Ohaco, E. "Deshidratación y desecado de frutas, hortalizas y hongos. Procedimientos hogareños y comerciales de pequeña escala". Argentina, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria, 1.a edición, 2015.
- [4] Mujumdar, A. S. "Handbook of industrial drying". Estados Unidos de América, CRC press, 3.a edición, 2006.
- [5] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. "Fundamentals of heat and mass transfer". Estados Unidos de América, Wiley, 6.a edición, 2011.
- [6] Poinso, T. J. A., & Lele, S. K. "Boundary conditions for direct simulations of compressible viscous flows". *Journal of computational physics*, vol. 101, no. 1, pp. 104-129, 1992.
- [7] Cengel, Y. A. "Transferencia de calor y masa". México, McGraw-Hill Interamericana., 3.a edición, 2007.
- [8] Ochoa Reyes, E., Ornelas Paz, J. de J., Ruiz Cruz, S., Ibarra Junquera, V., Pérez Martínez, J. D., Guevara Arauza, J. C. & Aguilar, C. N. "Tecnologías de deshidratación para la preservación de tomate (*Lycopersicon esculentum* Mill.)". *Biotecnia*, vol. 15, no. (2), pp. 39-46, 2013.
- [9] Ballesteros Tajadura, R. "Turbulencia". España, Universidad de Oviedo, 2005.
- [10] Noh Pat, F. "Estudio de diferentes modelos de turbulencia IC-E para aplicación en problemas de transferencias de calor", Tesis de Maestría. México, Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico, 2004.
- [11] Ateeque, M., Mishra, R. K., Chandramohan, V. P., & Talukdar, P. "Numerical modeling of convective drying of food with spatially dependent transfer coefficient in a turbulent flow field". *International Journal of Thermal Sciences*, vol. 78, pp. 145-157, 2014.
- [12] Chandramohan, V.P. "Experimental analysis and simultaneous heat and moisture transfer with coupled CFD model convective drying of moist object". *International Journal for Computational Methods in Engineering Science and Mechanics*, vol. 17, no. 1, pp. 59-71, 2016.
- [13] Salinas Vázquez, M., Vicente Rodríguez, W., Chol Orea, E., & Leyva García, V. "Simulación de la turbulencia de un flujo que pasa alrededor de un cilindro de sección cuadrada a partir de la utilización de la simulación de grandes escalas y de fronteras inmersas". *Revista mexicana de física*, vol. 53, no. 6, pp. 461-469, 2007.

- [14] Salinas-Vázquez, M., Vicente, W., González-Rodríguez, C., Barrios-Bonilla, E., & Espinosa-Gayosso, A. "Large Eddy Simulation of a jet flow with a suction/ejection system using immersed boundary conditions". *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, vol. 98, no. 10-11, pp. 618-627, 2010.
- [15] Khan, M. H., Sooraj, P., Sharma, A., & Agrawal, A. "Flow around a cube for Reynolds numbers between 500 and 55,000". *Experimental thermal and fluid science*, vol. 93, pp. 257-271, 2018.
- [16] Lyn, D. A., Einav, S., Rodi, W., & Park, J. H. "A laser-Doppler velocimetry study of ensemble-averaged characteristics of the turbulent near wake of a square cylinder". *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 304, pp. 285-319, 1995.
- [17] Aversa, M., Curcio, S., Calabro, V., & Iorio, G. „An analysis of the transport phenomena occurring during food drying process". *Journal of Food Engineering*, vol. 78, no. 3, pp. 922-932, 2007.
- [18] Chandramohan, V. P. "Numerical prediction and analysis of surface transfer coefficients on moist object during heat and mass transfer application". *Heat Transfer Engineering*, vol. 37, no. 1, pp. 53-63, 2016.
- [19] Curcio, S., Aversa, M., Calabrò, V., & Iorio, G. "Simulation of food drying: FEM analysis and experimental validation". *Journal of food engineering*, vol. 87, no. 4, pp. 541-553, 2008.
- [20] Islam, M. R., Ho, J. C., & Mujumdar, A. S. "Convective drying with time-varying heat input: simulation results". *Drying technology*, vol. 21, no. 7, pp. 1333-1356, 2003.
- [21] Berk, Z. "Food Process Engineering and Technology". Estados Unidos de América, Academic press, 1.a edición, 2009.
- [22] Badui Dergal, S. "Química de los alimentos". México, Pearson Educación, 4.a edición, 2006.
- [23] Toldrá, F. "Hanbook of Fermented Meat and Poultry". Reino Unido, John Wiley & Sons, 2.a edición, 2015.
- [24] Bhattacharya, S. "Conventional and advanced food processing technologies". Reyno Unido, John Wiley & Sons, 1.a edición, 2015.
- [25] Delgado, J. M. P. Q., & de Lima, A. B. "*Transport phenomena and drying of solids and particulate materials*". Suiza, Springer International Publishing, 1.a edición, 2014.
- [26] Onwude, D. I., Hashim, N., Abdan, K., Janius, R., & Chen, G. "Investigating the influence of novel drying methods on sweet potato (*Ipomoea batatas* L.): Kinetics, energy consumption, color, and microstructure". *Journal of Food Process Engineering*, vol. 41, no. 4, pp. 1-12, 2018.
- [27] Muñiz Becerá, S., Hernández Gómez, A., García Pereira, A., & Méndez Lagunas, L. "Empleo del método de secado convectivo combinado para la deshidratación de papaya (*Carica papaya* L.), variedad Maradol roja". *Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias*, vol. 22, pp. 31-37, 2013.
- [28] Kutz, M. "Handbook of farm, dairy and food machinery engineering". Reyno Unido, Academic Press, 3.a edición, 2019.

- [29] Metcalfe Coulson, J., Francis Richardson, J., Backhurst, J. R., Hadlett Harker, J. "Coulson & Richardson's Chemical Engineering". Reino Unido, Butterworth Heinemann, 5.a edición, 2002.
- [30] L.C. Lara-Guzman, M. Salinas-Vazquez, E. Martínez-Espinosa & W. Vicente. "Numerical study of the effect of potato cuboids separation in a convective drying". *Drying Technology*, pp. 1426-1443, 2022.
- [31] Cengel, Y. A. "Termodinámica". México, Mc Graw Hill, 7.a edición, 2012.
- [32] IFT, I. "Evaluation and Definition of Potentially Hazardous Foods". *Evaluation and Definition of Potentially Hazardous Foods*, vol. 2, no. 223, pp. 1-109, 2001.
- [33] Ibrahim, M. T., Zacharias, J., Briesen, H., & Först, P. "Heat transfer to a stationary cubic particle in a laminar tube flow: Computational fluid dynamics simulations and experiments". *Journal of Food Engineering*, vol. 274, p. 109833, 2020.
- [34]Defraeye, T., & Radu, A. "Convective drying of fruit: A deeper look at the air-material interface by conjugate modeling". *International Journal of Heat and Mass Transfer*, vol. 108, pp. 1610-1622, 2017.
- [35] Solomon, A. B., Fanta, S. W., Delele, M. A., & Vanierschot, M. "Modeling and simulation of heat and mass transfer in an Ethiopian fresh injera drying process". *Heliyon*, vol.7, no. 2, 2021.
- [36] Gottlieb, B. D. and Turkel, E. "Dissipative Two – Four Methods for Time-Dependent Problems, Mathematics of Computation", vol. 30, no. 136, pp.703-723, 1976.