



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN

**Diseño de un hidrofuidizador didáctico para el
preenfriamiento de productos hortofrutícolas**

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERA EN ALIMENTOS

P R E S E N T A:

CAROLINA FRÍAS RAMÍREZ

ASESORES

I.A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS

I.A. RICARDO MOISÉS GONZÁLEZ REZA

CUAUTITLÁN IZCALLI, ESTADO DE MÉXICO 2015



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

ASUNTO: VOTO APROBATORIO

M. en C. JORGE ALFREDO CUELLAR ORDAZ
DIRECTOR DE LA FES CUAUTITLAN
PRESENTE

ATN: M. EN A. ISMAEL HERNÁNDEZ MAURICIO
Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES Cuautitlán.

Con base en el Reglamento General de Exámenes, y la Dirección de la Facultad, nos permitimos a comunicar a usted que revisamos el: Trabajo de Tesis

Diseño de un hidrofuidizador didáctico para el preenfriamiento de productos hortofrutícolas

Que presenta la pasante: Carolina Frías Ramírez

Con número de cuenta: 410000858 para obtener el Título de: Ingeniera en Alimentos

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXAMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VOTO APROBATORIO.

ATENTAMENTE

“POR MI RAZA HABLARA EL ESPÍRITU”

Cuautitlán Izcalli, Méx. a 18 de Agosto de 2014.

PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO

	NOMBRE	FIRMA
PRESIDENTE	IBQ. José Jaime Flores Minutti	
VOCAL	IA. Alfredo Álvarez Cárdenas	
SECRETARIO	I.A. Laura Margarita Cortazar Figueroa	
1er. SUPLENTE	M. en C. Araceli Ulloa Saavedra	
2do. SUPLENTE	I.A. Arturo Munguía Sánchez	

NOTA: los sinodales supientes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 127).

Agradecimientos:

Primeramente quiero agradecer a mis compañeros de carrera, especialmente a los de mi Generación, por compartir esta hermosa experiencia conmigo.

A mis maestros, por compartir sus conocimientos e invertir su tiempo en mi formación, especialmente a la profesora Zaira Guadarrama y al profesor Francisco Javier, por sus valiosos consejos y enseñanzas.

Quiero agradecer a mis amigos de carrera, por compartir sus risas, los momentos de angustia, de tranquilidad, de preocupación y de felicidad que tuvimos a lo largo de la carrera, especialmente a Adilene y Margarita. Chicas, mil gracias por su ayuda.

También a mis asesores de tesis, el Ing Alfredo Álvarez y el Ing Ricardo González, por su tiempo y valiosos conocimientos que hicieron posible este proyecto.

Así como agradezco también a la doctora Luz Zambrano por todo su apoyo en los inicios de este trabajo.

Gracias a mis amigos de la preparatoria, quienes creyeron en mí, más de lo que yo creía en mi misma. Chicos, mil gracias por todo su apoyo incondicional y las historias.

Agradezco a mi mejor amiga Mari Vázquez, por ser un apoyo a lo largo de los años, por siempre estar ahí en todos los momentos buenos y malos a pesar de la distancia.

Gracias a mi familia, especialmente a mis hermanas; Laura, Elissa, Victoria y Elena, por ser siempre una fuente de inspiración, de motivación, de alegría y orgullo en mi vida. Y lo seguirán siendo siempre. Gracias por volver a mi camino.

Muchas gracias a mi hermosa Alma Mater, mi amada UNAM. Por brindarme la oportunidad de ser una ingeniería. Espero que siempre sea la mejor universidad del país, y una de las mejores del mundo. Ojala muchos otros jóvenes tengan la oportunidad que yo tuve. Mil gracias.

Y finalmente, doy gracias a la persona que me ha enseñado lo que es amar a alguien tanto como a uno mismo, el dejar de ser egoísta por el bien de otros, que me ha enseñado lo bello que puede ser este mundo. Que me enseñó a luchar y nunca rendirme a pesar de los obstáculos. La persona más fuerte del mundo, el mejor hombre. Gracias por estar aquí JK.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN	v
INTRODUCCIÓN	viii
CAPÍTULO 1: MARCO TEÓRICO	1
1.1 Hidrofluidización	1
1.1.1 Transferencia de calor	2
1.1.2 Flujo de fluidos	3
1.1.3 Chorros de choque	5
1.1.4 Aplicación	6
1.1.5 Productos hortofrutícolas preenfriados	6
1.1.6 Equipo	7
1.1.7 Análisis de diseños existentes	8
1.1.7.1 Ventajas y desventajas	13
1.1.7.2 Condiciones de operación, resultados obtenidos y análisis	14
1.2 Escalamiento	18
1.2.1 Escala piloto y semi piloto	20
1.2.2 Análisis dimensional	21
1.2.3 Números adimensionales que influyen en la transferencia de calor	24
1.2.4 Principio de similitud	26
1.2.4.1 Criterios de escalamiento	26
1.2.4.1.1 Criterio de similitud geométrica.	27
1.2.4.1.2 Criterio de similitud cinemática y dinámica	27
1.2.4.1.3 Criterio de similitud térmica	28
1.2.5 Regímenes de control	29
1.2.6 Métodos de escalamiento	30
1.2.6.1 Ecuaciones de escala	30
1.2.6.2 Método de extrapolación	30
1.3 Diseño de Equipo	32
1.3.1 Teoría y modelos de diseño	33
1.3.2 Metodología del diseño	33
1.4 Selección de componentes para el hidrofluidizador	38
1.4.1 Tanques	40

1.4.2	Selección de diámetro y longitud de tubería	41
1.4.3	Selección de válvulas	42
1.4.4.	Bomba	44
1.4.5	Información necesaria para la selección de la bomba	46
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN APLICADA AL DISEÑO		48
2.1	Problema	48
2.2	Objetivos	49
2.3	Selección del producto a trabajar	49
2.4	Parámetros que se quieren estudiar en el equipo	50
2.5	Caracterización geométrica del equipo hidrofuidizador a nivel semi piloto.	50
2.6	Escalamiento geométrico del hidrofuidizador	50
2.7	Escalamiento cinemático y dinámico del hidrofuidizador	55
2.8	Cálculo de número de Nusselt, coeficiente convectivo y coeficiente de enfriamiento	56
CAPÍTULO III: RESULTADOS Y ANÁLISIS		57
3.1	Caracterización geométrica del equipo hidrofuidizador a nivel semi piloto.	57
3.2	Escalamiento geométrico del hidrofuidizador	58
3.3	Escalamiento cinemático y dinámico del hidrofuidizador	67
3.4	Cálculo de número de Nusselt, coeficiente convectivo y coeficiente de enfriamiento	70
3.5.	Diseño final del hidrofuidizador didáctico para el preenfriamiento de productos hortofrutícolas	72
CONCLUSIONES		75
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		76

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.	Ecuaciones empleadas en el diseño de tanques (López, 1990).	40
Tabla 2.	Valores k_f de los accesorios (Steffe and Daubert, 2006)	54
Tabla 3.	Características del tanque limitante	60
Tabla 4.	Características del tanque anular	61
Tabla 5.	Sumatoria de valores k_f de los accesorios (Steffe and Daubert, 2006)	65
Tabla 6.	Valores de números adimensionales y coeficiente convectivo del equipo semi piloto y el didáctico.	71
Tabla 7.	Especificaciones técnicas del hidrofuidizador didáctico.	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.	Diseño del tanque de hidrofuidización (Verboven, <i>et al.</i> , 2003).	9
Figura 2.	Distribución de los orificios en el plato (Verboven, <i>et al.</i> , 2003).	9
Figura 3.	Diagrama de flujo del sistema de hidrofuidización (Peralta, <i>et al.</i> , 2009).	10
Figura 4.	Diagrama del tanque limitante y el tanque anular (Peralta, <i>et al.</i> , 2009).	11
Figura 5.	Equipo hidrofuidizador a nivel semi piloto (Jácome, 2010).	12
Figura 6.	Unidad de hidrofuidización (Jácome, 2010).	12
Figura 7.	Relación calculada con los datos de diseños anteriores, (Diámetro del tanque limitante/Diámetro del tanque anular). (A) Criterio de Verboven, <i>et al.</i> , 2003. (B) Criterio de Peralta, <i>et al.</i> , 2009.	17
Figura 8.	Dimensiones del cono de entrada al tanque limitante (García, 2006).	18
Figura 9.	Dimensiones del hidrofuidizador a nivel semi piloto.	57
Figura 10.	Dimensiones del tanque de alimentación	62
Figura 11.	Dimensiones finales del tanque limitante y el tanque anular.	63
Figura 12.	Dimensiones del hidrofuidizador didáctico.	74

RESUMEN

El preenfriamiento de productos hortofrutícolas por hidrofluidización es un método nuevo, que permite la reducción de tiempos de proceso, un mayor contacto entre el alimento y el medio de enfriamiento, provocando una mayor transferencia de calor e impide el daño a los productos, mejorando la calidad final de los mismos. El principio de esta operación es exponer al producto a chorros de medio refrigerante (agua) para generar una turbulencia alta y desarrollar altos coeficientes de transmisión térmica, lo que se logra por medio de una bomba que recircula el fluido refrigerante desde un tanque de alimentación hasta un tanque limitante donde se coloca el producto a preenfriar. El fluido pasa por unos orificios localizados en una charola en el fondo del tanque limitante, y se generan los chorros de choque que entran en contacto directo con el producto. Luego, el fluido llega al rebosadero donde cae al tanque anular y de ahí por gravedad pasa al tanque de alimentación para ser nuevamente transportado por la bomba. En la actualidad existen equipos a nivel industrial, piloto y semipiloto, no existe un equipo didáctico para hidrofluidización que permita el estudio a nivel laboratorio de los productos hortofrutícolas a fondo. Se realizó el escalamiento geométrico, dinámico, cinemático y térmico de un equipo hidrofluidizador a nivel semi piloto, a partir de una caracterización geométrica y utilizando los datos obtenidos bibliográficamente. Usando criterios de dimensionamiento de tanques y tuberías, se obtuvieron las dimensiones necesarias para el tanque de almacenamiento, el tanque limitante y el tanque anular. Basándose en el criterio de velocidad recomendada se propuso el diámetro de la tubería y mediante un balance de energía mecánica se seleccionó la bomba. Se calcularon los números adimensionales y coeficiente convectivo y se hizo una comparación con los obtenidos anteriormente. Así se obtuvieron las dimensiones de un hidrofluidizador didáctico al 50% de las dimensiones del hidrofluidizador original.

NOMENCLATURA

Símbolo		Unidades
A	Área transversal de la tubería	m^2
A_o	Área transversal del orificio del hidrofuidizador a nivel semi piloto	m^2
A'_o	Área transversal del orificio del hidrofuidizador didáctico	m^2
Cc	Coefficiente de enfriamiento	s^{-1}
Cp	Calor específico	$J/kg^\circ C$
D	Diámetro	m
D_1	Diámetro de tubería	m
Dint	Diámetro interno de la tubería	m
D_{ori}	Diámetro de los orificios del plato	m
D_{TA}	Diámetro del tanque de alimentación	m
D_{TL}	Diámetro del tanque de limitante	m
f	Factor de fricción de Fanning	
h	Coefficiente convectivo	$W/m^2^\circ C$
Hfs	Perdidas por fricción	J/kg
H_{TA}	Altura del tanque de alimentación	m
H_{TL}	Altura del tanque de limitante	m
k	Constante de proporcionalidad	
Kf	Coefficiente de resistencia	
K_T	Conductividad térmica	$W/m^\circ C$
m	Masa	Kg
Nu	Número de Nusselt	
Lc	Longitud del cono	m

P_{al}	Presión en el tanque de alimentación	Pa
P_{ATM}	Presión atmosférica	Pa
P_{TL}	Presión en el tanque limitante	Pa
Pr	Número de Prandtl	
Q	Flujo volumétrico	m^3/s
Q_{ent}	Flujo volumétrico entrante	m^3/s
Q_{os}	Carga térmica del producto	BTU
Re	Número de Reynolds	
Re_0	Número de Reynolds a la salida de los orificios	
T	Temperatura	$^{\circ}C$
V_{al}	Volumen del tanque de alimentación	m^3
V_{TL}	Volumen del tanque limitante	m^3
v_0	Velocidad a la salida de los orificios	m/s
W	Trabajo de la bomba	J/kg
Z	Distancia entre el fondo del tanque y la turbina de disco	m
ΔH	Cabezal de la bomba	Pa
ΔP	Diferencial de presión	Pa
ΔT	Diferencial de temperaturas	$^{\circ}C$
$\Delta z_g/gc$	Cabezal estático	J/kg
ΣF	Cabezal de fricción	J/kg
μ	Viscosidad	$kg/m\ s$
ρ	Densidad	kg/m^3

INTRODUCCIÓN

Los productos hortícolas tienen una vida de anaquel muy corta, debido a que son organismos vivos que continúan con su metabolismo aun después de la cosecha. Actualmente se buscan diversas formas de prolongar la calidad de los productos hortícolas mediante el retraso de sus procesos fisiológicos utilizando bajas temperaturas (Brosnan *et al.*, 2001). El preenfriamiento es una operación unitaria destinada a reducir rápidamente la temperatura de un alimento recién cosechado. El calor es originado por las reacciones metabólicas del producto y la incidencia de los rayos solares (Gutiérrez, 2011). Una forma de preenfriamiento es mediante el uso de agua, algunos de los productos que se preenfrian de esta manera son; espárragos, elote, apio, rábanos, duraznos, pepinos, pimientos, melones y papas (Fricke, 2006). El hidrogenfriamiento es uno de los métodos más eficaces para cubrir el área total de los frutos, es por ello que los tiempos de enfriamiento son menores respecto a otros métodos de enfriamiento. Comúnmente se utiliza agua a 1 °C y el preenfriamiento ocurre por convección forzada (Hernández y Vázquez, 2012). La modificación de los procesos convencionales de preservación de alimentos para ganar eficiencia y reducir tamaño de equipo es una tendencia global (Peralta *et al.*, 2009).

Un método recién desarrollado llamado hidrofudización, ha sido creado para preenfriamiento de productos basado en un alto grado de turbulencia del medio refrigerante (Fiikin, 1992). Este consiste esencialmente en un sistema de circulación con bombas donde el fluido refrigerante es enviado hacia arriba a través de los orificios o boquillas dentro de un recipiente, creando así chorros de agitación e incrementando la transferencia de calor en los productos durante el preenfriamiento (Verboven *et al.*, 2003).

Los hidrofudizadores son compactos y versátiles ya que permiten modificaciones desde el punto de vista de operación. El sistema de hidrofudización consta de tres unidades, la

unidad de hidrofuidización, la unidad de refrigeración y la unidad de bombeo (Jácome, 2010).

En el estudio de la hidrofuidización es importante conocer la forma en la que el flujo del fluido refrigerante alrededor del alimento influye en la transferencia de calor, por lo que se requiere conocer cómo se modifica el coeficiente convectivo en función a las variables de operación (Peralta *et al.*, 2009).

Para conocer mejor el proceso del preenfriamiento por hidrofuidización en productos hortícolas es necesario el escalamiento mediante los criterios de similitud geométrica y mecánica de hidrofuidizadores a nivel industrial y semipiloto y adecuarlas a las dimensiones óptimas para su uso como apoyo didáctico en la evaluación del preenfriamiento. Actualmente no existen disponibles en el mercado equipos para la hidrofuidización de dimensiones didácticas.

El escalamiento es una herramienta vital para la ingeniería, con ella se pueden reducir errores en el diseño de equipo, siempre que se usen adecuadamente los criterios de similitud geométrica, cinemática, dinámica, térmica y química (Anaya y Pedroza, 2008). El diseño de equipo se lleva a cabo primeramente identificando la necesidad, definiendo el problema y luego se da una solución. Teniendo las especificaciones del equipo, se llevan a cabo los estudios y cálculos correspondientes a los elementos principales del equipo (Palomo, 2013).

En este trabajo se realizó el escalamiento de un equipo hidrofuidizador a nivel semi piloto en base a sus dimensiones y a los datos obtenidos en estudios anteriores realizados en el mismo equipo, usando los criterios de similitud geométrica, cinemática, dinámica, y térmica para llegar a las especificaciones de un equipo de hidrofuidización didáctico, con una capacidad de 50% del equipo original.

CAPÍTULO I

MARCO TEÓRICO

1.1 Hidrofluidización

La hidrofluidización es una tecnología emergente diseñada para integrar las ventajas del enfriamiento y congelación de lecho fluidizado y por inmersión y compensar y reducir las desventajas de ambos métodos (Fikiin, 1992). Este método permite el preenfriamiento de productos hortofrutícolas sin causar daños físicos y con tiempos más eficientes. Cuando el proceso de hidrofluidización se controla adecuadamente resulta una técnica potencial para el preenfriamiento, enfriamiento y congelación de productos alimenticios y permite realizar el proceso en equipos compactos (Peralta *et al.*, 2009).

La hidrofluidización consiste en un sistema recirculado que bombea el medio refrigerante (refrigerante secundario) dentro de un recipiente, el cual al pasar a través de orificios genera chorros agitados que están en contacto con el alimento y aumentan la transferencia de calor durante el proceso. El refrigerante secundario es enfriado previamente por un sistema con un refrigerante primario (Verboven *et al.*, 2003).

El principio de funcionamiento de un sistema de hidrofluidización se basa en los sistemas de chorros de choque, los cuales son mecanismos de enfriamiento bastante eficientes debido a que desarrollan altos coeficientes superficiales de transferencia de calor. Es un sistema de gran importancia a nivel industrial debido a sus aplicaciones en el enfriamiento de metales y turbinas entre otras (Glynn and Murray, 2005).

El método de hidrofluidización alcanza altos coeficientes de transmisión térmica con bajos diferenciales de temperatura entre el producto y el medio de enfriamiento, lo que implica

que el trabajo mecánico del refrigerante secundario no represente un excesivo consumo energético. La operación puede llevarse a cabo de manera continua y automática, reduciendo los costos operacionales. El sistema es versátil debido a que puede emplear diferentes medios acuosos para lograr el preenfriamiento (Jácome, 2010).

1.1.1 Transferencia de calor

En el caso de la hidrofuidización, la transferencia de calor se da por convección forzada. La transferencia de calor que ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante, desarrolla una interacción fluido-superficie, que corresponde a una región en el tubo, donde la velocidad va desde cero a un valor infinito asociado con el flujo. Esta región se llama capa límite de velocidad. Si las temperaturas del producto y el fluido son diferentes, se tendrá una región del fluido que corresponde a la capa límite térmica (Jácome, 2010).

En este proceso la transferencia de calor se lleva a cabo mediante el movimiento global o volumétrico del fluido ya que el movimiento colectivo de moléculas en presencia de un gradiente de temperaturas facilita el intercambio de energía. El movimiento molecular aleatorio es predominante cerca de la superficie del alimento, donde la velocidad es baja, ya que en la interfaz entre el fluido y la superficie la velocidad tiende a cero. El movimiento global o volumétrico del fluido se debe a que la capa límite aumenta a medida que el flujo avanza. El calor que se conduce en esta capa es arrastrado corriente abajo y finalmente se transfiere al fluido fuera de la capa límite (Incropera y DeWitt, 1999).

El coeficiente convectivo depende de las condiciones de la capa límite, en las que influyen la geometría del sistema, las propiedades termodinámicas del fluido, la velocidad del fluido y la diferencia de temperaturas entre el fluido y el producto a preenfriar (Geankoplis, 1998). Cuando el flujo de calor es positivo, el calor se transfiere de la superficie hacia el líquido, es decir, ocurre una pérdida de calor del producto al medio refrigerante (Incropera y DeWitt, 1999).

El régimen de flujo afecta el coeficiente de transferencia de calor, si el flujo es turbulento, el coeficiente será mayor que en un régimen laminar o en transición. Se utilizan números adimensionales para calcular el coeficiente de transferencia de calor, como lo son el Reynolds, el Nusselt y el Prandtl. El número de Prandtl correlaciona físicamente el espesor relativo de la capa hidrodinámica con el de la capa térmica. El número de Nusselt expresa la relación existente entre el calor que se transfiere por convección en un fluido y el calor que se transfiere por conducción. Permite determinar cuál de los dos mecanismos prevalece en el sistema (Jácome, 2010). En un flujo sumergido, el régimen de flujo depende de la geometría del producto a preenfriar, su posición y de la velocidad de flujo.

$$h = \frac{Nu K_T}{D} \quad \text{Ec. 1}$$

$$h = 27.35e^{1281.836Cc} \quad \text{Ec.2}$$

Para usar la ecuación 2, se considera la transferencia de calor en estado no estacionario, producto con forma regular, sumergido en el medio y temperatura inicial uniforme en el producto (Jácome, 2010).

1.1.2 Flujo de fluidos

El estudio del flujo de fluidos se divide en dos, aquel que se dedica a los fluidos en reposo, llamada estática de fluidos y de los fluidos en movimiento, llamada dinámica de fluidos. En caso de la hidrofuidización, el fluido refrigerante siempre está en movimiento por lo que nos enfocaremos en la última.

En la dinámica de fluidos, se tienen dos tipos de regímenes de flujo; el laminar y el turbulento. Cuando la velocidad a la cual un fluido es transportado es baja, su desplazamiento es uniforme y su régimen de flujo es denominado laminar, donde el flujo obedece la ley de la viscosidad de Newton. En cambio, si su velocidad es alta, el régimen de flujo que se tendrá será turbulento, donde se generan remolinos debido a que las

partículas del fluido se mueven en varias direcciones (División de ingeniería de CRANE, 1987).

El tener un régimen de flujo laminar o turbulento va a depender de las características propias del fluido, tales como su viscosidad, densidad, además del diámetro por el que se transporta el fluido. Estas variables se relacionan con un valor adimensional, el número de Reynolds, el cual relaciona las fuerzas inerciales del fluido y la resistencia que tiene al flujo.

En el caso de sólidos sumergidos en líquidos, lo mismo da suponer en reposo cualquiera de las dos fases, lo importante es la velocidad relativa entre las dos. Una excepción es cuando la corriente del fluido es influenciada por paredes sólidas y el flujo es turbulento. La escala o intensidad de la turbulencia, pueden ser entonces, parámetros importantes del proceso. La turbulencia puede originar sobre el sólido, fuerzas distintas de las que se producirían si el sólido se moviese con la misma velocidad relativa a través de una masa de aire en reposo y libre de turbulencia (McCabe *et al.*, 1998).

El rozamiento es la fuerza en dirección del flujo que el fluido ejerce sobre el producto. El producto ejerce sobre el fluido una fuerza igual y opuesta. Cuando la pared del producto es paralela a la dirección del flujo, la única fuerza de rozamiento es el esfuerzo cortante de la pared. El rozamiento total integrado, debido al esfuerzo cortante en la pared, se llama rozamiento de pared y la magnitud correspondiente debida a la presión recibe en nombre de rozamiento de forma. El rozamiento debido a la presión en la dirección de flujo se equilibra con una fuerza igual y de sentido opuesto. Por lo tanto en el flujo potencial no hay rozamiento neto.

Para fluidos circulando a través de tuberías es útil conocer el factor de fricción que es la relación entre el esfuerzo cortante y el producto de la carga de velocidad por la densidad.

Para los sólidos sumergidos se emplea un factor análogo llamado coeficiente de rozamiento. Considerando una esfera lisa sumergida en un fluido en movimiento y situada a una distancia suficientemente alejada de las superficies sólidas, que limitan la corriente, con el fin de que la corriente que se aproxima a la misma lo haga con el flujo potencial. El

área proyectada por un cuerpo sólido, se define como el área que se obtiene al proyectar el cuerpo sobre un plano perpendicular a la dirección de flujo.

El coeficiente de rozamiento de un sólido liso en un fluido no compresible depende del número de Reynolds y de los factores de forma que sean necesarios.

1.1.3 Chorros de choque

Los sistemas de chorros de choque se han empleado como un método alternativo para la congelación, enfriamiento y preenfriamiento de alimentos, ya que generan regímenes de flujo turbulentos y se obtienen coeficientes convectivos altos, y como consecuencia, los procesos se llevan a cabo en un tiempo menor y con una calidad del producto alta. La eficiencia de estos sistemas es afectada por la velocidad del fluido a la salida del orificio, la geometría del orificio, las características de la superficie del producto y el diseño del sistema de hidrofuidización en general (Jácome, 2010).

Los chorros se descargan desde un orificio de un determinado diámetro y son turbulentos, al salir, poseen un perfil de velocidad determinado, pero al aumentar la distancia desde la salida al producto, el intercambio de momento entre el chorro y el medio ocasiona que el límite del chorro se ensanche y que se contraiga el núcleo potencial, dentro del cual se retiene la velocidad de salida uniforme. Fuera del núcleo potencial, el perfil de velocidad no es uniforme, y disminuye al aumentar la distancia desde la salida. La región donde las condiciones no son afectadas por la superficie de choque se denomina chorro libre. En la zona de choque, el flujo está influido por la superficie de choque. En el sistema de hidrofuidización, el sistema de chorro de choque es considerado sumergido, ya que el fluido es inyectado en una región que contiene el mismo fluido (Jácome, 2010).

Existen sistemas de chorros de choque con un solo orificio de salida y sistemas múltiples con arreglos de varios orificios, la transferencia de masa y calor difiere de un sistema sencillo a uno múltiple. En un sistema múltiple, la transferencia de calor por choque implica un arreglo de chorros donde además del flujo de cada orificio y su región de estancamiento, resultan zonas de estancamiento secundarias donde interactúan los chorros

contiguos. La transferencia global de calor depende de la manera en la que se descarga el fluido y de su temperatura (Incropera y DeWitt, 1999).

Los sistemas de chorros de choque múltiple tienen dos interacciones, las cuales no suceden en sistemas de un orificio. La primera es una interacción chorro-chorro, que se da antes de chocar con la superficie del producto. La segunda es una interacción entre el chorro y el flujo secundario de los chorros adyacentes (Weigand and Spring., 2009).

La evaluación del coeficiente de transferencia de calor entre el chorro de choque y una superficie se realiza en función de los números adimensionales Nusselt, Reynolds y Prandtl, relacionados con el número, diámetro y distribución de los orificios, así como de la geometría de la superficie del producto, la distancia entre el orificio y el producto entre otras (Jácome, 2010).

1.1.4 Aplicación

Los sistemas de hidrofuidización son empleados como un método alternativo para la congelación, enfriamiento y preenfriamiento de alimentos, siendo esta última aplicación la más utilizada en productos hortofrutícolas y algunas variedades de pescados, moluscos y ostras (Hernández y Vázquez, 2012). Además es también un sistema utilizado en el enfriamiento de metales y turbinas entre otras (Glynn and Murray, 2005).

1.1.5 Productos hortofrutícolas preenfriados

Los productos hortofrutícolas son fuente de hierro y minerales diversos, carotenos y vitamina C, fibra dietética, carbohidratos y agua. Dichos componentes pueden ser aprovechados por el organismo humano. Son productos altamente consumidos y en su mayoría de bajo costo en nuestro país (Ochoa y Rivas, 2005).

Los productos hortofrutícolas son organismos vivos que desarrollan una serie de procesos biológicos y fisiológicos, como la respiración y la transpiración. Estos procesos son

resultado de la misma naturaleza del producto y se ven afectados directamente por factores intrínsecos (productos climatéricos y no climatéricos) y extrínsecos (temperatura, concentración de etileno, oxígeno y dióxido de carbono) causando alteraciones en los atributos de calidad del producto (Jácome, 2010).

Los productos hortofrutícolas poseen cortos tiempos de vida de anaquel (Brosnan and Sun, 2001). Y la pérdida de la calidad puede ser ocasionada de distintas maneras:

- a. Cambios metabólicos asociados a la fisiología del producto que provocan modificaciones a nivel de composición, textura y color.
- b. Pérdida de humedad, que debido a la transpiración, ocasiona alteraciones a nivel textural.
- c. Daños físicos debido al manejo mecánico.
- d. Enfermedades causadas por parásitos y/o microorganismos.

Algunos de los productos hortofrutícolas que se suelen preenfriarse por hidrofludización son: espárragos, habichuelas, melones, apio, guisantes, rábanos, cerezas, duraznos, pimientos, papas, alcachofa, chicharos, tomates entre otros (Fricke, 2006).

1.1.6 Equipo

Los sistemas de hidrofludización son compactos y versátiles, ya que permiten diversas modificaciones desde el punto de vista de operación (Peralta et al., 2009). El equipo de hidrofludización consta de 3 unidades, la unidad de hidrofludización, la unidad de refrigeración y la unidad de bombeo.

La unidad de hidrofludización consta a su vez de tres partes, una cámara inferior en la que se descarga el fluido refrigerante (refrigerante secundario) y dentro de la cual este se homogeniza antes de que se generen los chorros de choque. En la parte superior de dicha cámara se encuentra la charola con los orificios, a través de la cual, el fluido pasa a una segunda cámara, denominada cámara experimental, donde se encuentran las muestras de alimento y se lleva a cabo la hidrofludización. Un tercer tanque o cámara se encuentra en el

exterior de ambas cámaras y su función consiste en recibir el líquido que rebose de la cámara experimental y retornarlo por gravedad a través de tuberías hacia el depósito de agua fría, por lo que debe existir un diferencial de altura entre la unidad de hidrofuidización y el depósito del medio refrigerante. (Peralta *et al.*, 2009; Verboven *et al.*, 2003).

El depósito de medio refrigerante (refrigerante secundario) consiste en un recipiente aislado, dentro del cual está contenido el líquido refrigerante. Dicho líquido es bombeado hacia la unidad de hidrofuidización. Para el mantenimiento de las condiciones adecuadas de temperatura en el líquido refrigerante se dispone de una unidad de refrigeración con un refrigerante primario que pasa a través de un serpentín sumergido dentro del depósito. El medio de refrigeración puede ser agua helada o hielo fluido, dependiendo de la aplicación, tipo de producto y las condiciones de operación del sistema.

1.1.7 Análisis de diseños existentes

Existen diseños en la bibliografía, todos con características que los diferencian, además de que se usaron con materiales distintos.

Para poder elegir qué propiedades de estos diseños se retomaran o cuales se deben mejorar en el hidrofuidizador didáctico, se analizó cada diseño.

En el diseño de Verboven la unidad de hidrofuidización consiste en un refrigerante primario R- 404A con un circuito de refrigeración incluyendo un evaporador y un medio refrigerante secundario, con un circuito que incluye una bomba y un control de temperatura. El medio refrigerante entra al tanque de alimentación (0.50 m x 0.50 m x 0.13 m) a través de los orificios (21 x 3mm de diámetro) para crear efectos de hidrofuidización.

En la figura 1 se muestra el diseño del tanque limitante y el tanque anular y sus respectivas dimensiones en milímetros. En la figura 2 se muestra que en este diseño se consideró que los chorros de refrigerante deberían cubrir, además del centro del plato, las esquinas del tanque limitante, para tener un régimen turbulento distribuido por todo el área transversal

del tanque, evitando que los chorros solo se concentren en un punto del alimento, y evitar que solo los cuerpos que se encuentren al centro sean los más hidrofluidizados.

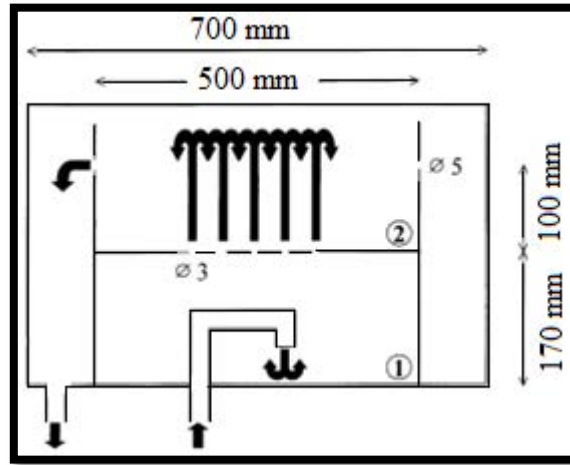


Figura 1. Diseño del tanque de hidrofluidización (Verboven, *et al.*, 2003).

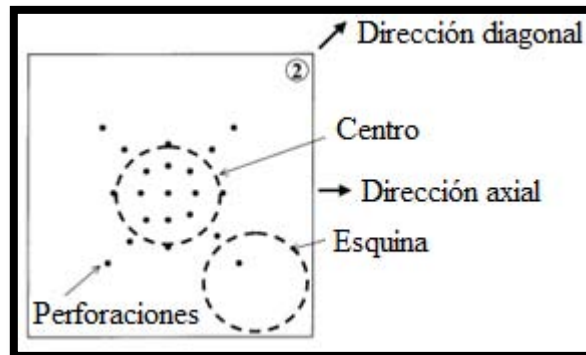


Figura 2. Distribución de los orificios en el plato (Verboven, *et al.*, 2003).

Otro diseño es el de Peralta, el cual, su sistema de hidrofluidización consiste en dos módulos; uno con la unidad de refrigeración y el tanque el refrigerante secundario y el segundo módulo con la bomba, las válvulas, los rotámetros y la unidad de hidrofluidización.

La unidad de refrigeración tiene un evaporador hecho en acero inoxidable con una longitud de tubería de 25 m usada para el refrigerante secundario, el cual es enfriado en un tanque agitado y aislado de 72 L. El refrigerante secundario es circulado a través de la tubería

usando una bomba LOWARA modelo CEA (M) 70/3 de 0.5 HP. La bomba está controlada por un regulador de velocidad AC.

La presión descarga de la bomba es medida por un manómetro con lector de medición. El control de flujo se realiza por dos rotámetros en paralelo hechos de acrílico ODIN. El flujo es controlado por una válvula de globo y válvulas de elevación. La tubería está hecha de polipropileno de 1/2 y 1" de diámetro nominal.

La unidad de hidrofuidización está hecha de acero inoxidable. Consiste de tres partes: una cámara donde se homogeniza el flujo antes de generar los chorros, un tanque de experimentación de 4.9 L arriba del plato con orificios donde la muestra de alimento es colocada y un tanque anular de 20 L que recibe el líquido recirculado para el tanque refrigerante.

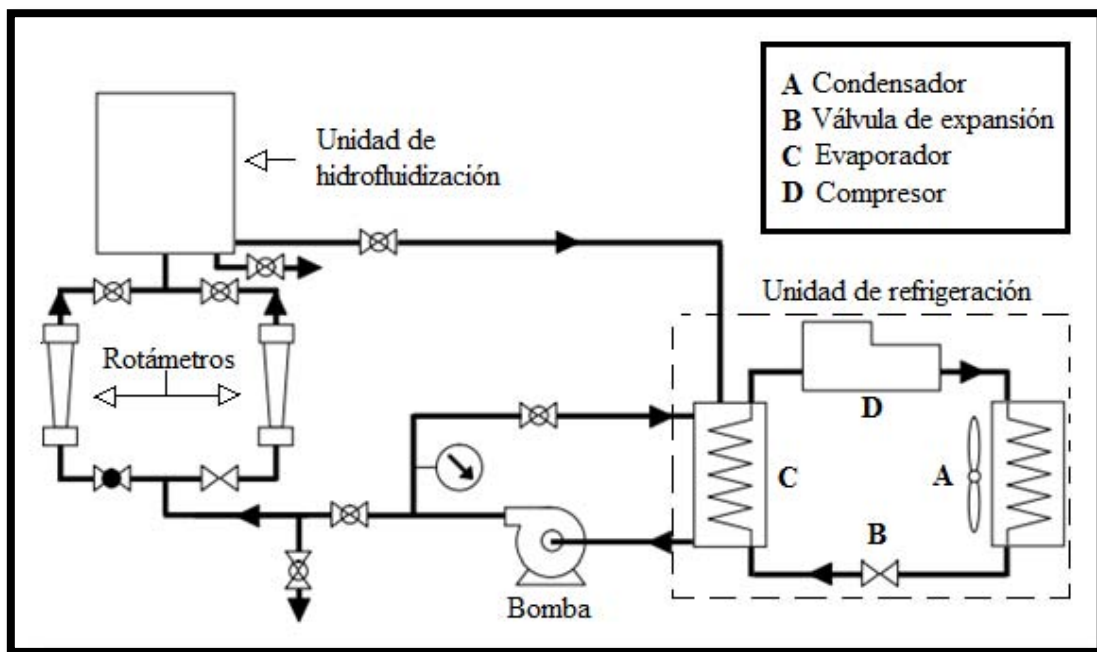


Figura 3. Diagrama de flujo del sistema de hidrofuidización (Peralta, *et al.*, 2009).

En la figura 4 se muestra la unidad de hidrofuidización, donde el tanque limitante dispone de una zona donde el fluido refrigerante puede ser homogenizado para que la temperatura del mismo sea la misma en todos los puntos al entrar en contacto con el alimento, se ve un arreglo que provoca la división del flujo en dos y que va en dirección hacia abajo para

llevar a cabo la homogenización. Sin embargo, este tipo de arreglo puede resultar perjudicial, debido a que presenta una caída de presión alta, por lo que podría disminuir la fuerza de los chorros de choque y el proceso no se llevaría a cabo de forma adecuada.

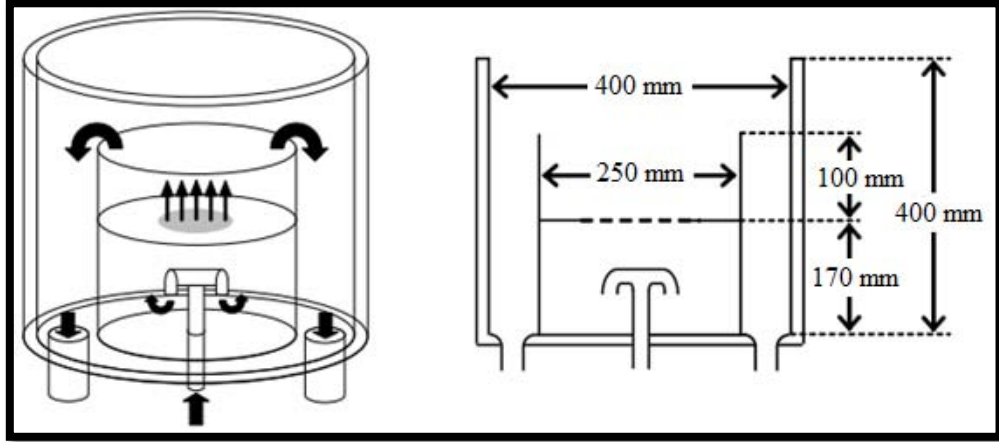


Figura 4. Diagrama del tanque limitante y el tanque anular (Peralta, *et al.*, 2009).

Otro diseño es el de Jácome, quien construyó el equipo en base a los datos bibliográficos reportados. Consta de un recipiente de plástico que contiene al medio de enfriamiento. La tubería es de Policloruro de Vinilo (PVC) con arreglos de válvulas, el diámetro es de 1". Para el arreglo 1 la tubería fue de un diámetro de 1/2" y para el arreglo 2 el diámetro fue de 1/4", esto, para obtener diferentes flujos volumétricos del sistema. El tanque limitante se adapta directamente a la salida de la tubería y es removible. La tubería de descarga se encuentra a 0.6 m del nivel del suelo.

En la figura 6 se encuentra el diagrama de la unidad de hidrofuidización, en la cual, se tiene que el fluido refrigerante entra al tanque limitante por medio de un cono, el cual ayuda a homogenizar el fluido sin tener una caída de presión grande, debido a que es una expansión gradual. Se tiene que el plato cuenta con orificios de 5 mm de diámetro. El fluido refrigerante cae al tanque anular, en el cual se localiza la tubería de descarga, por donde el fluido regresa al tanque de alimentación.

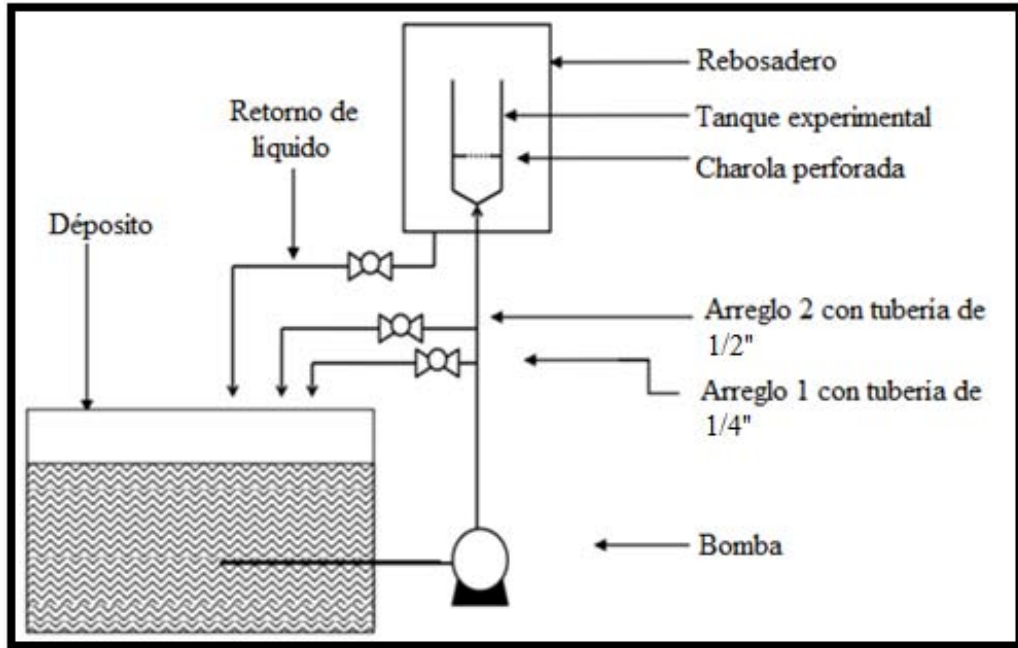


Figura 5. Equipo hidrofluidizador a nivel semi piloto (Jácome, 2010).

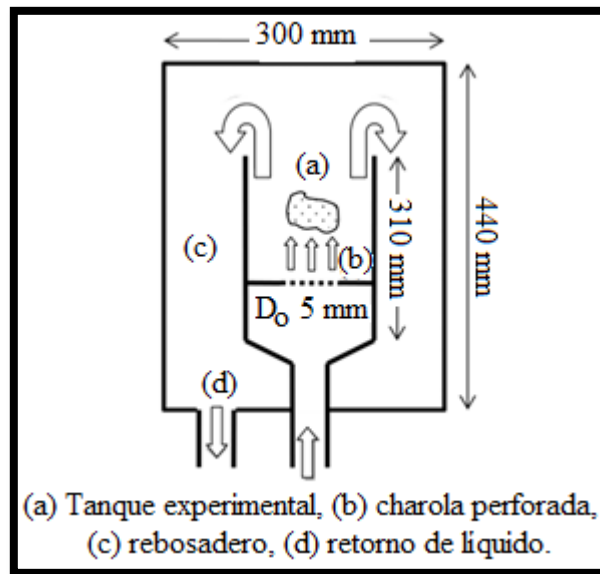


Figura 6. Unidad de hidrofluidización (Jácome, 2010).

1.1.7.1 Ventajas y desventajas

Una de las ventajas principales del diseño de Verboven (figura 1), consiste en su sistema de enfriamiento, el cual cuenta con un control de la temperatura del medio. Otro es el número de orificios y la posición de estos, ya que no solo se encuentran en el centro, sino que están distribuidos de manera que los chorros cubren mayor superficie del alimento. Otra ventaja es que tiene depósito previo, donde se homogeniza el fluido refrigerante, asegurándose de que la temperatura del medio sea homogénea al pasar por el plato de orificios. Pero al mismo tiempo es una desventaja, ya que este mismo compartimiento genera una caída de presión antes de que el fluido atraviese el plato con orificios, lo que provoca un mayor gasto de energía por parte de la bomba. Además, de que el sistema de enfriamiento del medio refrigerante es muy costosa, de difícil transporte y mantenimiento. Y en general, la construcción de la unidad de hidrofuidización es costosa, debido al empleo de acero inoxidable en tanques, tuberías y accesorios.

Peralta, en su diseño (figura 4), también incorporó un sistema de refrigeración propia la cual tiene un evaporador de 25 m de largo, lo cual ya representa una desventaja en cuanto a espacio y transporte. Las dimensiones de este diseño en sí tienen una gran desventaja en cuanto al tamaño y en consecuencia al costo del equipo, ya que esta también construido con acero inoxidable. El tanque donde el medio de enfriamiento es enfriado es agitado y aislado, lo cual es una ventaja, ya que se evita el intercambio de energía con el medio ambiente y con la agitación se homogeniza la temperatura del fluido refrigerante antes de enviarlo al tanque limitante. Otra ventaja que tiene es que su bomba cuenta con un regulador de velocidad. Su medición del flujo se realiza con dos rotámetros. También cuenta con una cámara donde se homogeniza el fluido refrigerante antes de ingresar a través de los orificios del plato, cuya entrada esta bifurcada y orientada hacia el fondo del tanque, lo que genera una pérdida de energía a la entrada del tanque y se disminuye la fuerza de los chorros que estarán en contacto con el alimento al momento de operar, esto costará energía eléctrica de la bomba.

Una ventaja del diseño de Jácome (figura 5) es que está construido con PVC, lo que disminuye el peso y hace más fácil el transporte, la construcción y baja el costo del equipo. Aunque el PVC no es común en instalaciones industriales, es ideal para la construcción de

un equipo a nivel semi piloto debido a las ventajas antes descritas. Además de que la cantidad de materia prima requerida es pequeña, lo que lo hace adecuado para experimentos de hidrofuidización. Otra es que las dimensiones son menores que en los diseños mencionados anteriormente, por lo que se puede utilizar a nivel semi piloto y además de que utiliza agua fría como fluido refrigerante. La entrada al tanque limitante tiene forma de cono, lo que hace que el cambio de diámetro sea gradual y se disminuye la caída de presión. Una desventaja es que no cuenta con un sistema de refrigeración propio, por lo que se tiene que enfriar previamente el medio antes de comenzar la operación. No cuenta con una forma de medir el flujo que ingresa a la cámara durante la experimentación. Otra desventaja es que para este diseño se consideraron datos reportados en la bibliografía sin tomar en cuenta cálculos de balance de energía mecánica del sistema, la potencia de la bomba empleada es demasiado grande para la cantidad de fluido refrigerante a ocupar. El material del tanque limitante y el tanque anular no permite la observación del fenómeno de hidrofuidización durante la operación. Sus dimensiones son grandes para considerarse un equipo a nivel didáctico.

1.1.7.2 Condiciones de operación, resultados obtenidos y análisis.

En el diseño de Verboven se empleó una solución de agua (50%), etanol (30%) y glucosa (20%), cuyas propiedades térmofísicas fueron: densidad 1042 kg/m^3 y conductividad térmica $0.36 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ a $0 \text{ }^\circ\text{C}$. Se utilizaron esferas de aluminio de alta conductividad térmica ($>150 \text{ W/m}^\circ\text{C}$) y diámetro pequeño ($<50 \text{ mm}$). Los termopares fueron insertados dentro de las esferas de aluminio. La temperatura del medio fue registrada con 2 termopares colocados de diferentes formas en el tanque para cada experimento. La diferencia entre estos sensores nunca fue mayor a $0.5 \text{ }^\circ\text{C}$ indicando una buena uniformidad de temperatura dentro del tanque limitante. Las variables consideradas fueron: temperatura de refrigeración $-20 \text{ }^\circ\text{C}$, $-10 \text{ }^\circ\text{C}$ y $0 \text{ }^\circ\text{C}$; velocidad de flujo 5 min^{-1} y 15 min^{-1} ; diámetro de la esfera de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 mm; posición de las esferas en el centro (sujetas a chorros de hidrofuidización) o en la esquina (sujetas a flujo secundario) del tanque limitante. Todas las combinaciones de velocidad de flujo y temperatura de refrigeración fueron repetidas 5-7 veces con variadas posiciones de las esferas en el centro del tanque limitante (250 puntos

de medición). Las mediciones fueron realizadas a 2 temperaturas (-20 y -10 °C) y 2 velocidades de flujo (96 puntos de medición).

Bajo ciertas condiciones (14.5 min, -15 °C, D= 30 mm) el coeficiente convectivo fue de $368 \pm 29 \text{ W/m}^2\text{°C}$. La desviación estándar fue menor del 8%. El coeficiente de transferencia de calor en el centro del tanque limitante tuvo valores dentro de los rangos de 598-1548, 327-1320, 210-1024, 182-636, 211-830 y 210-687 W/m°C en esferas de 5, 10, 20, 30, 40 y 50 mm respectivamente. Estos rangos incluyen baja y alta velocidad de flujo. Los rangos correspondientes a las esquinas del tanque fueron negativas, es decir, mediciones no confiables. Los valores fueron menores porque la falta de orificios reduce los niveles de agitación.

Peralta usó esferas de cobre, con una conductividad térmica (K_T) de 386 W/m°C, un calor específico (C_p) de 384 J/kg°C y una densidad (ρ) de 8660 kg/m³ con un orificio central donde se colocó el termopar en su centro geométrico donde se usó para medir temperatura. El termopar fue elegido con una conductividad térmica alta. El diámetro de las esferas de cobre fue de 10 y 20 mm. Como medio refrigerante se usó una solución acuosa al 23.1 % de sal, la temperatura del refrigerante fue de -10 °C y -15 °C y sus propiedades termofísicas a -10 °C fueron: calor específico 3330.4 J/kg°C, conductividad térmica de 0.528 W/m°C.

La velocidad de flujo fue de 1, 2 y 3^a L/s ($a= 2.36, 4.72$ y 7.07 m/s). Las esferas fueron inmersas en un baño de agua a 22 ± 1 °C para homogenizar su temperatura inicial. Un total de 193 experimentos se llevaron a cabo para determinar los valores del coeficiente convectivo (h).

Los valores experimentales del número de Nusselt obtenidos estuvieron en el rango de 40 a 400. El número de Nusselt incrementa cuando el número de Reynolds y el número de Prandtl aumentan. El número de Nusselt decrece cuando la relación entre el diámetro del orificio y el diámetro de la esfera disminuyen, es decir, cuando el diámetro del orificio es mayor que el diámetro de la esfera. El promedio del coeficiente de transferencia de calor estuvo dentro del intervalo de 3000 a 10500 W/m²°C. El intervalo del valor del número de Reynolds fue de 15000-115000.

Jácome utilizó papa cambray con dimensiones similares y forma geométrica casi regular. Se seleccionaron tres lotes de 10 papas cambray cada uno. Se pesaron y se midieron sus dimensiones. Antes de cada prueba se almacenaron en una caja a temperatura ambiente. Se seleccionaron seis papas para los experimentos.

Los diámetros de las papas eran similares, con valores de 34.39 a 37.84 mm. Se introdujo un termopar en el centro geométrico de cada papa. El registro de temperatura de las papas se hizo cada 30 segundos. Se hicieron arreglos en la unidad de hidrofuidización para obtener tres diferentes flujos volumétricos (6.2×10^{-4} , 2.93×10^{-4} y 3.08×10^{-4} m³/s) y como medio de enfriamiento se usó agua fría, cuya temperatura fue de 8 °C. Posteriormente se calculó el tiempo de enfriamiento, el coeficiente de enfriamiento y el coeficiente convectivo.

El tiempo de enfriamiento fue de 8.5 min mientras que la velocidad de enfriamiento fue de 3-76 °C/min para una esfera de 34.38 mm de diámetro. El valor del coeficiente de enfriamiento en la mayoría de los casos estuvo comprendido entre 1.51×10^{-3} y 3.59×10^{-3} 1/s. los valores de los coeficientes convectivos obtenidos estuvieron entre los valores de 231 y 3650 W/m²°C. El valor del número de Reynolds para el valor máximo de coeficiente convectivo fue de 5849.77 y el valor del número de Nusselt fue de 186.62, los cuales son los valores máximos obtenidos de los respectivos números.

En base a estos datos, se seleccionaron los diseños de Peralta y Verboven, ya que el diseño de Jácome esta en gran parte influenciado por el diseño de Peralta. En base a las dimensiones de los tanques limitantes y anulares de estos diseños, se calcularon criterios para el diseño de los mismos.

De donde se calcularon las relaciones de diseño de los tanques, las cuales son las siguientes:

$$\frac{D_{TL}}{D_{TA}} = 0.625 \quad \text{Ec. 3}$$

$$\frac{H_{TL}}{H_{TA}} = 0.675 \quad \text{Ec. 4}$$

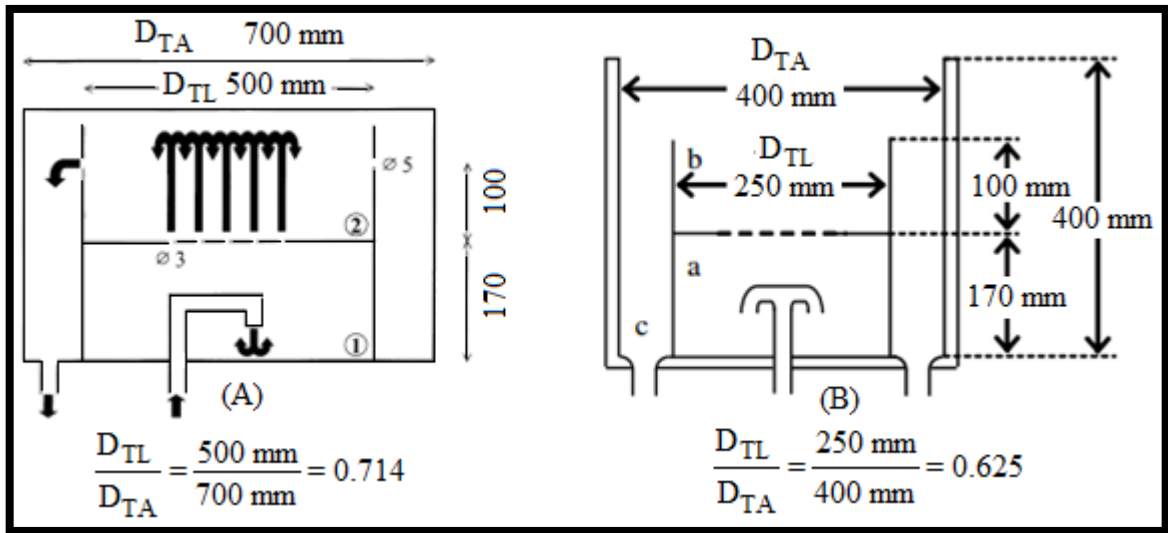


Figura 7. Relación calculada con los datos de diseños anteriores, (Diámetro del tanque limitante/Diámetro del tanque anular). (A) Criterio de Verboven, *et al.*, 2003. (B) Criterio de Peralta, *et al.*, 2009.

Ambos obtenidos de las dimensiones del diseño de Peralta, ya que este presenta la separación de ambos tanques en el fondo, además de que los tamaños de los tanques son menores que en el diseño de Verboven.

Finalmente, se usaron los volúmenes de tanque de alimentación y el tanque limitante del diseño de Peralta para obtener la siguiente relación:

$$\frac{V_{al}}{V_{TL}} = 1.2 \quad \text{Ec. 5}$$

Como se requiere que el diseño final cuente con un cono a la entrada del tanque limitante para disminuir la caída de presión del agua, se tomó en cuenta las características de un cono normal:

$$L_c = \frac{D_{TL} - D_1}{2} \quad \text{Ec. 6}$$

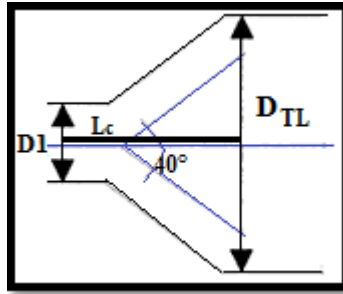


Figura 8. Dimensiones del cono de entrada al tanque limitante (García, 2006).

1.2 Escalamiento

Se llama escalamiento a la obtención de información aplicable en otra escala, mediante un modelo físico. El análisis dimensional es el punto de partida de la teoría de los modelos físicos, la cual establece las condiciones que los modelos han cumplir para representar al sistema así como la manera de aplicar la información obtenida a los nuevos sistemas a otra escala.

En el escalamiento se desarrollan los criterios y las reglas de asignación numérica que determinan las unidades de medida significativas para llevar de un tamaño dado a otro mayor o menor, de una operación u objeto. Escalar un proceso o equipo es convertirlo de su escala de investigación a escala industrial o viceversa. Analizar las condiciones de procesos y factores de influencia para definir los equipos o elementos necesarios y proponer el proceso o el diseño del equipo (Anaya y Pedroza, 2008).

Para que ambos sistemas, modelo y prototipo, sean similares, se requiere que los grupos adimensionales que gobiernan el proceso tengan respectivamente el mismo valor. Se parte de ecuaciones de mecanismo introduciendo variables adimensionales; otra forma es mediante el análisis dimensional (Dónde, 2005).

El principio de similaridad fue primeramente enunciado por Newton para sistemas de partículas sólidas en movimiento. No obstante enseguida fue aplicado a sistemas fluidos donde ha probado ser muy útil. Froude y Reynolds los aplicaron a casos de ríos, estuarios y barcos y Rayleigh, Buckingham y otros lo generalizaron.

Existen varios tipos de similitud entre dos sistemas; la primaria es la geométrica, que existe cuando cada punto de uno de ellos tiene su contraparte en el otro aunque sus aspectos no sean iguales. En segundo término esta la similitud mecánica, que a su vez tiene un aspecto dinámico y otro cinemático (Anaya y Pedroza, 2008).

En la similitud geométrica considerando dos cuerpos sólidos, cada uno con tres ejes imaginarios es el espacio que los intersectan a fin de ser descritos de igual forma en todos los puntos en un mismo sistema de coordenadas.

Se define que dos cuerpos son geoméricamente similares cuando para todo punto en el primer cuerpo existe un punto en el segundo. Esto ocurre cuando el segundo objeto está compuesto por elementos idénticos múltiples geoméricamente similares al primero (Dónde, 2005).

La similitud mecánica presupone la geométrica y abarca otras dos similitudes; la dinámica y la cinemática. La similitud dinámica se da cuando las fuerzas en dos contrapartes de ambos sistemas guardan una relación constante mientras que la cinemática la relación constante se da entre las velocidades correspondientes. La similitud cinemática es muy importante en ingeniería porque en dos sistemas con esa similitud de patrones de flujo son parecidos y existe también, con algunas restricciones, una relación constante entre las velocidades de transferencia de calor y masa y otros coeficientes en puntos contraparte. La similitud cinemática asegura la existencia de la dinámica, ya que las velocidades son consecuencia de las fuerzas aplicadas localmente (Dónde, 2005).

En dos tubos de diámetro distinto, en ausencia de fuerzas gravitacionales y de tensión superficial, la igualdad de los números de Reynolds garantiza la similitud dinámica y cinemática. Pero existen otras fuerzas tales como la tensión superficial y la gravedad, porque puede que el tubo no esté lleno ni sea horizontal, los números de adimensionales deberán ser iguales (Dónde, 2005).

El escalamiento o cambio de escala se realiza de forma tal que los procesos en ambas escalas guarden similitud entre sí, esto es, que las variables adimensionales que controlan el

proceso sean iguales en ambos casos. Este escalamiento está basado en conceptos matemáticos y es diferente del escalamiento que podría llamarse tradicional, el cual es totalmente empírico y solo tiene sentido si en las dos escalas el paso controlante es el mismo, se trata de una reacción o un fenómeno de transporte (Donde, 2005).

En casos muy sencillos, el escalamiento puede lograrse a partir de únicamente de los grupos adimensionales. Un problema se presenta cuando aparecen incompatibilidades algebraicas al tratar de igualar los grupos adimensionales o bien condiciones difíciles de alcanzar experimentalmente.

En el caso en que no se dispone de ecuaciones teóricas y se hace necesario recurrir a la experimentación en un modelo de mayor tamaño, primero es necesario establecer cuáles son los grupos adimensionales que rigen el proceso. Si ambos sistemas son similares geométrica y cinemáticamente, entonces son matemáticamente idénticos, tienen ecuaciones idénticas diferenciales, adimensionales y las mismas distribuciones de velocidad adimensional (perfiles de velocidad). La velocidad adimensional es el cociente entre la velocidad y la de referencia (Donde, 2005).

En casos más complejos como el de transferencia de calor por convección forzada, la aplicación matemática del principio de similitud mecánica y geométrica a procesos de transferencia de calor da excelentes resultados. Normalmente no es posible encontrar grupos adimensionales suficientes para cubrir toda la variedad de parámetros que controlan los procesos (Donde, 2005).

1.2.1 Escala piloto y semi piloto

Una planta o un equipo a nivel piloto consiste en partes específicas ensambladas que operan como todo un armónico con el propósito de reproducir a una escala determinada algún proceso productivo o varios. En estos procesos intervienen fenómenos simples o complejos, permitiendo el análisis de las interacciones presentes en operaciones como el flujo de fluidos, la transferencia de masa y energía, el control de procesos entre otras. Facilita la posterior operación y aplicación a nivel industrial o en algún área de trabajo

determinada, para la confrontación de la teoría (modelos) con la práctica y la experimentación. El uso de plantas o equipo a nivel piloto o semi piloto tiene como propósitos principales (Anaya y Pedroza, 2008):

- a) Predecir el comportamiento de una planta o equipo a nivel industrial, operando el equipo o planta a nivel piloto o semipiloto en condiciones similares a las esperadas y estos datos serán la base para el diseño de la planta o equipo industrial.
- b) Estudiar el comportamiento de plantas o equipos industriales ya construidas, donde la planta o equipo piloto es una réplica y estará sujeta a condiciones de operación previstas para la planta industrial. en este caso, la planta o equipo piloto se llamará modelo y tiene como función principal mostrar los efectos de los cambios en las condiciones de operación de manera más rápida y económica que si se realizaran en la planta o equipo original.

1.2.2 Análisis dimensional

En el análisis dimensional, se hace una relación de las variables que intervienen en un fenómeno para establecer las ecuaciones que lo rigen, ya sea en forma homogénea o heterogénea, es decir si de la relación resulta una ecuación sin unidades de dimensión, la ecuación es homogénea entre ambos sistemas. Si las ecuaciones tienen unidades de medida entre ambos sistemas, el factor de proporcionalidad requerirá de sus propias unidades para hacer homogénea a los dos sistemas; la ecuación es heterogénea. Es importante que al hacer un análisis dimensional, todas las variables involucradas se deben manejar en el mismo sistema de unidades. Algunos métodos de análisis dimensional son los siguientes (Martínez y Posadas, 1996):

- Método de Buckingham
- Método de Rayleigh
- Método de ecuaciones diferenciales

Los más estudiados y que tienen mayor aplicación son los dos primeros y se describen a continuación.

a) Método de Buckingham

Para su aplicación se siguen los siguientes pasos:

Considerar y establecer las variables que influyen en el fenómeno de que se trate.

- i. Se formulan las ecuaciones para cada una de las variables en función de las unidades fundamentales de estas; establecidas en cualquier sistema de unidades. Si hay diversas variables con las mismas unidades fundamentales se escoge solo una de ellas para el análisis y añadir al final de este las restante a los grupos adimensionales resultantes.
- ii. Formar la matriz con los exponentes de cada magnitud fundamental de cada variable y/o constante universal que influya en el fenómeno.
- iii. Determinar el valor de J de la matriz. Donde J es el número de magnitudes fundamentales.
- iv. Determinar el valor de I, donde $I = \text{número de grupos sin dimensión}$, que será igual al número de variables (n), quedando: $y = n - J$
- v. Se forman cada grupo π (razones adimensionales) con las n variables y denotarlos con una letra en forma de exponentes, donde la última variable queda elevada a la unidad de cada grupo.
- vi. Sustituir para cada grupo “ π ”, formado a cada una de las variables por sus unidades fundamentales e igualar a cero.
- vii. Sumar los exponentes de cada una de las variables y separarlos en ecuaciones independientes para cada una de las magnitudes fundamentales, de tal forma que el número de ecuaciones sea igual a J con igual número de incógnitas.
- viii. Resolver el sistema de ecuaciones para encontrar cada una de las incógnitas
- ix. Sustituir el valor encontrado para cada una de las incógnitas en cada una de las variables correspondientes
- x. Agrupar las variables para formar una razón adimensional en forma algebraica.

b) Método de Rayleigh

En la aplicación se siguen los pasos siguientes:

- i. Considerar y establecer las variables que intervienen en el fenómeno a estudiar
- ii. De las variables anteriores se selecciona la de mayor interés o la de estudio y se expresa como función exponencial de las demás y de las posibles constantes.
- iii. Se sustituye cada una de las variables por sus unidades fundamentales.
- iv. Sumar los exponentes de cada una de las variables y separarlos en ecuaciones independientes para cada una de las magnitudes fundamentales
- v. El siguiente paso es resolver el sistema de ecuaciones. Para este método generalmente el número de incógnitas (n) es mayor que el número de ecuaciones (p), por lo que se utiliza la siguiente expresión que pone a las variables en función de otras $(n-1-p)$ = número de exponentes o incógnitas elegidos y se resuelve el sistema para las funciones restantes en función de las elegidas.
- vi. Sustituir los valores de los exponentes que no fueron elegidos en forma de función exponencial del paso ii.
- vii. Agrupar las magnitudes elevadas a los mismos exponentes y acomodarlos en grupos, de tal manera que un conjunto de razones adimensionales este en función de uno de estos.

c) Método de ecuaciones diferenciales

Los métodos anteriores se limitan a agrupar en razones o números adimensionales un cierto número de variables que se supone influye en un determinado fenómeno, sin contribución alguna a la selección de aquellas razones (Martínez y Posadas 1996).

Con este método, al partir de ecuaciones diferenciales de conservación de materia, cantidad de movimiento y energía que puedan resultar aplicables a un problema determinado, así como de las condiciones límite (iniciales y de contorno) que procedan, es poco probable que se omita ninguna variable relevante, cosa que solo sucedería si la expresión de las condiciones límite fuera incorrecta.

Dada la homogeneidad dimensional de todas las ecuaciones de conservación, si en cada una de ellas se dividieran todos sus términos por alguno de los mismos, resultarían tantas relaciones adimensionales que así se obtengan las ecuaciones con las que puedan deducirse de las condiciones límite se habrá completado el análisis dimensional, con la ventaja adicional de apreciarse claramente el significado físico de todas las razones obtenidas.

1.2.3 Números adimensionales que influyen en la transferencia de calor

En gran parte de los procesos que implican la transferencia de calor tanto en líquidos como gases intervienen la convección y la conducción, aunque la conducción es de menor importancia. La convección causa efectos sobre la velocidad en la transferencia de calor, la cual aumenta o disminuye el coeficiente de transferencia de calor (Martínez y Posadas, 1996).

El tipo de fluido, ya sea laminar o turbulento ejerce un efecto significativo en dicho coeficiente denominado coeficiente de película, ya que la mayor parte de la resistencia a la transferencia se encuentra en forma de una película delgada cercana a la pared, de lo que se deduce que mientras más turbulento sea el flujo mayor será el coeficiente.

La mayoría de las correlaciones para predecir los coeficientes de transferencia de calor son semi empíricas y dependen de las propiedades físicas del fluido, su velocidad, de la diferencia de temperaturas y de la geometría del equipo y del alimento. Para establecer las relaciones de los datos de los coeficientes de transferencia se usan números adimensionales de los cuales los más importantes son el número de Reynolds, el número de Nusselt y el número de Prandtl.

Numero de Reynolds

$$Re = \frac{v\rho D}{\mu} \quad \text{Ec. 7}$$

Número de Nusselt

$$Nu = f(Re, Pr) \quad \text{Ec. 8}$$

Número de Prandtl

$$Pr = \frac{C_p \mu}{K_T} \quad \text{Ec. 9}$$

El número de Reynolds relaciona las fuerzas de inercia entre las fuerzas de rozamiento, es decir relaciona el impulso y las fuerzas viscosas de un fluido reflejando un índice de flujo. El número de Nusselt relaciona el flujo convectivo y el conductivo. Estudia los dos mecanismos de transferencia que se presentan simultáneamente en un proceso y contempla las fuerzas de inercia y de resistencia del fluido así como la difusividad de calor de este. El número de Prandtl es la relación del componente cortante de la difusividad de ímpetu μ/ρ , a la difusividad del calor $K_T/\rho C_p$, y correlaciona físicamente al espesor relativo de la capa hidrodinámica con la capa límite térmica (Martínez y Posadas, 1996).

En el caso de un equipo de hidrofludización, el número de Reynolds dentro del tanque limitante está dado por la siguiente ecuación:

$$Re_0 = \frac{\rho Q D_{ori}}{n^\circ \text{ orificios} * A_o \mu} \quad \text{Ec. 10}$$

Y el número de orificios se calcula de la siguiente forma:

$$n^\circ \text{ orificios} = \frac{Q}{A_o * v_0} \quad \text{Ec. 11}$$

La integración de cada uno de estos, para las condiciones límite, proporcionaran los perfiles de velocidad, temperatura y concentraciones en los sistemas que se trate, deduciéndose de estos evidentemente los flujos de cantidad de movimiento y de calor.

Para que exista semejanza entre dos sistemas respecto a cada uno de los fenómenos de transporte involucrados, es indispensable que las ecuaciones diferenciales de conservación que los representan sean idénticos en las condiciones límite, que partir de estas se lleguen a perfiles de velocidad y temperaturas en los puntos geométricos correspondientes de los mismos.

En el proceso de hidrofuidización, el mecanismo predominante de transferencia de calor es la convección forzada, para la cual se usa la siguiente ecuación:

$$Nu' = 0.2671Re_0^{0.433}Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 12}$$

1.2.4 Principio de similitud

Se sabe que todo proceso es complejo, se presentan una diversidad de variables y también pueden participar los tres mecanismos de transporte, como son la transferencia de momentum y energía (Martínez y Posadas, 1996).

El principio de similitud no se basa solamente en la forma y tamaño de los equipos de proceso y composición del producto, sino que se pone en juego todos los mecanismos de transporte antes mencionados, perfiles de fuerza, velocidades, temperaturas, etc. Se expresa como una relación lineal:

$$m' (\text{Prototipo}) = k (\text{cte proporcionalidad}) * m(\text{Maqueta}) \quad \text{Ec. 13}$$

Si las variables involucradas están inmersas en el factor de proporcionalidad en su totalidad, se dice que hay una semejanza total. Si no, se dice que hay una similitud parcial.

La teoría de la similitud puede explicar un sistema sencillo o uno sumamente complejo donde participen las tres propiedades extensivas de transporte; energía, materia y movimiento.

1.2.4.1 Criterios de escalamiento

Los procesos en general se escalan utilizando criterios que se basan en un análisis dimensional o de las ecuaciones diferenciales que explican el fenómeno físico así como las variables que intervienen (Martínez y Posadas, 1996).

Los criterios de similitud se ocupan de las relaciones de sistemas físicos de diferentes tamaños.

Los criterios de semejanza para el escalamiento en ingeniería son:

- *Criterio geométrico*
- *Criterio cinemático y dinámico*
- *Criterio químico*
- *Criterio de las concentraciones*

1.2.4.1.1 Criterio de similitud geométrica.

Dos sistemas son geoméricamente semejantes cuando cada punto de cada uno de ellos tiene un punto correspondiente en el otro, es decir han de tener la misma forma y relación de dimensiones entre los dos sistemas (Martínez y Posadas, 1996).

Para que se cumpla este criterio debe establecerse la relación entre dimensiones físicas o sus correspondientes en el sistema de coordenadas. De esta forma, se obtienen los factores de forma o factores de escala.

Así, dos sistemas geoméricamente similares y con propiedades físicas y químicas iguales se les denominan sistemas homólogos.

1.2.4.1.2 Criterio de similitud cinemática y dinámica

El criterio cinemático tiene aplicación para sólidos o fluidos en movimientos. Como en el criterio geométrico, se implican las tres coordenadas geográficas pero, además, se introduce en este caso la dimensión tiempo. Los tiempos se miden desde un criterio arbitrario para cada sistema y los tiempos correspondientes se definen como a aquellos para los cuales la temperatura es constante (Martínez y Posadas, 1996).

Los sistemas en movimiento con similaridad geométrica están en similaridad cinemática cuando partículas correspondientes trazan trayectorias geométricas correspondientes en intervalos de tiempo también correspondientes. Para propósitos de ingeniería es más conveniente realizar escalamientos usando el criterio cinemático usando el concepto de

correspondencia de velocidades pues a cada partícula corresponde una velocidad determinada en un tiempo determinado.

El criterio dinámico se tiene cuando en el equipo didáctico y el equipo semi piloto existen las mismas relaciones de fuerza. Los regímenes de turbulencia deben ser similares en ambos sistemas (Martínez y Posadas, 1996).

En sistemas que operan con fluidos las principales fuerzas que actúan son: inerciales, gravitacionales, viscosas y de tensión superficial. Esto se ve expresado en las ecuaciones de cantidad de movimiento, correspondiéndole tres ecuaciones escalares, una para cada componente de escala.

El criterio de similitud dinámica explica la igualdad de los dos sistemas con números adimensionales de las fuerzas que intervienen en los mismos.

Si consideramos que la fuerza de convección térmica y de concentración fueran nulas, incluyendo a las de gravedad basta con el número de Reynolds para que el criterio se cumpla íntegramente, pero en este caso, es necesario tomar en cuenta el fenómeno de transferencia de calor por convección forzada.

1.2.4.1.3 Criterio de similitud térmica

El criterio de similitud térmica se ocupa en los sistemas donde ocurre un flujo de calor e introduce otra dimensión, la temperatura. Dos sistemas geoméricamente semejantes son térmicamente semejantes cuando la diferencial de temperaturas correspondientes mantiene una razón constante y si los sistemas están en movimiento son cinéticamente semejantes (Martínez y Posadas, 1996).

El flujo de calor ocurre por convección forzada en la hidrofuidización, aunque también se puede dar por radiación o conducción en otros procesos.

En el tratamiento para comprobar la semejanza térmica, se aplica la ecuación de conservación de energía. Suponiendo la semejanza geométrica entre ambos sistemas y que se cumplan las relaciones a todas las variables en juego, se obtiene la ecuación de

conservación de energía para el equipo semi piloto. Posteriormente se separa e iguala las variables, teniendo en cuenta el significado de los factores de escala, k , para los distintos miembros.

La semejanza térmica implica la igualdad en los dos sistemas de las tres razones adimensionales o de otras independientes que se obtienen a partir de los mismos siendo estos los números de Pr, Nu.

Cuando no hay una reacción química en el proceso, la similitud térmica queda establecida solo a relaciones de dos números adimensionales: Prandtl y Nusselt. También, si la disipación de energía mecánica es despreciable, la similitud térmica se consigue con la igualdad de una de las razones restantes.

1.2.5 Regímenes de control

Como se ha visto en los criterios de escalamiento, en dos sistemas, siempre se trata de llegar a una igualdad de los mismos con una diversidad de razones adimensionales, a través del análisis dimensional, donde en teoría conseguir tal igualdad es posible pero en la práctica el construir una maqueta para el estudio de los procesos físicos o químicos con miras a su posterior desarrollo en prototipo, debe procurarse que la similitud se establezca con la simple igualdad de un número adimensional o con dos como máximo, ya que una relación mayoritaria es imposible por la complejidad de las operaciones (Martínez y Posadas, 1996).

La similitud dinámica es indispensable para el escalamiento del hidrofuidizador a nivel semi piloto, para alcanzarla se procura que los efectos de las fuerzas convectivas, de gravedad y de tensión superficial sean despreciables frente a las fuerzas de viscosidad o de rozamiento, estableciendo así una igualdad de los números de Reynolds en los dos sistemas. El mecanismo de transporte de cantidad de movimiento que implica las fuerzas de viscosidad (número de Reynolds), se denomina mecanismo o régimen controlante.

El mecanismo de transferencia de calor en la hidrofuidización es la convección forzada, donde el régimen controlante es dinámico

1.2.6 Métodos de escalamiento

Dependiendo de las características de proceso, para cumplir entre el hidrofuidizador a nivel semi piloto y el equipo didáctico, se deben conocer las condiciones y los mecanismos de transporte imperantes, y con ellos se establecen los números adimensionales que corresponden a la semejanza entre ambos sistemas (Martínez y Posadas, 1996).

1.2.6.1 Ecuaciones de escala

Para tomar en cuenta una ecuación que nos refiera el mecanismo y régimen controlante es necesario saber que estos sean puros, es decir, que la velocidad del proceso global dependa sólo de un número adimensional, llegando a una expresión solo en función de dos grupos obteniendo las ecuaciones representativas de los criterios similitud que les corresponde. Al seleccionar los criterios de escalamiento aplicables, según sea el caso, se reducen las ecuaciones de escala correspondientes que incluyan a las variables independientes relevantes del fenómeno (Martínez y Posadas, 1996).

1.2.6.2 Método de extrapolación

Este método de extrapolación de datos se recomienda cuando la similitud dinámica, mínima para establecer las similitudes restantes no se alcanza entre dos sistemas de una manera estricta. Se tienen diferentes métodos de extrapolación, de los cuales su característica es la exactitud en la obtención de datos entre uno y otro (Martínez y Posadas, 1996).

a) Cálculo de coeficiente de transporte global medio en una maqueta

Se construye una maqueta geoméricamente semejante al prototipo y se determinan en esta el coeficiente de transmisión de calor global medio $U_m = Q/[A_m(\Delta T)_m]$, con los mismos fluidos y los mismos intervalos de caudales que han de utilizarse en el prototipo. Suponiendo que estos valores también son aplicables al prototipo, se diseña basándose en los mismos (Martínez y Posadas, 1996).

Este método es muy empírico, aunque en ocasiones los resultados han sido buenos, exige elevados factores de seguridad.

b) Estimación de los coeficientes de transporte individuales en una maqueta

Este método supone que la transferencia de calor y de materia se lleva a cabo en una forma exponencial, explicada en la relación de cálculo de los coeficientes individuales medios donde la relación de números adimensionales participantes.

Una de las desventajas es que resulta complicada la experimentación por tener que determinarse por separado los coeficientes de transporte individuales involucrados en el coeficiente global, por lo que deben deducirse dos ecuaciones como la anterior.

c) Extrapolación propiamente dicha

Este método se basa, previa construcción de la maqueta y de un programa experimental más reducido que el método anterior y consiste en llevar la experimentación sin tomar en cuenta la similitud dinámica, ni térmica u otra que preocupe en la influencia entre los dos sistemas y para extrapolar los resultados al equipo didáctico se utiliza la ecuación que resulta de dividir la ecuación mencionada en el método anterior hecha para el equipo a nivel semi piloto, por la misma que es para el equipo didáctico. Lo que la hace más sencilla para sistemas homólogos, desapareciendo aquellas relaciones físicas dando lugar solamente a las dimensiones lineales y velocidades relacionadas a las ecuaciones de escala.

En el hidrofuidizador se trata de encontrar el valor del coeficiente convectivo (h) y usando los valores que se encuentran en la bibliografía para diferentes geometrías lo más semejantes posibles y con esto determinar el valor de h para el prototipo. Los valores obtenidos con este método son confiables por la reducida variación en los exponentes y su valor casi siempre es inferior a la unidad (Martínez y Posadas, 1996).

d) Similitud estricta

La extrapolación propiamente dicha por este método es exactamente lo mismo que una semejanza total. Si las razones adimensionales fueran iguales en el equipo didáctico y el equipo a nivel semi piloto, entonces se tiene una similitud estricta. Con lo que el equipo

hidrofluidizador didáctico y el equipo a nivel semi piloto serían estrictamente semejantes. Este método es el más exacto, pero es prácticamente imposible alcanzar la semejanza por lo que se recomienda utilizar los métodos anteriores.

1.3 Diseño de Equipos

El diseño de equipo puede definirse de muchas formas debido a que cada persona crea su definición en base a su experiencia y conocimientos. Varios diseñadores, ingenieros e investigadores han dado sus puntos de vista de lo que es el diseño (López, 1990).

Feilden: Diseño en ingeniería es el uso de principios científicos, información técnica e imaginación en la definición de una estructura mecánica, máquina o sistema para realizar funciones específicas con el máximo de economía y eficiencia.

Finkelstein: Diseño es el proceso creativo que inicia con una necesidad y define una invención o sistema y los métodos para su realización e implementación, para así satisfacer la necesidad. Es una actividad humana primaria y es central en la ingeniería y las artes aplicadas.

Luckman: Diseño es el primer paso del hombre para controlar su entorno. El proceso de diseño es la traducción de la información en forma de necesidades, restricciones y experiencia en posibles soluciones las cuales son consideradas por el diseñador para conseguir las características de rendimiento requeridas. Algo de creatividad u originalidad debe entrar en el proceso para que sea llamado diseño.

Es el proceso de establecer los requerimientos basados en necesidades humanas, transformándolas en especificaciones de desempeño y funciones las cuales son convertidas (sujeta a restricciones) en soluciones del diseño (usando la creatividad, principios científicos y conocimientos técnicos) que pueden ser económicamente manufacturados (Palomo, 2013).

1.3.1 Teoría y modelos de diseño

ASME (American Society of Mechanical Engineers): Define el campo de la teoría del diseño y la metodología como una disciplina de la ingeniería que concierne al estudio de procesos de entendimiento y organización para crear, reestructurar y optimizar artefactos y sistemas. La teoría del diseño explica que es el diseño lo que se debe hacer cuando se diseña. La metodología del diseño es la colección de procedimientos, herramientas y técnicas que los diseñadores usan durante el proceso de diseño. La teoría de diseño explica y define que es diseño y que es lo que se hace cuando se diseña. El modelo del diseño es la serie de pasos a seguir y las herramientas a utilizar propuestos por un investigador. Se puede decir que un modelo de diseño es una metodología base y general para usarse durante el diseño.

Existen tres escuelas que dan su punto de vista de lo que es y cómo debe hacerse, la primera de ellas es la escuela semántica, esta escuela cree que el proceso de diseño debe ser caótico y creativo, la segunda es la escuela de la sintaxis la cual dice que el proceso de diseño debe ser organizado y disciplinado y la tercera escuela es llamada la de la experiencia pasada y opina que no se debe imponer al diseñador un proceso específico (Palomo, 2013).

1.3.2 Metodología del diseño

El diseñador empieza con un objetivo específico y mediante el desarrollo y evaluación de diseños posibles, consigue la mejor manera de alcanzar el objetivo. El diseñador se verá limitado. Algunas limitaciones serán fijas e invariables como las que surgen de leyes físicas, leyes gubernamentales y estándares. Otras podrán ser manipuladas por el diseñador. Las limitaciones que están fuera de la influencia del diseñador se denominan externas. Algunas de las limitaciones internas, de las cuales se tiene algún tipo de control son; la elección del proceso, elección de condiciones de proceso, de los materiales y del equipo. Las consideraciones económicas son la principal limitación en cualquier diseño de

ingeniería. Otra limitación importante es el tiempo que se tiene para completar el diseño. En general, la metodología del diseño de equipo comprende los siguientes pasos:

1) Identificando una necesidad.

Surgen de la insatisfacción de los clientes y de los productos que las empresas, institutos gubernamentales, estancias comerciales, etc., producen. Estos requerimientos o necesidades del cliente deben ser descritos de manera clara y precisa y serán la base del producto a diseñar. Se debe sintetizar lo que el cliente quiere y ponerlo en frases que sean identificadas como requerimientos o requisitos como (Palomo, 2013):

- Decir lo que el producto debe hacer y no como debe hacerlo.
- Ser tan específico o detallado como la información proporcionada por los clientes.
- Ser formuladas en forma positiva y no negativa.
- Expresar en términos de atributos del producto.

2) Definición del problema

El problema es la parte funcional de todo el proceso a desarrollar.

Es necesario tener varias soluciones a un problema para que sean llevadas a una mesa de discusión, en la que se realizará la valoración factible de criterios de cada uno de los diseñadores y así se tomará la solución más correcta (Palomo, 2013).

Las preguntas clave son:

- ¿Qué? Son los contenidos de las acciones, las variables que relacionan todas las fases y sistemas.
- ¿Cuándo? Es la secuencia de las acciones que se observará en cada una de las fases de degradación del modelo a desarrollar.
- ¿Cómo? Son los procedimientos especificados, es decir, las técnicas y la creación de los modelos: teóricos, estructurales, formales, funcionales e informáticos. Son fundamentales antes de empezar el proceso de diseño.

3) Requerimientos del cliente o especificaciones

Otra de las etapas necesarias y requeridas se basa en la demanda de los clientes. Para realizar el diseño en función de una necesidad que tenga técnicamente más prioridad para él.

Paso indispensable para diseñar es, el estudiar las variantes que nos permitan manifestar las ideas conceptuales, de manera que el cliente nos muestre lo que requiere y necesita basándose en los errores obtenidos, los cuales nos darán la pauta para el manejo de ideas elocuentes a enfocar, para desarrollar propuestas adecuadas (Palomo, 2013).

De modo que se solicita al cliente, las cualidades que deben tener los equipos o productos, como: costo del producto, transporte, mantenimiento, materiales, apariencia, acabado, pruebas e inspección, tamaño, peso, etc. El hacer la lista de especificaciones permite saber si estamos cumpliendo con dichas demandas (Palomo, 2013).

4) Diseño conceptual

También es llamado diseño funcional, el cual proporciona bosquejos hipotéticos sobre lo que se va a diseñar, tomando en cuenta el funcionamiento, componentes principales, materiales, procesos generales y características del producto a un grado en el cual se puedan estimar costos, y la factibilidad de llevarlo a producción y comercialización exitosa, de la misma manera se toma como parte importante la revisión en conjunto con el cliente estas variantes y nos basaremos en las ideas que el cliente aporte, lo que será plasmado en papel de manera que se puedan aportar gradualmente mayores conceptos importantes, de cómo debe quedar el diseño (Palomo, 2013).

5) Buscar información

La búsqueda de información debe ser constante a lo largo del proceso de diseño, nos permite encontrar soluciones a los problemas o partes de los mismos.

6) Generar alternativas de solución

Una opción más es la creatividad para la solución, está abierta a todas las discusiones para la elaboración del equipo, se tiene que tomar en cuenta no solo a una persona, si es posible

a un grupo de especialistas en el área, nos permitirá la generación de nuevas alternativas, que podrían ser organizadas de la siguiente manera (Palomo, 2013):

- Inicialmente considera todas las soluciones como relevantes y con posibilidad de éxito.
- Generar muchas opciones de solución
- Reducir las ideas a esquemas o diagramas simples
- Analizar la posibilidad de combinar soluciones para generar nuevas alternativas.

7) Selección de la solución.

En la solución adecuada existen varios aspectos a considerar:

- La selección se hace por estudio
- El equipo de trabajo hace una votación
- Se listan los pros y los contras de cada solución y se toma una decisión consensada.
- Se realizan experimentos o pruebas para evaluar las alternativas de solución respecto a las especificaciones del producto.
- Empleo de las matrices de decisión.

8) Diseño detallado

Este nos permitirá trazar numéricamente los pasos por medio de programas computacionales, para la manipulación de objetos, para esto se tienen que verificar las dimensiones que nos den la máxima precisión posible en el diseño. Se identifican los componentes disponibles en el mercado. Se seleccionan o especifican para que los proveedores puedan surtirlos. También se toman en cuenta los aspectos de su producción (Palomo, 2013):

- Que el producto pueda ser manufacturado o producido por procesos disponibles.
- Definir al producto y a sus componentes para lograr la calidad requerida a un costo competitivo

- Detallar el producto y sus componentes de tal forma que requieran de un mínimo de operaciones de producción o manufactura
- Que todos los aspectos relacionados con los costos de producción sean incluidos y cuantificados.
- Que el producto pueda ser realizado y entregado en el tiempo determinado por el cliente
- Que se puedan fabricar las cantidades requeridas.
- Que exista uno o varios proveedores que puedan surtir los componentes comerciales del producto en el tiempo, costo y volumen requeridos.

Hay otras variantes a tomar en cuenta, como identificar los componentes que pueden ser estandarizados al interior de la organización, cumplir con la normatividad y asegurarse de que las satisfagan, algunos aspectos como el ciclo de vida, almacenaje, transporte, distribución, exhibición, instalación, servicio, mantenimiento, desechos, reciclaje, etc., (Palomo, 2013). Para terminar con este proceso del detalle, debemos preparar mediante etapas la documentación necesaria para la producción.

- Proceso de manufactura
- Proceso de ensamble
- Dibujo de fabricación (planos de partes)
- Diagrama de ensamble
- Dibujos de ensamble
- Lista de componentes y de materiales
- Procedimiento de inspección
- Pruebas de aceptación de calidad
- Especificación del producto material

Los pasos siguientes luego del proceso detallado son: manufactura, prueba y calidad, y finalmente comercialización. Sin embargo, debido a que el objetivo del presente trabajo es solo llegar al diseño detallado de un hidrofuidizador didáctico, los pasos antes mencionados no serán considerados.

1.4 Selección de componentes para el hidrofuidizador.

La selección óptima suele ser una solución económica basada en la experiencia y en las especificaciones de los códigos. El uso de materiales no ferrosos o no metálicos, así como de aleaciones de acero, ha llegado a ser una norma para ciertos servicios específicos. Para la selección de materiales de tanques y tuberías se debe considerar lo siguiente (Giral *et al.*, 1979):

- Naturaleza química del material que se va a manejar
- Naturaleza física del material a manejar.
- Cantidad de material a mover por unidad de tiempo
- Distancia del movimiento
- Naturaleza de alimentación al equipo o tanque de manejo
- Naturaleza de descarga
- Naturaleza del flujo, continuo o intermitente.

En la selección de materiales para tuberías se tienen que considerar los costos de fabricación. Un material barato podrá requerir un alto costo de instalación y de unión, así como de mantenimiento. El uso de aleaciones caras en tuberías que durarán más que el periodo de vida útil del proceso no se justifica al menos que la calidad del producto peligre debido a contaminaciones al corroerse la tubería (Giral *et al.*, 1979).

a) *Acero Inoxidable*

El acero inoxidable es esencialmente un acero de bajo carbono, el cual contiene un mínimo de 10% de cromo en peso. El acero inoxidable 304 es comúnmente llamado el acero inoxidable todo terreno, tiene las propiedades adecuadas para gran cantidad de aplicaciones. Da un servicio satisfactorio a altas temperaturas (800-900 °C). Contiene bajo carbono que evita la precipitación de carburos durante periodos largos de alta temperatura. Es el más utilizado en la industria alimenticia, ya que proporciona una fácil sanitización, no interacciona con el alimento, soporta bajas y altas temperaturas, es resistente, durable y tiene una gran conductividad térmica (17.2 W/m°C). Es usado en la construcción de

tanques, intercambiadores de calor, tuberías, etc. Tiene un costo elevado y podría tener problemas de corrosión si no se da el mantenimiento adecuado, es pesado en relación a otros materiales y de difícil transporte si no se tienen los medios adecuados (Davis, 1994).

b) Policloruro de vinilo (PVC)

El PVC es una combinación de carbono, hidrogeno y cloro, es un polímero amorfo cuyas propiedades están en enorme dependencia de la formulación de cada material en concreto. Su resistencia química es buena, pero sensible a ciertos disolventes (hidrocarburos aromáticos y clorados, esterres y cetonas) y presenta un comportamiento muy satisfactorio a los agentes atmosféricos. Su conductividad térmica es baja ($0.1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$). Es de bajo costo y en la industria usualmente no es usado en instalaciones que tengan contacto directo con los alimentos, pero si en instalaciones de servicio, principalmente en tuberías, codos y válvulas. Es inocuo, inerte y muy fácil de transportar ya que es ligero. Tiene resistencia al choque térmico, resistencia a variaciones de temperatura y resistencia a la humedad, agentes biológicos y químicos. Prácticamente permanece inalterable frente a la acción de ambientes agresivos presentes en zonas urbanas, industriales o salinas. No es necesario ningún elemento para su conservación y solo con agua jabonosa se puede limpiar adecuadamente. Es difícilmente flamable, por lo que es seguro. (Miravete y Cuartero, 2007).

c) Acrílico

Los polímeros acrílicos, denominados polimetilmetacrilatos o PMMA, son resinas amorfas de ingeniería termoplástica conocidas por sus altas propiedades ópticas, excelente resistencia a la exposición a la intemperie, alta resistencia a las rayas, alta estabilidad dimensional y facilidad de procesamiento. Es un material ligero, de bajo costo, fácil de manejar, de limpiar, tiene una baja conductividad térmica. Es resistente a la mayoría de las sustancias, incluyendo soluciones de álcalis y ácidos e hidrocarburos alifáticos. Es inerte e inocuo (Acrylite Polymers, 2010).

1.4.1 Tanques

En el equipo hidrofluidizador, se requiere de tres tanques: el tanque de alimentación, donde se almacena el fluido refrigerante. El tanque limitante, donde se lleva a cabo el preenfriamiento y el tanque anular, el cual recibe el fluido refrigerante que se desborda del tanque limitante y de ahí regresa al tanque de alimentación para ser recirculado.

El almacenamiento de líquidos se lleva a cabo en tanques; se clasifican en esféricos y cilíndricos, horizontales y verticales. Los tanques verticales se usan en su mayoría para almacenamiento a la intemperie. Se utilizan para mantener la presión de agua uniforme y asegurar un suministro normal. Los tanques horizontales se encuentran en su mayoría dentro de los edificios (Giral *et al.*, 1979).

Existen diversas ecuaciones para el diseño de tanques, en base al volumen que han de almacenar y el tipo de tapa o base que han de tener.

Tabla 1. Ecuaciones empleadas en el diseño de tanques (López, 1990).

Tapa	VD	H
Plana	$VD = 1.33 * Va$	$H = 2.325 * VD^{\frac{1}{3}}$
Elíptica	$VD = 1.4183 * Va$	$H = 2.0081 * VD^{\frac{1}{3}}$
Toriesférica	$VD = 1.37415 * Va$	$H = 2.169325 * VD^{\frac{1}{3}}$
Hemisférica	$VD = 1.46245 * Va$	$H = 1.6212 * VD^{\frac{1}{3}}$

Nota: $D = 0.74 * VD^{\frac{1}{3}}$, dónde D es el diámetro del tanque, Va es el volumen de almacenamiento, VD el volumen de diseño y H es la altura del tanque.

El volumen de diseño del tanque puede determinarse en base la cantidad de refrigerante necesario para la hidrofluidización mediante la siguiente ecuación:

$$\frac{\text{Volumen fluido refrigerante}}{\text{Volumen del alimento}} > 70 \quad \text{Ec. 14}$$

También lo criterios de diseño de biorreactores son útiles, como por ejemplo, el criterio utilizado para saber la distancia entre el agitador de un tanque y el fondo del mismo:

$$\frac{D}{Z} = 1.0 - 1.5 \quad \text{Ec. 15}$$

La letra Z representa la distancia entre la turbina de disco y el fondo del tanque y la letra D representa el diámetro de la turbina.

1.4.2 Selección de diámetro y longitud de tubería

El termino tubería se utiliza generalmente para cualquier clase de conducto cerrado que se use para el transporte de fluidos. En las industrias las tuberías suministran los fluidos esenciales para que los equipos operen. El costo de la tubería puede llegar a representar del 50 al 70% del costo total del equipo (Giral *et al.*, 1979).

Algunos de los problemas que pueden encontrarse al seleccionar una tubería son:

- Selección del material adecuado de acuerdo con la experiencia y las normas establecidas.
- Selección del tamaño más económico de la tubería para manejar cierto fluido.
- Distribución de las tuberías de forma que tengan un fácil acceso, drenaje adecuado y un mínimo de tensión y de fatiga.
- Selección de las válvulas mejores para condiciones específicas de servicio
- Selección de medios adecuados para unir los tubos y sellar las juntas.
- Selección de tirantes, amarras, cubiertas y otros soportes que cumplan los requisitos de vida útil e instalación adecuada.
- Especificación de un aislamiento económico donde sea necesario.
- Determinación de los colores convenientes en el exterior de la tubería para su identificación
- Preparación de estimaciones detalladas y exactas del costo de los sistemas de tuberías.

La demanda actual de una economía creciente y altamente competitiva ha conducido a procesos y condiciones complejos que suponen nuevos problemas en el diseño de tuberías. Presiones más elevadas necesitan tuberías de paredes más gruesas o materiales más resistentes. La ampliación del régimen de temperaturas introduce problemas de

deslizamientos elevadas temperaturas y de fragilidad a temperaturas muy bajas. Otras complejidades del diseño son las debidas a condiciones más severas de corrosión a la necesidad económica de utilizar plenamente la resistencia del material y a la instalación adecuada de la tubería para evitar fatigas en el sistema (Giral *et al.*, 1979). Al seleccionar el diámetro interno de la tubería, se debe tomar en cuenta los costos de tuberías y de bombeo. Se puede seleccionar el diámetro de la tubería mediante tres criterios:

- Diámetro económico
- Velocidad recomendada
- Caída de presión permisible

Existen tablas donde mediante velocidad recomendada se puede seleccionar el diámetro de la tubería.

Las condiciones que conducen a un diámetro económico de tubería no son siempre realistas, basadas en factores de experiencia en la planta. Los cambios futuros de la demanda, la corrosión y el ensuciamiento y la ausencia de costos de bombeo en las líneas alimentadas por gravedad son factores basados en la experiencia práctica (Giral *et al.*, 1979).

Una vez seleccionado el diámetro de la tubería, se puede calcular la velocidad del flujo en el sistema con la siguiente ecuación:

$$Q = vA \quad \text{Ec. 16}$$

1.4.3 Selección de válvulas

Hay muchos criterios para seleccionar válvulas, uno de los más importantes es de acuerdo a su función. El tipo de válvula dependerá de la función que debe efectuar. Esta función se determina después de un estudio cuidadoso de las necesidades de la unidad y del sistema para los cuales se destina la válvula.

- Aislamiento. Cuando se desea interrumpir el flujo en forma total
- Retención. Cuando se requiere impedir que el flujo no retroceda hacia una zona presurizada cuando esta decrece o desaparece.
- Regulación. Cuando se necesita modificar el flujo en cuanto a cantidad, desviarlo, mezclarlo o accionarlo de forma automática.
- Seguridad. Necesarias para proteger equipos y personal contra la base de presión

Dado que hay varios tipos de válvulas para cada función, es necesario determinar las condiciones del servicio en que se emplearan las válvulas. Se debe tomar en cuenta si el fluido es un líquido, un gas, una mezcla liquido-gas, liquido-solidos o gas-solidos, vapor, con corrosión o sin corrosión (Rodríguez, 2011).

Otro factor importante a considerar son los materiales de construcción en función de la compatibilidad química y de resistencia a la corrosión y erosión de los fluidos, debemos de escoger los materiales constructivos de las diversas partes de la válvula: cuerpo retenedor de presión, partes blandas y empaques, tornillería de unión y recubrimientos exteriores. Sobre el cuerpo observaremos que el material disponible sea compatible con el fluido, además de considerar otros factores como la velocidad en línea o naturaleza del fluido. para determinar empaques o sellados externos será determinante la temperatura y la compatibilidad del material de sellado con el fluido.

Otro punto a considerar es el accionamiento de la válvula, el cual puede ser manual, auto accionadas por el propio flujo y las accionadas por actuadores externos. El tipo de accionamiento está condicionada por las necesidades de la planta; accesibilidad a la válvula, frecuencia de operación, disponibilidad de energía auxiliar, economía y grado de exactitud requerido en la operación.

a) Válvulas mariposa

Son uno de los tipos más antiguos que se conocen, son sencillas, ligeras y de bajo costo. El costo de mantenimiento es bajo porque tienen un mínimo de piezas móviles. Su uso principal es para servicio de corte y estrangulación cuando se manejan grandes volúmenes de líquidos a presiones relativamente bajas. Su diseño abierto de flujo rectilíneo evita la acumulación de sólidos y produce baja caída de presión. Son fáciles de operar con una

manija, es posible moverla desde la apertura total al cierre total con rapidez. La regulación de flujo se efectúa con un disco de válvula que sella contra un asiento. Sus elementos estructurales son el eje, el disco de control de flujo y el cuerpo. Pueden estar construidas de hierro, acero al carbón, acero inoxidable, PVC u otros plásticos (Rodríguez, 2011).

b) Válvulas check o de retención tipo bisagra

Estas son válvulas integrales y se destinan a impedir la inversión del flujo en una tubería. La presión del fluido circulante abre la válvula; el peso del mecanismo de retención y cualquier inversión en el flujo se cierran. Son usadas en conexión o en conjunto con válvulas de compuerta y son consideradas como un equipo de prevención. Su objetivo es proteger bombas o equipos similares permitiendo el paso de un fluido por una línea solamente en un sentido, impidiendo el regreso del fluido cuando se presentan contra presiones. Es decir, cuando las bombas son cerradas por mantenimiento o simplemente la gravedad hace que los fluidos regresen, esta válvula se cierra instantáneamente. Este tipo de válvulas se recomiendan cuando hay cambios pocas frecuentes en el sentido de circulación del flujo, ofrecen una caída de presión menor, debido a que la turbulencia dentro de la válvula es muy baja (Rodríguez, 2011).

1.4.4 Bomba

Este elemento será el encargado de transportar el fluido refrigerante a través de la red de tuberías, desde el tanque de alimentación hasta el tanque limitante, donde el fluido refrigerante llegara con cierta presión e hidrofuidizar el producto. El transporte mediante bombas cubre distancias que pueden ser largas y cortas, horizontales y verticales bajo presiones que varían desde valores inferiores al de la presión atmosférica hasta presiones muy elevadas. Las bombas se usan también para producir presiones altas o bajas en el equipo. En el caso del equipo hidrofuidización se provocan presiones altas gracias a la bomba (Giral *et al.*, 1979). Algunos tipos de bombas se mencionan a continuación, en nuestro diseño se trabajara con agua, en caso de tener necesidad de cambiar el tipo de fluido refrigerante se tendrá que tener en cuenta la siguiente información.

a) Bombas alternativas.

Las bombas alternativas son la forma más antigua de bombas. El transporte del fluido se efectúa mediante el desplazamiento provocado por un pistón. Se usan para capacidades pequeñas y grandes presiones de trabajo.

Manejan fluidos de viscosidad mayor a las centrifugas. Su capacidad depende del desplazamiento del pistón y de la velocidad a la cual se opera (Giral *et al.*, 1979).

b) Bombas rotatorias de engranes.

Esta bomba emplea dos engranes dentro de una cubierta ajustada a ellos. El líquido es atrapado por los dientes de los engranes y llevado desde la entrada hasta la descarga. Maneja cualquier fluido como melazas, salmuera, agua, grasa ligera y pesada, aceite y lodos ácidos. Están diseñadas para el bombeo de fluidos más viscosos que el agua (Giral *et al.*, 1979).

c) Bombas centrifugas.

Las bombas centrifugas son útiles en el transporte de fluidos newtonianos de baja viscosidad. Su flujo está libre de pulsaciones y tiene numerosas ventajas. Las bombas centrifugas son compactas, solida construcción, seguras y de fácil manejo. Pueden operarse manualmente o de forma automática.

Operan contra una descarga cerrada sin que la presión se eleve a niveles peligrosos y manejan una mayor cantidad de materia. No tiene válvulas que ajustar, ni partes en movimiento alternativo que deban mantenerse en constante movimiento para que no se corroan y sus límites de tolerancia son mayores. Su instalación es más económica y son de fácil mantenimiento (Giral *et al.*, 1979).

1.4.5 Información necesaria para la selección de la bomba.

- Capacidad y presión hidrostática
 - Valor máximo para cada una
 - Valor permisible o márgenes deseables para cada una
 - Posibles cambios futuros de los requerimientos
- Características deseables de operación
 - Presión hidrostática y capacidad constantes
 - Capacidad variable y presión casi constante
 - Presión variable con alguna variación en la capacidad
 - Capacidad constante contra presiones variables
- Naturaleza del líquido.
- Naturaleza y tamaño de los sólidos en suspensión
- Datos sobre corrosión. Materiales de construcción adecuados.
- Márgenes de temperatura de operación.
- Márgenes para la viscosidad
- Tipo de energía o de fuerza motriz asequible o permisible. Debe considerarse el balance de vapor de la planta.
- Factor de carga.

Además de que se requiere resolver el balance de energía (García, 2006):

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{z_1 g}{gc} + \frac{v_1^2}{2gc} = W = \frac{P_2}{\rho} + \frac{z_2 g}{gc} + \frac{v_2^2}{2gc} + \Sigma F \quad \text{Ec. 17}$$

Dónde:

$$\frac{P_1}{\rho} \neq \frac{P_2}{\rho} = \frac{\Delta P}{\rho} : \text{Cabezal de presión o pérdida de energía por presión.}$$

Este cabezal representa la influencia que tiene el medio sobre el líquido en los tanques. En tanques abiertos, la presión atmosférica no tiene efecto significativo en el trabajo de la bomba. En sistemas cerrados, donde cada recipiente tiene una presión distinta, la pérdida de energía por presión si es significativo.

$$\frac{v_1^2}{2gc} \neq \frac{v_2^2}{2gc} = \frac{\Delta v^2}{2gc} : \text{Cabezal de velocidad.}$$

Representa el efecto que tiene la velocidad del fluido en movimiento en el trabajo realizado por la bomba. Este termino de calcula cuando se tiene un cambio en el diámetro de tubería, un cambio de temperatura o un cambio en la reología del fluido.

$$\frac{z_1g}{gc} \neq \frac{z_2g}{gc} = \frac{\Delta zg}{gc} : \text{Cabezal estático.}$$

Nos representa la cantidad de energía que proporciona la altura del fluido por arriba de nuestro plano de referencia. Solo depende de la posición del fluido dentro del sistema sin importar la forma del tanque.

ΣF : Cabezal de fricción o sumatorias de pérdidas de energía por fricción.

Representa a cantidad total de energía que pierde un fluido en movimiento debido al rozamiento de sus capas con las paredes de tuberías y accesorios.

W : Cabezal total o trabajo realizado por la bomba.

Por lo tanto, la ecuación 17, queda de la siguiente forma:

$$W = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta zg}{gc} + \frac{\Delta v^2}{2gc} + \Sigma F \quad \text{Ec. 17.1}$$

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN APLICADA AL DISEÑO

2.1 Problema

El preenfriamiento previo al almacenamiento de productos hortícolas, que permite mantener la calidad y conservación del producto, elimina el calor de campo y reduce la carga de refrigeración en el almacén. Llevar a cabo este proceso mediante los métodos convencionales tiene sus inconvenientes, los productos pueden sufrir deshidratación por evaporación o sufrir quemaduras en la superficie. Además, la mayoría de los productos hortofrutícolas no tienen una forma regular, no se tiene un contacto 100% entre el alimento y el fluido refrigerante, por lo que no se logra un enfriamiento uniforme en todos los puntos del alimento y el proceso requiere de mayor tiempo. Las tendencias actuales en cuanto al enfriamiento de alimentos hablan de un método emergente llamado hidrofuidización. Durante el proceso de hidrofuidización se generan corrientes de agitación, con las cuales se logra un contacto directo al 100% entre el alimento y el fluido, las cuales, incrementan la transferencia de calor en los productos, y se reduce el calor sensible reduciendo la alteración de la calidad en los mismos. El equipo usado para llevar a cabo la hidrofuidización es el hidrofuidizador. Actualmente, para poder realizar estudios sobre el preenfriamiento por hidrofuidización, en el Taller de Procesos y Sistemas Frigoríficos no se cuenta con un equipo de dimensiones adecuadas, por lo tanto, se requiere del diseño de un hidrofuidizador didáctico, el cual se necesita que sea de tamaño compacto y de fácil operación.

2.2 Objetivos

Objetivo General

Diseñar un hidrofuidizador didáctico aplicando criterios de escalamiento geométrico, cinemático y dinámico para estudios de comportamiento térmico del proceso de preenfriamiento en productos hortofrutícolas.

Objetivos Particulares

1. Caracterizar geoméricamente un equipo a nivel semipiloto adaptado como hidrofuidizador de productos hortofrutícolas, obteniendo los datos físicos necesarios para el escalamiento geométrico del equipo didáctico.
2. Desarrollar un escalamiento cinemático y dinámico mediante la relación de las variables del número de Reynolds y patrones de flujo para el establecimiento de las características finales del hidrofuidizador didáctico.
3. Determinar los valores teóricos límites de los parámetros térmicos (número de Nusselt y coeficiente convectivo) relacionando los datos bibliográficos y experimentales reportados en estudios previos y los obtenidos en la caracterización y el escalamiento, para su comparación con datos reportados en otros estudios.
4. Proponer el diseño, características geométricas, cinemáticas y dinámicas del hidrofuidizador didáctico, definiendo la versatilidad del diseño para el análisis térmico del proceso de preenfriamiento en productos hortofrutícolas.

2.3 Selección del producto a trabajar

En trabajos anteriores, se realizaron experimentos con diversos materiales: papa cambray, uva y pera, todos cortados en forma esférica. Para seleccionar el producto en el cual se basarán los cálculos para el escalamiento y diseño del hidrofuidizador didáctico, se calculó la densidad de los alimentos antes mencionados y se seleccionó el más denso, ya que este opondrá mayor resistencia a moverse por acción de los chorros de choque.

2.4 Parámetros que se quieren estudiar en el equipo

En el equipo hidrofuidizador diseñado se requiere estudiar los parámetros básicos de transferencia de calor como el número de Nusselt, el número de Fourier, el coeficiente convectivo, el coeficiente de enfriamiento. Así como los parámetros de transporte de fluidos como el número de Reynolds, coeficiente de rozamiento, coeficiente de choque, velocidad mínima de fluidización.

2.5 Caracterización geométrica del equipo hidrofuidizador a nivel semi piloto.

Para el escalamiento utilizando la similitud geométrica se realizó la caracterización dimensional del equipo hidrofuidizador para la cual se usaron instrumentos de medición tales como, vernier y flexómetro. Se tomaron las medidas correspondientes a la altura de los tanques, sus diámetros, longitud de tubería, diámetro de la misma, y características de la bomba. Además de la revisión de la configuración de los componentes del equipo.

2.6 Escalamiento geométrico del hidrofuidizador

a) Tanque limitante

Partiendo de la cantidad máxima de producto que se quiere manejar en el hidrofuidizador dentro del Taller de Procesos y Sistemas Frigoríficos, se determinó el volumen de fluido refrigerante necesario para preenfriar dicho alimento, despejando de la ecuación 14 el volumen del fluido refrigerante:

$$\text{Volumen del fluido refrigerante} = 70 * \text{Volumen del alimento}$$

Se consideró que el volumen obtenido sería el 80% de la capacidad del tanque limitante, por lo que mediante una regla de tres se calculó el volumen al 100%. En base a este volumen se calcularon las dimensiones del tanque limitante, utilizando las ecuaciones para diseño de tanque de base y tapa plana presentadas en la tabla 1:

$$VD = 1.33 * Va$$

$$D_{TL} = 0.74 * VD^{\frac{1}{3}}$$

$$H_{TL} = 2.325 * VD^{\frac{1}{3}}$$

Donde VD es el volumen de diseño, Va es el volumen de almacenamiento, H_{TL} es la altura y D_{TL} es el diámetro del tanque limitante.

Posteriormente se realizó la reducción de las dimensiones resultantes en función del espacio disponible dentro del taller para el equipo didáctico. Por lo tanto, el volumen del tanque limitante disminuirá en la misma proporción.

b) Tanque anular

Se tomaron datos de los hidrofuidizadores construidos por Peralta (2009) y Verboven (2003). Se calcularon relaciones donde se involucraron los diámetros del tanque anular y el tanque limitante, y otra relación que involucraba sus alturas.

Se utilizó la relación de Peralta, de la figura 7 (B) para determinar el diámetro del tanque anular, ya que permitiría un espacio mayor entre ambos tanques, y se reduciría la caída de presión a la entrada del tanque limitante. La ecuación 3 fue modificada de la siguiente forma para calcular el diámetro del tanque anular:

$$\frac{D_{TL}}{0.625} = D_{TA}$$

En primer lugar, se calculó la distancia entre el tanque anular y limitante en la parte inferior. Se usó el criterio de diseño de un tanque de fermentación (Ward, 1991), representada con la ecuación 15 y cuya modificación se muestra a continuación.

$$\frac{D}{Z} = \frac{D_{TL}}{Z} = 1.0 - 1.5$$

Se usará como diámetro de la turbina de disco (D) el diámetro del plato, ya que en el plato y en la turbina de disco se genera la turbulencia y mayor caída de presión en sus respectivos tanques.

Para el cálculo de la altura total del tanque anular (H_{TA}) se utilizó la relación calculada usando los datos obtenidos del hidrofuidizador existente (Peralta, *et al.*, 2009), de la ecuación 4 se despejó la altura del tanque anular:

$$\frac{H_{TL}}{0.675} = H_{TA}$$

c) Tanque de alimentación

Utilizando la relación entre el tanque de proceso y el tanque de alimentación (V_{al}), se obtuvo la ecuación 5, de la cual se hizo un despeje para obtener el volumen del tanque de alimentación.

$$V_{al} = 1.2 * V_{TL}$$

Posteriormente se calculó el diámetro del tanque y la altura usando las mismas ecuaciones utilizadas para el diseño del tanque limitante.

d) Selección del diámetro de tubería

Se usó el criterio de velocidad recomendada porque el fluido que queremos transportar es agua. Hay 3 clasificaciones; agua para calderas, agua potable y agua para servicios generales. En este caso, se seleccionó de servicios generales, ya que el agua es el refrigerante en el sistema de hidrofuidización.

Servicios generales (CRANE, 1987): 1.2 a 3 m/s (3.94 a 9.84 ft/s)

Con el valor del diámetro de tubería y la velocidad que maneja dicho diámetro se calculó la velocidad de flujo de la entrada del tanque limitante, utilizando la ecuación 16 modificada:

$$Q_{ent} = vA \rightarrow v = Q_{ent}/A$$

e) Cono a la entrada del tanque limitante

Para el cálculo de la altura del cono se consideró un ángulo de 40° , el mismo del hidrofuidizador a nivel semi piloto, y se usó la ecuación 6, con los valores de diámetro del tanque limitante y diámetro de tubería (Gerling, 2000).

f) *Longitud de la tubería*

Se determinó mediante criterios heurísticos, los cuales indican que la longitud de tubería entre el tanque y la bomba debe ser mínimo el valor del diámetro del tanque. La altura de la tubería no debe estar a menos de 0.20 m sobre el suelo.

g) *Selección de bomba*

Para seleccionar la bomba, primero se realizó el balance de energía mecánica, representada por la ecuación 17.1. Como en el sistema no hay cambios en el comportamiento reológico del fluido, ni cambios en el diámetro de la tubería o variaciones de temperatura el término de cabezal de velocidad es igual a 0, por lo que el balance queda de la siguiente forma:

$$W = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta z g}{g_c} + \Sigma F \quad \text{Ec. 17.2}$$

La sumatoria de las pérdidas de energía por fricción en tuberías y accesorios se realizó con la siguiente ecuación (Steffe and Daubert, 2006):

$$\Sigma F = H_{fs} \text{ Tuberías} + H_{fs} \text{ Accesorios} \quad \text{Ec. 18}$$

De la cual, las pérdidas por fricción (H_{fs}) en tuberías se calcularon:

$$H_{fs} \text{ Tuberías} = \frac{4fLv^2}{2D_{int}} = \frac{2fLv^2}{D_{int}} \quad \text{Ec. 18.1}$$

Y las pérdidas por fricción en los accesorios se calcularon con la siguiente ecuación:

$$H_{fs} \text{ Accesorios} = \frac{k_f v^2}{2 g_c} \quad \text{Ec. 18.2}$$

Donde L es la longitud total, Q es el flujo volumétrico y D_{int} es el diámetro interno de la tubería, f es el factor de fricción de Fanning (0.0077) que fue calculado con $f=16/Re$; $Re=2069.50$ (Ec. 7), k_f es el coeficiente de resistencia. Además se debe calcular el coeficiente de resistencia del cono a la entrada del tanque limitante, para lo cual se usó la siguiente ecuación (García, 2006):

$$K_f = m \left(1 - \frac{D_1^2}{D_2^2} \right)^2 \quad \text{Ec. 19}$$

Donde m depende del valor del ángulo de apertura del cono, en este caso 40°; m=1.

Se calculó el coeficiente de resistencia de los accesorios mediante el uso de los valores de la tabla 2:

Tabla 2. Valores k_f de los accesorios (Steffe and Daubert, 2006)

Accesorio	$k_{f_{acc}}$
Válvula mariposa	45 f
Válvula check	75 f
Codo 90°	30 f
Accesorio T	60 f

$$k_f = \Sigma[(k_{f_{acc}} * 4f) * n^{\circ} \text{ de accesorios}] \quad \text{Ec. 20}$$

f=0.0077 es el factor de fricción de Fanning (Steffe and Daubert, 2006).

Cálculo del cabezal de presión, donde P_{TL} es la presión del tanque limitante, y P_{al} es la presión en el tanque de alimentación.

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{P_{TL} - P_{al}}{\rho} \quad \text{Ec. 21}$$

Cabezal estático, donde z_1 y z_2 son las alturas, g es la fuerza de gravedad.

$$\frac{\Delta z g}{g_c} = \frac{(z_2 - z_1) g}{g_c} \quad \text{Ec. 22}$$

Luego de obtener el valor del trabajo de la bomba se calculó el cabezal de la bomba.

$$\Delta H = W * \rho_{\text{fluido refrigerante}} \quad \text{Ec. 23}$$

Con el valor del cabezal y el flujo volumétrico se seleccionó una bomba centrífuga de la marca Tri-Clover.

2.7 Escalamiento cinemático y dinámico del hidrofuidizador

a) Plato de orificios

Se seleccionó el diámetro de orificios se usó el diámetro utilizado por Hernández y Vázquez (2012), ya que es el número de orificios que tiene un valor de número de Reynolds alto a la salida del plato con orificios y la velocidad resultante de dicho diámetro no es muy grande, lo que no pone en riesgo al producto de ser dañado por la fuerza de los chorros de choque. Las propiedades del fluido refrigerante tienen que ser iguales. Por lo que se supuso, que los valores de densidad, viscosidad son iguales, el diámetro de orificio es el mismo en ambos sistemas (4×10^{-3} m). Se tiene que cumplir el principio de similitud, el cual está expresado con una relación lineal, expresada en la ecuación 13, donde m' es el valor del hidrofuidizador didáctico, m es el valor del hidrofuidizador a nivel semi piloto y k es la constante de proporcionalidad o el factor de escala. Con los valores del flujo volumétrico, se obtuvo la constante de proporcionalidad, ya que para calcular el número de orificios se utilizan el flujo volumétrico, la velocidad a la salida de los orificios y el área transversal del orificio, pero los otros valores no se pueden utilizar para calcular la constante de proporcionalidad, ya que o no se conocen los datos del hidrofuidizador didáctico o ambos datos en ambos sistemas son exactamente iguales.

$$\frac{m'}{m} = \frac{Q'}{Q} = k \quad \text{Ec. 24}$$

Con el valor de k se calculó la velocidad a la salida de los orificios del equipo didáctico $v_0' = k \cdot v_0$. Este valor se usó para el cálculo del número de orificios, la ecuación 11 quedó de la siguiente forma:

$$n^{\circ} \text{ orificios}' = \frac{Q'}{A_0' \cdot v_0'} \quad \text{Ec. 25}$$

A_0' es el área transversal del orificio.

Posteriormente se realizó el cálculo del número de Reynolds a la salida de los orificios con la ecuación 10 modificada:

$$Re'_0 = \frac{\rho Q' D_{ori}}{n^\circ \text{ orificios}' A_o \mu} \quad \text{Ec. 26}$$

2.8 Cálculo de número de Nusselt, coeficiente convectivo y coeficiente de enfriamiento

Para realizar el cálculo del coeficiente convectivo, primero se determinó el número de Nusselt en función al Reynolds y al número de Prandtl (Hernández y Vázquez, 2012). Usando la ecuación 27 se calculó el número de Nusselt para el equipo didáctico, la cual es una correlación para el enfriamiento de productos esféricos en agua de 1 a 10 °C (Dincer, 1995):

$$Nu' = 0.2671 Re_0^{0.433} Pr^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ec. 27}$$

Se calculó el número de Prandtl con la ecuación 9:

$$Pr' = \frac{Cp \mu}{k_T} \quad \text{Ec. 28}$$

Posteriormente, se calculó el coeficiente convectivo para el hidrofuidizador didáctico, utilizando la ecuación 1:

$$h' = \frac{Nu K_T}{D} \quad \text{Ec. 29}$$

Y finalmente se calculará el coeficiente de enfriamiento (Cc'), usando la ecuación 2 (Jácome, 2010).

$$Cc' = \frac{\ln h'}{35058.2146} \quad \text{Ec. 30}$$

Para poder realizar la comparación de los valores de los números adimensionales, el coeficiente convectivo y el coeficiente de enfriamiento, se recalcularon los valores del número de Reynolds, Prandtl y Nusselt, usando los datos de Hernández y Vázquez (2012), pero cambiando las propiedades térmofísicas de la dispersión que usaron en ese trabajo por las del agua a 1 °C.

CAPÍTULO III

RESULTADOS Y ANÁLISIS

3.1 Caracterización geométrica del equipo hidrofluidizador a nivel semi piloto.

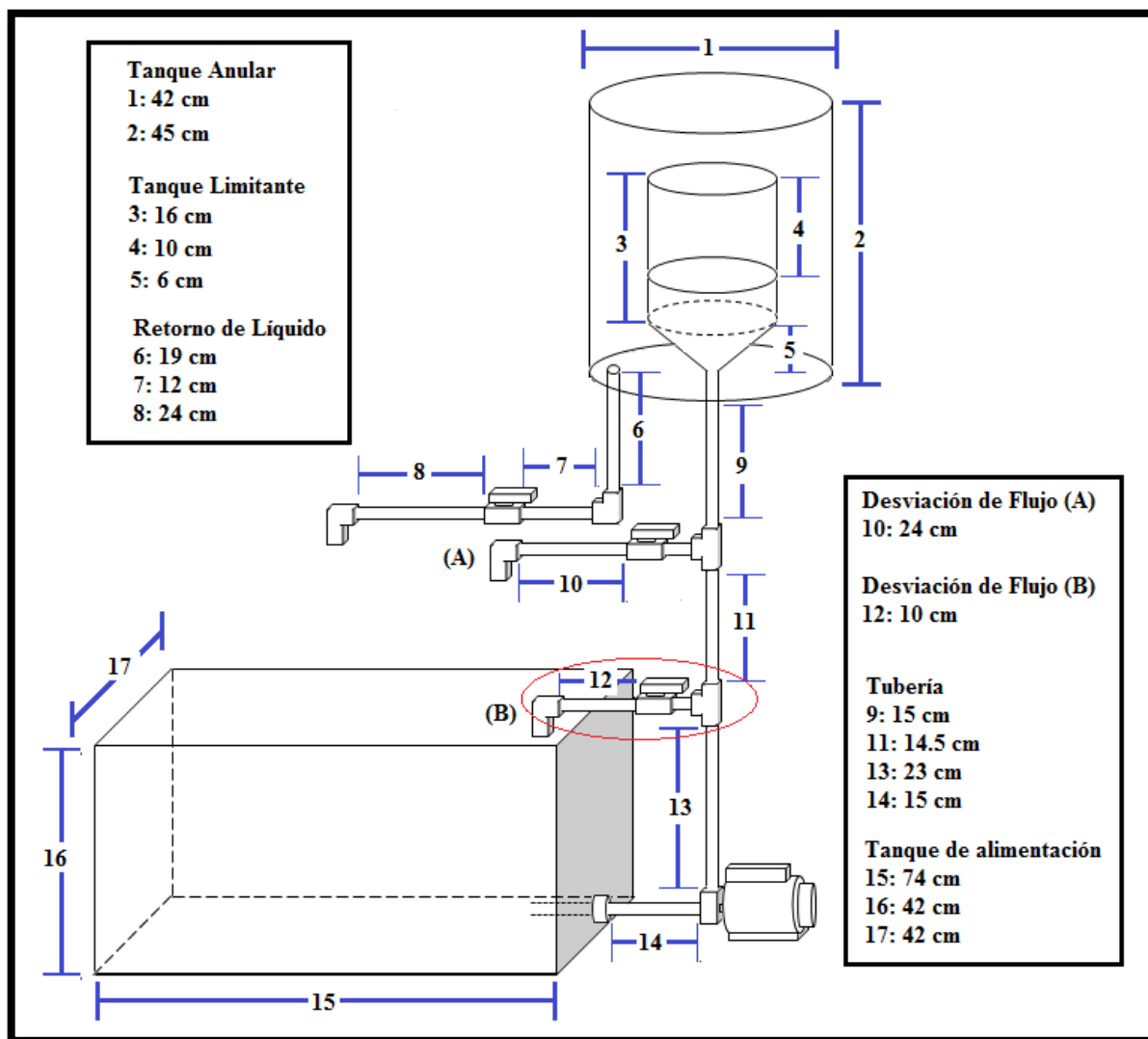


Figura 9. Dimensiones del hidrofluidizador a nivel semi piloto.

Se llevó a cabo la caracterización del hidrofuidizador de la nave 2000, mediante la medición de sus dimensiones, y la configuración del equipo. Se armó para ver cómo es que están ensambladas las partes más importantes del equipo. Las medidas del equipo se muestran en la figura 9.

La configuración del hidrofuidizador de la nave 2000 tiene algunos defectos, el primero de ellos es que la bomba tiene una capacidad mucho mayor a la que necesita un equipo que maneja un volumen tan pequeño de fluido. El tanque de alimentación está al nivel de piso, eso no permite que la fuerza de gravedad pueda ayudar en el transporte del fluido y hay estancamientos del mismo al drenar el líquido del mismo, esto dificulta la limpieza del equipo y mantenimiento del equipo.

3.2 Escalamiento geométrico del hidrofuidizador

Se decidió por un escalamiento geométrico debido a que se requería un diseño basado en el equipo a nivel semi piloto que se tiene en la nave 2000, pero con dimensiones menores y mejoras, para ser utilizado en el laboratorio del Taller Multidisciplinario de Ingeniería en Alimentos opción Taller de Procesos y Sistemas Frigoríficos.

a) Tanque limitante

Al iniciar el diseño del tanque limitante se seleccionó la cantidad máxima que pre enfriará el hidrofuidizador didáctico, para esto se consideró que el peso que puede procesar el equipo a nivel semi piloto es de 500 g, por lo que se tomó en cuenta que una reducción del 50% sería apropiada para experimentaciones en el laboratorio, ya que de esta forma no se desperdicia mucho material en cada experimentación, entonces se tomó como base de cálculo 250 g de producto.

Relación de volúmenes entre tanques (Peralta, et al., 2009), representado por la ecuación 14. Como no especifica límite, solo dice que el valor de esta relación debe ser mayor a 70, se tomara este valor. Para calcular el volumen del fluido refrigerante, se obtendrá primeramente el volumen del alimento utilizando la fórmula de densidad.

En los estudios previos, se utilizaron papa cambray, uva y pera, cuyas densidades son: 1094, 1067 y 1028 kg/m³ respectivamente (Jácome, 2010). Se usó el alimento más denso como base, en este caso es la papa cambray, debido a que un alimento de mayor densidad tiene un mayor grado de dificultad a ser hidrofuidizado. En este caso, 250 g de papa cambray representan 2.285x10⁻⁴ m³ de volumen. Despejando la ecuación 14 se tiene que el volumen del fluido refrigerante requerido es:

$$V_{\text{fluido refrigerante}} = 70 * 2.285 \times 10^{-4} \text{ m}^3 = 0.0159 \text{ m}^3 = 15.9 \text{ L}$$

Este volumen es el necesario para que el alimento se preenfrie por hidrofuidización. Se consideró que este volumen es el 80% de capacidad del tanque a utilizar, por lo tanto se calculó el volumen total que podrá retener el tanque limitante mediante un regla de 3:

$$15.909 \text{ L} \rightarrow 80\%$$

$$x \rightarrow 100\%$$

$$x = 19.88 \text{ L} \approx 20 \text{ L}$$

Con los 20 L determinados (volumen de almacenamiento, V_a), utilizando las ecuaciones de diseño de tanques con base plana de la tabla 1 se calculó el volumen de diseño (V_D), el diámetro del tanque limitante (D_{TL}) y la altura del mismo (H_{TL}).

$$V_a = 20 \text{ L} = 0.02 \text{ m}^3$$

$$V_D = 1.33 * 0.02 \text{ m}^3 = 0.0266 \text{ m}^3 (26.6 \text{ L})$$

$$D_{TL} = 0.74 * (0.0266 \text{ m}^3)^{\frac{1}{3}} = 0.2208 \text{ m} (22.08 \text{ cm})$$

$$H_{TL} = 2.325 * (0.0266 \text{ m}^3)^{\frac{1}{3}} = 0.6940 \text{ m} (69.40 \text{ cm})$$

El resultado son 20 L que sería el volumen ideal del hidrofuidizador para poder preenfriar el alimento con una densidad como la propuesta y de diámetro de 5 cm. Para efectos del diseño, se consideró realizar el escalamiento en una relación 1:2 (al 50%), por lo que el volumen de fluido refrigerante (agua) empleado para el escalamiento será de 10 L (0.01

m³). Y lo mismo con las dimensiones, cada una de ellas se redujo al 50%. La tabla 3 indica los valores de las dimensiones del tanque limitante.

Tabla 3. Características del tanque limitante

Características del tanque limitante		
Característica	Ideal	Reducción al 50%
Volumen de almacenamiento	20 L	10 L
Volumen de diseño	26.6 L	13.3 L
Diámetro del tanque limitante	22.08 cm	11.04 cm
Altura del tanque anular	69.40 cm	34.70 cm

b) *Tanque anular*

Para el dimensionamiento del diámetro del tanque anular, se partió de las relaciones calculadas en base a las medidas de los hidrofuidizadores ya construidos (Verboven *et al.*, 2003) (Peralta *et al.*, 2009).

Se utilizó la relación que daba una separación mayor entre los tanques representada por la ecuación número 3 (Peralta, et al., 2009) para calcular el diámetro del tanque anular, ya que al tener una separación mayor habrá una caída de presión menor, lo que es conveniente ya que donde se requiere una mayor caída de presión para generar el régimen turbulento en la salida de los orificios del plato.

$$\frac{D_{TL}}{0.625} = D_{TA} = 0.17664 \text{ m (17.664 cm)}$$

Para la altura del tanque anular, primeramente se calculó la distancia entre el tanque anular y limitante en la parte inferior. Se usó el criterio de diseño de un tanque de fermentación expresada en la ecuación 15 (Ward, 1991):

$$\frac{D_{TL}}{Z} = 1.0 - 1.5$$

La letra Z representa la distancia entre el agitador de turbina de disco y el fondo del tanque. Se usó como diámetro de la turbina de disco el diámetro del tanque (D_{TL}), ya que en tanto

el plato como la turbina de disco se genera la turbulencia y mayor caída de presión en sus respectivos tanques. Utilizando el valor del diámetro del tanque (0.1104 m) limitante que es el mismo que el diámetro del plato con orificios se tiene y despejando la fórmula 15 se obtuvo:

$$Z = \frac{D_{TL}}{1.25} = \frac{0.1104 \text{ m}}{1.25} = 0.0883 \text{ m (8.83 cm)}$$

Se usó el valor de 1.25 por ser el valor promedio entre el rango de 1.0 – 1.5 del criterio de diseño. Para el cálculo de la altura total del tanque anular (H_{TA}) se utilizó la relación calculada con los datos obtenidos bibliográficamente, expresada en la ecuación 4 (Peralta, *et al.*, 2009):

$$H_{TA} = \frac{0.3470 \text{ m}}{0.6750} = 0.514074 \text{ m (51.4074 cm)}$$

En la tabla 4 se muestran las dimensiones del tanque anular para el equipo didáctico.

Tabla 4. Características del tanque anular

Características del tanque anular	
Distancia inferior entre tanques (Z)	8.83 cm
Diámetro del tanque anular	17.64 cm
Altura del tanque anular	51.41 cm

c) Tanque de alimentación

Utilizando la relación entre el tanque de proceso y el tanque de alimentación (V_{al}) con forma en la ecuación 5 y con las ecuaciones de la tabla 1 se obtuvieron las dimensiones del tanque de alimentación.

$$\frac{V_{al}}{V_{TL}} = 1.2 \quad \therefore V_{al} = 1.2 * 10 \text{ L} = 12 \text{ L}$$

$$V_a = 0.012 \text{ m}^3$$

$$VD = 1.33 * V_a = 1.33 * 0.012 \text{ m}^3 = 0.0159 \text{ m}^3 (15.96 \text{ L})$$

$$D_{TL} = 0.74 * VD^{\frac{1}{3}} = 0.74 * (0.0159 \text{ m}^3)^{\frac{1}{3}} = 0.1861 \text{ m (18.61 cm)}$$

$$H_{TL} = 2.325 * VD^{\frac{1}{3}} = 2.325 * (0.0159 \text{ m}^3)^{\frac{1}{3}} = 0.5846 \text{ m (58.46 cm)}$$

En la siguiente imagen se muestran las dimensiones del tanque de alimentación.

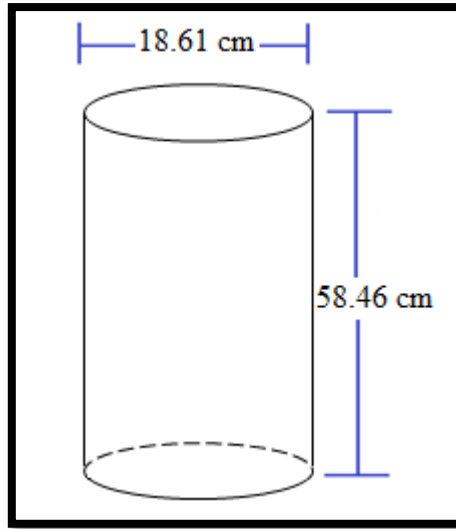


Figura 10. Dimensiones del tanque de alimentación

d) Selección del diámetro de tubería

El diámetro de tubería se seleccionó mediante el criterio de velocidad recomendada. Teniendo un flujo volumétrico de entrada de $3.1870 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$ y tomando en cuenta el valor de velocidad recomendada para servicios generales de 1.2 m/s:

Servicios generales (CRANE, 1987): 1.2 a 3 m/s (3.94 a 9.84 ft/s)

Se calculó el diámetro de tubería con la ecuación 31:

$$v = \frac{4Q}{\pi D_{int}^2} \rightarrow D_{int} = \sqrt{\frac{4Q}{\pi v}} = 0.0184 \text{ m} \quad \text{Ec. 31}$$

Con este valor de diámetro interno se buscó el diámetro nominal de la tubería de PVC que resultó ser de $\frac{3}{4}$ " y cuyo diámetro interno es de 0.724" (0.724"=0.01839 m), cuya velocidad es de 6.02 ft/s (1.835 m/s) (Manual de tuberías de PLASTIGAMA, 2001).

e) *Cono a la entrada del tanque limitante*

Para conocer las dimensiones del cono en la parte inferior del tanque, cuyo diámetro mayor es igual al diámetro del tanque limitante y el diámetro inferior es igual al diámetro de tubería seleccionada (3/4" = 1.94 cm), y con el ángulo de 40°, ya que este ángulo da una expansión gradual del flujo lo que provoca una caída de presión menor (Gerling, 2000).

La altura del cono (L_c) se calculó mediante la ecuación 6 (Gerling, 2000):

$$L_c = \frac{11.04 \text{ cm} - 1.94 \text{ cm}}{2} = 4.55 \text{ cm}$$

En la siguiente imagen se muestran las dimensiones finales del tanque limitante y del tanque anular para el equipo didáctico.

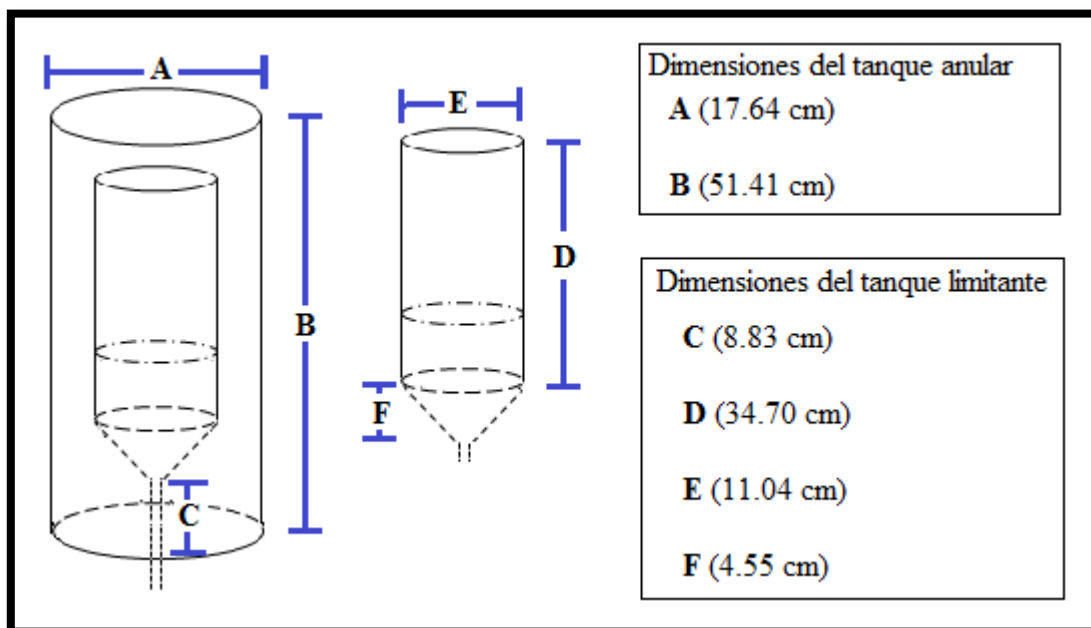


Figura 11. Dimensiones finales del tanque limitante y el tanque anular.

f) *Longitud de la tubería*

Para las longitudes de la tubería, se basó en el criterio heurístico de que la longitud de tubería entre un tanque y la bomba debe ser equivalente al valor del diámetro del tanque. La tubería debe estar separada del piso 20 cm, debe haber 30 cm de distancia del tanque a la tubería horizontal y no debe estar pegada a los tanques. La longitud de tubería que va del

tanque de almacenamiento y la bomba es de 18.61 cm. Para calcular la altura a la que el tanque anular se encontrará con respecto al piso se tomaron la altura del tanque de alimentación (58.46 cm), la altura entre el tanque de alimentación y el piso (25 cm) y como el tanque anular debe estar más alto para permitir el regreso del fluido refrigerante al tanque de alimentación, se tomó el diámetro del tanque anular (17.64 cm), lo que nos da una altura total de 101.1 m.

g) Rotámetro

El rotámetro se seleccionó en base al flujo volumétrico, con una capacidad de 10 GMP. El cuerpo del rotámetro será de acrílico claro, los adaptadores de polipropileno con anillos de tensión de aluminio. Este rotámetro se incluyó en el diseño final del hidrofuidizador didáctico para poder medir el flujo que ingresa al tanque limitante.

h) Selección de bomba

Se realizó el balance de energía mecánica del sistema representada con la ecuación 17.2:

$$W = \frac{\Delta P}{\rho} + \frac{\Delta z g}{g c} + \Sigma F$$

Además de los accesorios, se debe calcular la pérdida de presión del cono a la entrada del tanque limitante, para lo cual se usó la ecuación 19 (García, 2006):

$$K_f = 1 \left(1 - \frac{1.94^2}{11.04^2} \right)^2 = 0.9691$$

Donde m depende del valor del ángulo, en este caso es de 40° , por lo tanto $m=1$ (García, 2006).

Se calculó la fricción de los accesorios presentes en el sistema en base al criterio de longitud equivalente mostrados en la tabla 5.

La válvula mariposa se seleccionó para el control del flujo debido a que presenta una baja caída de presión en el sistema, ahorrando trabajo a la bomba.

Tabla 5. Sumatoria de valores kf de los accesorios (Steffe and Daubert, 2006)

Accesorio	Numero	kf	Suma
Válvula mariposa	1	45 f	45 f
Válvula check	1	75 f	75 f
Codo 90°	2	30 f	60 f
Accesorio T	1	60 f	60 f
f = 0.0077	Suma	240 f	5.52

El coeficiente de resistencia de los accesorios se calculó con la ecuación 20:

$$kf = 7.42$$

La pérdida de energía por fricción en la tubería se calculó con la ecuación 18.1:

$$H_{fs} \text{ Tuberías} = \frac{2 * 0.0077 * 1.6118 \text{ m} * (1.2 \text{ m/s})^2}{0.01839 \text{ m}} = 1.9436 \text{ J/kg}$$

Y las pérdidas por fricción en los accesorios se calcularon con la ecuación 18.2 sumando el valor de kf del cono a la entrada del tanque limitante:

$$H_{fs} \text{ Accesorios} = \frac{7.52 * (1.2 \text{ m/s})^2}{2 * 1 \text{ kgm/Ns}^2} + 0.9691 = 6.3115 \text{ J/kg}$$

La sumatoria de las pérdidas de energía por fricción en tuberías y accesorios se realizó con la ecuación 18:

$$\Sigma F = 1.9436 \text{ J/kg} + 6.3115 \text{ J/kg} = 8.2551 \text{ J/kg}$$

Se calculó el cabezal estático con la ecuación 22, donde z_1 es la distancia entre el tanque de alimentación a la bomba, z_2 es la distancia de la bomba al tanque limitante y g es la fuerza gravitatoria:

$$\frac{\Delta z g}{g c} = \frac{(z_2 - z_1) g}{g c} = \frac{(1.2757 \text{ m} - 0.3361 \text{ m}) 9.81 \text{ m/s}^2}{1 \text{ kgm/Ns}^2} = 9.2174 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Se calculó el cabezal de presión (ecuación 21), donde P_{TL} es la presión del tanque limitante y P_{al} es la presión del tanque de alimentación.

$$\frac{\Delta P}{\rho} = \frac{P_{TL} - P_{al}}{\rho}$$

$$\frac{\Delta P_{TL}}{\rho} = \frac{(P_{ATM} + P_{Hidrostatica}) - P_{ATM}}{\rho} \quad \text{Ec. 32}$$

La ecuación para calcular la presión hidrostática es la siguiente:

$$P_{hidrostatica} = \frac{\rho g H}{1 \text{ kgm/Ns}^2} \quad \text{Ec. 33}$$

Sustituyendo:

$$P_{hidrostatica} = \frac{(999.695 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.3470 \text{ m})}{1 \text{ kgm/Ns}^2} = 3403.0317 \text{ Pa}$$

Sustituyendo en la ecuación 32:

$$\frac{\Delta P_{TL}}{\rho} = \frac{(101325 \text{ Pa} + 3403.0317 \text{ Pa}) - 101325 \text{ Pa}}{999.695 \text{ kg/m}^3} = 3.404 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Para calcular la presión del tanque de alimentación:

$$P_{al} = \frac{P_{ATM} - (P_{ATM} + P_{Hidrostatica})}{\rho} \quad \text{Ec. 34}$$

Sustituyendo la ecuación 34:

$$P_{al} = \frac{101325 \text{ Pa} - (101325 \text{ Pa} + 5733.1768 \text{ Pa})}{999.695 \text{ kg/m}^3} = -5.7349 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Usando la ecuación 32 se calculó la presión hidrostática del alimento:

$$P_{hidrostatica} = \frac{(999.695 \text{ kg/m}^3)(9.81 \text{ m/s}^2)(0.5846 \text{ m})}{1 \text{ kgm/Ns}^2} = 5733.1768 \text{ Pa}$$

Sustituyendo en la ecuación 17, trabajo total de la bomba es:

$$w = -5.7349 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 3.404 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 8.2551 \frac{\text{J}}{\text{kg}} + 9.2174 \frac{\text{J}}{\text{kg}} = 15.1416 \frac{\text{J}}{\text{kg}}$$

Sustituyendo la ecuación 23, el cabezal de la bomba es:

$$\Delta H = 15.1416 \frac{\text{J}}{\text{kg}} * 999.695 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} = 15136.9818 \text{ Pa} = 5.0557 \text{ ft H}_2\text{O}$$

$$Q = 3.1870 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} = 5.05 \text{ GPM}$$

Características de la bomba seleccionada

RPM: 1750

Potencia: ¼ HP

Diámetro de entrada: 1 ½

Diámetro de salida: 1 ½

Diámetro impulsor: 2 ½

NPSH req: 5 ft.

Marca: Tri-Clover

3.3 Escalamiento cinemático y dinámico del hidrofuidizador

Plato de orificios

El material para fabricar el plato será el acrílico de espesor 0.01 m, para que pueda soportar la presión del agua al entrar al tanque limitante y posteriormente pasar a través de los orificios. El acrílico es un material muy económico, fácil y seguro de manipular. No es apropiado para su uso en alimentos, pero el tiempo de residencia dentro del tanque limitante, y por consiguiente el tiempo en que el alimento está en contacto con el acrílico, es muy corto.

Se utilizó el mismo diámetro de orificio ya reportado para el equipo hidrofuidizador a nivel semi piloto de la nave 2000, el cual, tiene un valor de 4×10^{-3} m (Hernández y Vázquez, 2012), ya que es el trabajo donde se reportan los valores del número de Reynolds a la salida de los orificios.

Para encontrar el dimensionamiento del flujo por el valor de número de Reynolds.

$$(\lambda_d \lambda_{v_0} \lambda_\rho) \lambda_\mu = \lambda_{Re} \quad \text{Ec. 34}$$

Para que se cumpla la igualdad, las propiedades del fluido refrigerante tienen que ser iguales. Por lo que se supuso, que los valores de densidad, viscosidad son iguales, el diámetro de orificio es el mismo en ambos sistemas (4×10^{-3} m), por lo tanto se reduce la ecuación 34 quedando de la siguiente forma:

$$\lambda_{v_0} = \lambda_{Re} \quad \text{Ec. 35}$$

Se tiene que cumplir el principio de similitud, el cual esta expresado con la relación lineal representada con la ecuación 13. Con los valores del flujo volumétrico, se obtuvo la constante de proporcionalidad, ya que para calcular el número de orificios se utilizan el flujo volumétrico, la velocidad a la salida de los orificios y el área transversal del orificio.

El área transversal del orificio es igual en ambos sistemas ($1.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2$), por lo que no se puede usar esta variable para calcular el coeficiente de proporcionalidad, la velocidad a la salida de los orificios del equipo didáctico no se conoce aún, por lo tanto, la variable que se puede utilizar para calcular el valor de k es el flujo volumétrico utilizando la ecuación 24:

$$k = \frac{3.1870 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{4.09 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}} = 0.7790$$

Con este valor se calculó el valor de la velocidad a la salida del orificio ($v_0' = k \cdot v_0$):

$$v_0' = 0.779 * 1.2 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 0.9350 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

Y se calculó el número de orificios a utilizar en el plato con la ecuación 25:

$$n^{\circ} \text{ orificios}' = \frac{3.1870 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}}{(1.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2) * \left(0.9350 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right)} = 27.26 \approx 27$$

Posteriormente, con la ecuación 26, se realizó el cálculo del número de Reynolds a la salida de la tubería.

$$Re'_0 = \frac{\left(999.695 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(3.187 \times 10^{-4} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) (4 \times 10^{-3} \text{ m})}{27 (1.25 \times 10^{-5} \text{ m}^2) \left(1.3860 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}\right)} = 2724.2880$$

En el trabajo de Hernández y Vázquez en el 2009 se utilizó una dispersión como fluido refrigerante, cuya densidad y viscosidad son diferentes a las del agua, se realizó el cálculo del número de Reynolds en la salida de los orificios para agua a 1 °C para poder hacer una comparación del número de Reynolds a la salida de los orificios, usando la ecuación 10:

$$Re_0 = \frac{\left(999.695 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right) \left(4.09 \times 10^{-3} \frac{\text{m}^3}{\text{s}}\right) (4 \times 10^{-3} \text{ m})}{29 (1.2566 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \left(1.3860 \times 10^{-4} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}\right)} = 3868.70$$

Los valores obtenidos del número de Reynolds, tanto el recalculado con los valores experimentales como el calculado para el hidrofuidizador didáctico son muy similares entre sí.

El valor del número de Reynolds calculado para el equipo didáctico, salió mayor, debido a que al reducir el área transversal del tanque limitante, también se redujo el diámetro del plato con orificios por lo que los chorros estarán más en contacto unos con otros, lo que aumenta el número de Reynolds.

3.4 Cálculo de número de Nusselt, coeficiente convectivo y coeficiente de enfriamiento

Para realizar el cálculo del coeficiente convectivo, primero se determinó el número de Nusselt en función al Reynolds y al número de Prandtl (Hernández y Vázquez, 2012). Se calculó el número de Prandtl con la ecuación 28:

$$\text{Pr}' = \frac{\left(4200 \frac{\text{J}}{\text{kg}^\circ\text{C}}\right) \left(1.3860 \times 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{m s}}\right)}{0.58 \frac{\text{W}}{\text{m K}}} = 10.0365$$

Por lo tanto, el valor del número de Nusselt (ecuación 27) y del coeficiente convectivo (ecuación 29) es:

$$\text{Nu}' = 0.2671(2724.2880)^{0.433}(10.0365)^{\frac{1}{3}} = 7.701$$

$$h' = \frac{(7.701) \left(0.58 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)}{(4 \times 10^{-3} \text{ m})} = 1116.6450 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{C}}$$

Sustituyendo la ecuación 30 se obtuvo el coeficiente de enfriamiento:

$$\text{Cc}' = \frac{\ln 1116.6450}{35058.2146} = 2.0018 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$$

Dado que el fluido utilizado por Hernández y Vázquez no fue agua, sino una dispersión, se recalcularon los valores de número de Reynolds, Prandtl, Nusselt, el coeficiente convectivo y el coeficiente de enfriamiento.

En la siguiente tabla se muestran los valores obtenidos con datos reportados en la bibliografía y los valores obtenidos con las dimensiones y valores del hidrofuidizador didáctico. Los valores obtenidos de coeficiente convectivo están dentro del rango reportado para papas de 0.024 m y 0.050 m, de 231 y 3650 W/m°C (Jácome, 2010). Los coeficientes de enfriamiento, de igual forma, son muy similares a los reportados bibliográficamente.

Tabla 6. Valores de números adimensionales y coeficiente convectivo del equipo semi piloto y el didáctico.

Parámetro	Valor obtenido con datos bibliográficos (Hernández y Vázquez, 2012)	Valor obtenido con datos del hidrofuidizador didáctico.
Numero de Reynolds a la salida del orificio	3868.70	2724.28
Numero de Prandtl	10.0365	10.0365
Numero de Nusselt	7.6023	7.7010
Coeficiente convectivo (W/m ² °C)	1102.33	1116.64
Coeficiente enfriamiento (s ⁻¹)	1.9981x10 ⁻⁴	2.0018x10 ⁻⁴

Los datos de la tabla 6 indican una diferencia menor entre los números adimensionales calculados para los dos equipos. La diferencia entre dichos valores no excede de ±10%, por lo que se considera que el equipo operara de manera correcta (Martínez y Posadas, 1996).

Para conocer la cantidad máxima de energía que puede retirar el equipo hidrofuidizador didáctico se calculó la carga máxima del producto, considerando que la temperatura del producto al ingreso (T_i) sea de 30 °C y la temperatura objetivo (T_f) sea 10 °C (Jacome, 2010).

$$Q_{0s} = m C_{p_{papa @ 30\text{ }^{\circ}\text{C}}} (\Delta T) \quad \text{Ec. 36}$$

$$Q_{0s} = 0.25 \text{ Kg} * 5530.1 \frac{\text{J Kg}}{\text{ }^{\circ}\text{C}} (20\text{ }^{\circ}\text{C}) = 27650.5 \text{ J}$$

Suponiendo que la temperatura de enfriamiento fueran 8.5 min (Jácome, 2010):

$$27650.5 \frac{\text{J}}{8.5 \text{ min}} = 3253 \frac{\text{J}}{\text{min}} = 3.08 \frac{\text{BTU}}{\text{min}}$$

Que es la cantidad máxima de energía que el hidrofuidizador didáctico podría retirar de un alimento.

3.5. Diseño final del hidrofuidizador didáctico para el preenfriamiento de productos hortofrutícolas.

En la tabla siguiente se muestran las especificaciones dimensionales y operacionales del hidrofuidizador didáctico diseñado.

Tabla 7. Especificaciones técnicas del hidrofuidizador didáctico.

Especificaciones técnicas	Valor
Volumen del tanque limitante	0.012 m ³
Volumen del tanque de alimentación	0.010 m ³
Potencia de la bomba	¼ HP
Diámetro nominal de tubería	¾"
Diámetro de los orificios	4x10 ⁻³ m
Productos que maneja	Esféricos, máximo 0.05 m
Tipo de fluido refrigerante	Newtoniano, de baja viscosidad < 200cP
Cantidad máxima de material	0.250 kg
Densidad máxima del material	1094 kg/m ³
Material de construcción	PVC (tuberías, accesorios); Acrílico (plato, tanques)
Flujo volumétrico del medio de enfriamiento	3.1870x10 ⁻⁴ m ³ /s
Tiempo de enfriamiento	8.5 min
Carga térmica retirada por minuto	3.08 BTU
Temperatura inicial máxima del alimento	30 °C
Temperatura del medio de enfriamiento (Refrigerante secundario)	1 °C

Se modificó el diseño original, agregando un rotámetro y una desviación con una válvula de globo para tener un control del flujo y poder medirlo, en la figura 9 se muestran las dos

desviaciones del diseño de Jácome, de las cuales, la desviación B se eliminó para evitar conflictos al momento de operar el equipo. En la figura 14 se observa que el tanque de alimentación se colocó por encima del nivel del piso, lo que permite que la fuerza gravitatoria actúe, provocando un mayor desplazamiento del fluido. La tubería de salida del agua del tanque anular tiene el mismo diámetro, ya que para tener un flujo constante de medio de enfriamiento y mantenerlo, el flujo volumétrico debe ser igual, por lo que un mismo diámetro es el adecuado.

Se eligió el PVC para las tuberías y accesorios debido a que es un material no tóxico, inerte y no dará olor o sabor al agua. Es usado para transportar agua fría en plantas industriales. El PVC no experimenta deterioro físico, excepto si se exponen a la luz del sol directa. No causara chispas al ser golpeado. También los contaminantes que pudiera tener el agua no aumentan sobre las paredes del tubo PVC o accesorios. En caso de que la bomba cavite, la tubería sufriría agitaciones, dichos movimientos no provocarían una ruptura de la tubería porque el PVC es resistente (Fortanel, 2008). Tiene una conductividad térmica menor ($0.1 \text{ W/m}^\circ\text{C}$), lo que asegura que el intercambio de energía entre el medio de enfriamiento y el ambiente, por lo tanto no habrá gran desperdicio de energía para mantener frío el medio refrigerante. Es fácil de manejar y de manipular, además de ser económicamente viable.

El acrílico es un material económico, fácil de manipular y de transportar debido a su poco peso, es fácil de limpiar y además permite la observación a través del material, esto resultaría muy útil al momento de realizar experimentaciones, ya que permitiría la apreciación de los fenómenos de corrientes durante la hidrofuidización.

Se seleccionaron válvulas mariposas para el control de flujo ya que son recomendadas para sistemas con apertura total o cierre total, tienen un sistema de accionamiento frecuente, provocan una baja caída de presión en el sistema, son ligeras, económicas y de fácil mantenimiento. Tienen alta capacidad, su circulación es en línea recta y se limpian por sí solas, son ligeras de peso y son adecuadas para instalarse en espacios reducidos y en líneas que no pueden soportar mucho peso, además de que también están construidas de PVC.

La válvula check se seleccionó para evitar que el fluido regrese una vez que la bomba deje de funcionar. También impedirá la descarga en dirección a la bomba, esto para evitar la

rotación inversa de la bomba, además te que permite que la puesta en marcha del equipo sea más rápido ya que la tubería permanece sin vaciarse y protege a la bomba durante presione y no requiere mantenimiento. La válvula check tipo bisagra es funcional para líneas horizontales y ofrecen menor caída de presión.

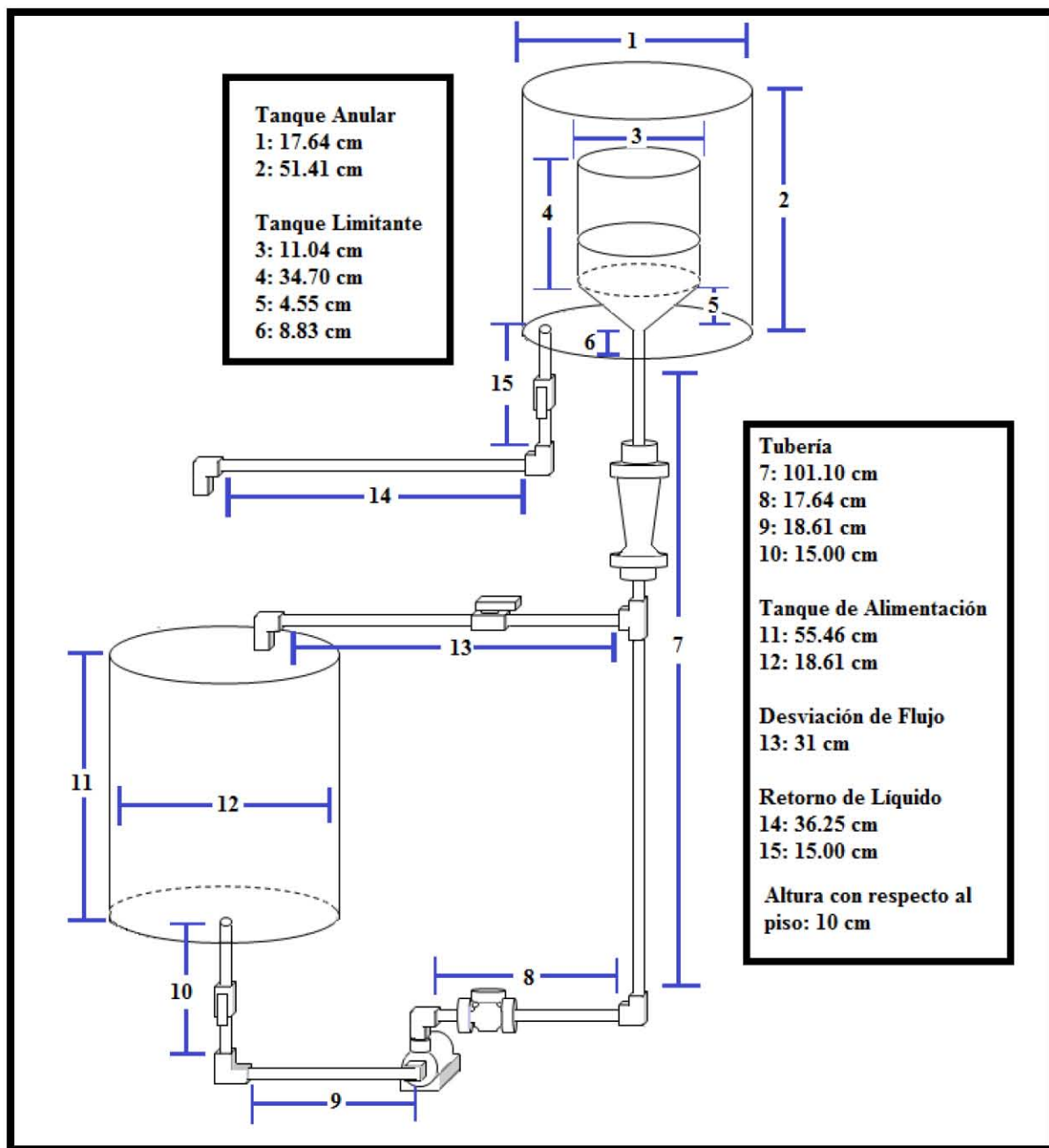


Figura 12. Dimensiones del hidrofuidizador didáctico

CONCLUSIONES

El equipo hidrofluidizador didáctico es un diseño que permitirá preenfriar alimentos en un equipo de dimensiones compactas, a diferencia del hidrofluidizador a nivel semi piloto existente. Se podrá efectuar el estudio de la transferencia de calor (número de Nusselt, coeficiente convectivo y coeficiente de enfriamiento) y de transporte de fluidos (número de Reynolds) en el preenfriamiento de productos hortofrutícolas de forma detallada y confiable, sin instalaciones complejas y con un tamaño más compacto y más fácil de manipular. El diseño didáctico elaborado en este trabajo está mejor planeado y permitirá realizar el proceso de preenfriamiento bajo condiciones adecuadas en productos esféricos, cuyos diámetros no superen los 0.050 m de diámetro.

Este equipo ahorrará espacio y funcionará de manera ecológica, al ser su medio de enfriamiento agua. Su consumo energético solo dependerá del equipo de bombeo, el cual, al manejar un volumen pequeño de agua, requerirá un consumo de energía menor.

El número resultante de orificios (27) permitirá una correcta distribución de los chorros de choque, los cuales no solo incidirán en el centro del tanque limitante, sino también en los extremos, lo que permitirá un contacto más homogénea con los chorros de choque a una velocidad similar entre ellos.

El escalamiento es una herramienta muy útil en el diseño de equipos, que provee de las variables y de las relaciones que deben igualarse o aproximarse para llevar un proceso a dimensiones más pequeñas o grandes del equipo original. Mediante el escalamiento se obtiene una certeza de que el nuevo diseño tendrá las mismas características que el equipo modelo y por lo tanto, resultados adecuados con menor cantidad de materia prima.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acrylite Polymers (2010). Asesor de acrílicos. Guía de referencia técnica para ACRYLITE y ACRYMID polímeros acrílicos. *Evonik Industries*.
- Anaya A. y Pedroza H., (2008). Escalamiento, el arte de la ingeniería química: plantas piloto, el paso entre el huevo y la gallina. *Tecnología, ciencia, educación* (23), 31-39.
- Brosnan T. and Sun D.W., (2001). Precooling techniques and applications for horticultural products: a review. *International Journal of Refrigeration* (24), 154-170.
- Daubert C. R and Steffe J. F., (2006). Bioprocessing Pipelines: Rheology and Analysis. USA: *Freeman Press*.
- Davis J.R., (1994). Stainless Steels. *ASM International Handbook Committee*.
- Dincer I., (1995). Estimation of dimensionless temperature distributions in spherical products during hydrocooling. *International Communications in Heat and Mass Transfer* (22), 123-131.
- División de ingeniería de CRANE, (1987). Flujo de fluidos en válvulas, accesorios y tuberías. México: *Mc Graw-Hill*.

- Donde C. M., (2005). Transporte de Momentum y Calor. Teoría y Aplicaciones a la Ingeniería de Proceso. México: *Ediciones de la Universidad Autónoma de Yucatán*.
- Fikiin A.G., (1992). New method and fluidized water system for intensive chilling and freezing of fish. *Food Control* (3), 153-160.
- Fricke B. A., (2006). Precooling Fruits & Vegetables. *ASHRAE Journal*, (11) 20-28.
- Fortanel J. C., (2008). Diseño y construcción de un equipo para la determinación del factor de fricción en un sistema de tuberías lisas de PVC, a partir de datos de caídas de presión, para el laboratorio de la planta piloto de la carrera de ingeniería química de la FES Zaragoza. *Tesis de Licenciatura de Ingeniería Química*. México: *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Garcia A., (2006). Hidráulica: Practicas de laboratorio. España: *Ed. Universidad Politécnica de Valencia*.
- Geankoplis J. C., (1998). Procesos de transporte y operaciones unitarias. 3^a. México: *Compañía Editorial Continental*.
- Gerling H., (2000). Alrededor de las máquinas-herramienta. 3^a. España: *Reverte*.
- Giral J., Barnes F. y Ramírez A., (1979). Ingeniería de procesos. 2^a. México: *Alhambra Mexicana*.
- Glynn C. and Murray D., (2005). Jet impingement cooling in microscale. *ECI International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow in Microscale*, 25-30.
- Gutiérrez A., (2011). Estudio térmico del preenfriamiento de alimentos con técnicas húmedas. *Tesis de licenciatura en Ingeniería en alimentos*. México: *Universidad Nacional Autónoma de México*.

- Hernández J. y Vázquez T. L., (2012). Aplicación de un recubrimiento de nanocapsulas en fruta fresca cortada empleando un preenfriador por hidrofluidización. *Tesis de licenciatura en Ingeniería en alimentos*. México: *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Incropera F.P. y DeWitt D.P., (1999). Fundamentos de transferencia de calor. 4^a. México: *Prentice Hall*.
- Jácome A., (2010). Propuesta de correlación matemática para predecir parámetros de transmisión térmica en un proceso de enfriamiento por hidrofluidización. *Tesis de Licenciatura de Ingeniería en Alimentos*. México: *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- MacCabe W. L., Smith J. C. y Harriot P., (1998). Operaciones Unitarias en Ingeniería Química. España: *McGraw-Hill*.
- Martínez P. y Posadas M., (1996). Metodología de escalamiento en evaporación-concentración de alimentos, aplicado en la elaboración de mermelada de frambuesa. *Tesis de Licenciatura de Ingeniería en Alimentos*. México; *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Miravete A., Cuartero J., (2007). Materiales compuestos. *Asociación Española de Materiales Compuestos*. España: *Reverte*.
- López A., (1990). Diseño de industrias agroalimentarias. España: *A Madrid Vicente*.

- Ochoa I. y Rivas I. M., (2005). Manual de análisis para frutas, hortalizas y productos derivados. *Tesis de licenciatura en Ingeniería en Alimentos*. México: *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Palomo A. A., (2013). Diseño de un equipo de trituración de plásticos reciclado. *Tesis de Licenciatura de Ingeniero Mecánico Electricista*. México; *Universidad Nacional Autónoma de México*.
- Peralta J.M., Rubiolo C., and Zorrilla E., (2009). Design and construction of a hydrofluidization system. Study of the heat transfer on a-stationary sphere. *Journal of Food Engineering* (90), 358-364.
- PLASTIGAMA, (2001). Manual de tuberías de PVC. México: *Tubosistemas Plastigama de Amanco*.
- Rodríguez M. A., (2011). Tipos de válvulas, Criterios de Selección y Pruebas a Válvulas de Relevo de Presión. *Tesis de Licenciatura de Ingeniería Mecánica Eléctrica*. México: *Universidad Veracruzana*.
- Verboven P., Scheerlinck N., and Nicolaï B.M., (2003). Surface heat transfer coefficients to stationary spherical particles in an experimental unit for hydrofluidization freezing of individual foods. *International Journal of Refrigeration* (26), 328-336.
- Ward O., (1991). Biotecnología de la fermentación. Principios, procesos y productos. España: *Acribia*.
- Weigand B., Spring S., (2009). Multiple jet impingement-A review. *Int Symp. On Heat Transfer in Gas Turbine System; Antalya*.