



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA  
DE MÉXICO**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES  
CUAUTITLÁN**

**SIMULACIÓN DEL EFECTO DE LOS MODELOS DE ESTIBAMIENTO  
SOBRE LOS PATRONES DEL FLUJO DE AIRE EN ALMACENES  
FRIGORÍFICOS**

**T E S I S**  
QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

**INGENIERA EN ALIMENTOS**  
P R E S E N T A:

**ARELY GARCÍA CANDANOSA**

**ASESORES: I. A. ALFREDO ÁLVAREZ CÁRDENAS**  
**I.A. FRANCISCO JAVIER LÓPEZ MARTÍNEZ**



Universidad Nacional  
Autónoma de México



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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



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

U.N.A.M.  
**ASUNTO: VOTO APROBATORIO**  
UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

**DRA. SUEMI RODRÍGUEZ ROMO  
DIRECTORA DE LA FES CUAUTITLÁN  
PRESENTE**



**ATN: L.A. ARACELI HERRERA HERNÁNDEZ  
Jefa del Departamento de Exámenes  
Profesionales de la FES Cuautitlán**

Con base en el Art. 28 del Reglamento de Exámenes Profesionales nos permitimos comunicar a usted que revisamos la Tesis:  
Simulación del efecto de los modelos de estibamiento sobre los patrones del flujo de aire en almacenes frigoríficos

Que presenta la pasante: Arclly García Candanosa  
Con número de cuenta: 40601071-1 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 07 de marzo de 2012.

**PROFESORES QUE INTEGRAN EL JURADO**

	NOMBRE	FIRMA
<b>PRESIDENTE</b>	I. A. Alfredo Álvarez Cárdenas	
<b>VOCAL</b>	I. A. Manuel Alarcón López	
<b>SECRETARIO</b>	M. en C. Víctor Manuel Avalos Avila	
<b>1er SUPLENTE</b>	I. Q. Ind. Ada Josefa Meza Meza	
<b>2do SUPLENTE</b>	I. A. Juana Gutiérrez Bautista	

NOTA: los sinodales suplentes están obligados a presentarse el día y hora del Examen Profesional (art. 120).  
HHA/pm

## **Agradezco:**

Primero que nada a Dios por darme la vida y ponerme en el lugar correcto.

A mi mamá, a mi papá y a Raúl por ser mis pilares, por estar siempre conmigo y apoyarme en todas mis decisiones, gracias por todo, los adoro.

A mi Mamá Chuy, a mi Mamá Tere, a mi Papá Gabino, a Mami por ser parte de todo este camino, por sus sabios consejos.

A mis hermanos Lupis, Eder y Edrei, por todos los momentos que hemos compartido, los amo.

A Caty por escucharme, apoyarme y ser parte de mi vida.

A mis tíos y tías José, Cruz, Augusto, Ely, Ina, Gloria, Isabel por el apoyo de siempre.

A mis primos Gicela, Panchito, Germán, Tere, Isra, Chayo, Ada, Esperanza, Mundo, Marysol por siempre estar ahí para mí y formar parte de mi vida.

A Maña, mi wera adorada, por ser mi mejor amiga y consejera.

A Irais por ser una persona especial para mí y siempre dándome ánimos para seguir.

A Lys, Arturo, Pablo por su apoyo incondicional.

A Ednita por ser mi compañera de toda la vida, por contar siempre contigo.

A Angel y Fredy por ser mis incondicionales y mis mejores amigos.

A Memo, Toño, Coggi, Fabián, Cuau, Citla, Pepe, Iván, porque sin ustedes mi vida no sería la misma.

A mis asesores Alfredo Álvarez y Francisco López por sus conocimientos y el apoyo dado a este proyecto.

A la Universidad Nacional Autónoma de México, por darme la mejor formación académica.

**“Por mi raza hablará el espíritu”**

# CONTENIDO

RESUMEN	xi
INTRODUCCIÓN	xii
CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES	1
1.1 Acondicionamiento interno de almacenes frigoríficos	1
1.1.1 Factores que influyen en el acondicionamiento interno de un almacén frigorífico	2
1.1.2 Distribución de flujo de aire en almacenes refrigerados	11
1.1.3 Manejo del producto y modelos de estibamiento	17
1.1.4 Estibado	18
1.1.4.1 Modelos de estibamiento	20
1.1.4.2 Equipos de carga	29
1.2 Simulación de procesos frigoríficos	30
1.2.1 Modelación matemática	31
1.2.2 Método del elemento finito	31
1.2.2.1 Comparación de diferencias finitas y elemento finito	33
1.2.3 Simulación con <i>Visual Basic</i>	34
CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL	38
2.1 Descripción de la metodología	38
2.2 Selección y justificación de variables	39
2.3 Análisis estadístico	40
2.4 Materiales y métodos	41
2.4.1 Validación de termopares	41
2.4.2 Caracterización del almacén frigorífico piloto	41
2.4.3 Localización de los puntos críticos en la cámara	43
2.4.4 Selección de tres modelos de estiba y tres tipos de distribución de flujo de aire	44

2.4.4.1	Distribución de los modelos de estiba en el almacén frigorífico	46
2.4.4.2	Construcción de prototipos de estibas	46
2.4.4.3	Obtención de datos de temperatura, humedad relativa del almacén frigorífico piloto y velocidad del aire	47
2.4.4.4	Determinación del modelo matemático del comportamiento de la temperatura, humedad relativa del almacén y la velocidad del aire	48
2.4.5	Crear los modelos en el programa <i>Visual Basic</i>	51
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS		53
3.1	Tratamiento y análisis de resultados	53
3.1.1	Validación de termopares	53
3.1.2	Perfiles de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa dentro del almacén piloto	54
3.1.2.1	Perfiles de temperatura	55
3.1.2.2	Perfiles de velocidad del aire	72
3.1.2.3	Perfiles de humedad relativa	81
3.1.3	Simulación de los patrones de en un almacén frigorífico	94
3.1.3.1	Simulación de los perfiles de temperatura	94
3.1.3.2	Perfiles de velocidad del aire.	103
3.1.3.3	Perfiles de humedad relativa	110
CONCLUSIONES		118
RECOMENDACIONES		119
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.		120

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Tabla de variables.	39
Tabla 2. Experimentos a realizar con las variables de estudio, de acuerdo con el diseño de experimentos con el análisis factorial.	40
Tabla 3. Cálculos estadísticos para la validación de termopares	41
Tabla 4. Factores de corrección de temperaturas	53
Tabla 5. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento <i>rack</i> . distribución y distribución del flujo de aire longitudinal	56
Tabla 6. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal	58
Tabla 7. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con convertidor y flujo de aire longitudinal.	59
Tabla 8. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura de los tres modelos de estibamiento con distribución de flujo longitudinal.	60
Tabla 9. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical	61
Tabla 10. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	63
Tabla 11. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	64
Tabla 12. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura de los tres modelos de estibamiento con distribución del flujo vertical	64

Tabla 13. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	66
Tabla 14. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal	67
Tabla 15. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal	68
Tabla 16. Prueba de <i>Tukey</i> para la variación de la temperatura de los tres modelos de estibamiento con distribución del flujo transversal.	68
Tabla 17. ANOVA para perfiles de temperatura	70
Tabla 18. ANOVA entre las combinaciones	71
Tabla 19. ANOVA para perfiles de velocidad	79
Tabla 20. ANOVA entre combinaciones	80
Tabla 21. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo longitudinal	81
Tabla 22. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal	83
Tabla 23. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal	84
Tabla 24. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical	85
Tabla 25. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	87
Tabla 26. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	88
Tabla 27. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	89

Tabla 28. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal	90
Tabla 29. Prueba de <i>Tukey</i> del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal	91
Tabla 30. ANOVA para perfiles de humedad relativa	93
Tabla 31. ANOVA entre combinaciones	93
Tabla 32. Prueba de <i>Tukey</i> de la amplitud de las ecuaciones de distribución longitudinal con los tres modelos de estibamiento.	96
Tabla 33. Prueba de <i>Tukey</i> de los periodos de las ecuaciones de de distribución longitudinal con los tres modelos de estibamiento	97
Tabla 34. Prueba de <i>Tukey</i> de la amplitud de distribución vertical con los tres modelos de estibamiento	99
Tabla 35. Prueba de <i>Tukey</i> de los periodos de distribución vertical con los tres modelos de estibamiento.	99
Tabla 36 . Prueba de <i>Tukey</i> de la amplitud de distribución transversal con los tres modelos de estibamiento	102
Tabla 37. Prueba de <i>Tukey</i> de los periodos de distribución transversal con los tres modelos de estibamiento.	102

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Temperaturas en las distintas partes del frigorífico	4
Figura 2. Distribución del aire ideal en un almacén frigorífico	9
Figura 3. Perfiles de velocidad a la salida del ventilador	10
Figura 4. Características del Grupo A	13
Figura 5. Características del Grupo B	14
Figura 6. Características del Grupo C	15
Figura 7. Características del Grupo D	16
Figura 8. Características del Grupo E	16
Figura 9. Criterios de Estibado.	19
Figura 10. Elementos de una tarima	21
Figura 11. Ejemplos de tipos de tarimas	22
Figura 12. Convertidor.	23
Figura 13. <i>Rack</i> dinámico	25
Figura 14. <i>Rack</i> selectivo	26
Figura 15. Rack Drive in	27
Figura 16. <i>Rack push back</i>	28
Figura 17. Patín de carga	29
Figura 18. Montacargas	30
Figura 19. Elementos gráficos de Visual Basic 6.0	36
Figura 20. Dimensiones del almacén frigorífico piloto	42
Figura 21. Distribución de los modelos de estiba y localización de puntos críticos para medición de temperatura, humedad y velocidad del aire.	44
Figura 22. Diseño de tarimas, convertidores y <i>rack</i>	47
Figura 23. Curve Expert 1.3	49
Figura 24. Series de Fourier	50
Figura 25. Diagrama de flujo de la simulación de los perfiles de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire.	51
Figura 26. Validación de termopares	54

Figura 27. Perfil de velocidades del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo longitudinal.	56
Figura 28. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal.	57
Figura 29. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal.	58
Figura 30. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical	61
Figura 31. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	62
Figura 32. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	63
Figura 33. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	65
Figura 34. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal	66
Figura 35. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal	67
Figura 36. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo longitudinal	72
Figura 37. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal	73
Figura 38. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal	73
Figura 39. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical.	74
Figura 40. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	75
Figura 41. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	76

Figura 42. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	77
Figura 43. Perfil de velocidad del aire modelo de estibamiento directo con distribución transversal	77
Figura 44. Perfil de velocidad del aire modelo de estibamiento con convertidores y distribución del flujo transversal	78
Figura 45. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo longitudinal	81
Figura 46. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal	82
Figura 47. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal	83
Figura 48. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical	85
Figura 49. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	86
Figura 50. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	87
Figura 51. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	89
Figura 52. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal	90
Figura 53. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal	91
Figura 54. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo longitudinal	95
Figura 55. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal	95
Figura 56. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal	96

Figura 57. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical	98
Figura 58. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	98
Figura 59. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	99
Figura 60. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	100
Figura 61. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal	101
Figura 62. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal	101
Figura 63. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo longitudinal	103
Figura 64. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal	104
Figura 65. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal	105
Figura 66. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical	106
Figura 67. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	106
Figura 68. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	107
Figura 69. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	108
Figura 70. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal	109
Figura 71. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal	110

Figura 72. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con <i>rack</i> con distribución longitudinal	111
Figura 73. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal	111
Figura 74. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal	112
Figura 75. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo vertical	113
Figura 76. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical	114
Figura 77. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical	114
Figura 78. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con <i>rack</i> y distribución del flujo transversal	115
Figura 79. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal	116
Figura 80. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal	116

## RESUMEN

En este trabajo se estudió el efecto de los modelos de estibamiento (*rack*, directo, convertidores) y la distribución del flujo de aire (longitudinal, vertical, transversal) sobre los patrones de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire.

Se utilizó una cámara piloto, para el modelo de las tarimas se construyeron a una escala de 1:20 de madera y la estiba fue modelada con bloques de poliestireno expandido con una altura de 8 cm y ancho de 5 cm; los *racks* fueron construidos con madera, de tres pasillos con tres niveles, en cada nivel se acomodaron 8 tarimas; para los convertidores, a las tarimas ya construidas se les fijaron en los bordes de la carga los perfiles de alambre recocido y se colocaron paneles para las distintas distribuciones del flujo de aire.

Con los datos experimentales se realizaron los perfiles de temperatura, velocidad y humedad relativa, estas curvas fueron utilizadas para definir las ecuaciones del comportamiento de las variables en los distintos experimentos y aplicarlas al programa *Visual Basic*.

Se concluye que la combinación de los modelos de estibamiento y la distribución del flujo de aire, proporcionan un adecuado control de las variables estudiadas. Si el modelo de estibamiento es con *rack*, existe una diferencia de temperatura menor, cuando la distribución de flujo del aire es en forma longitudinal. Con el modelo de convertidores la menor diferencia de temperatura se obtiene al distribuir el aire en forma vertical. Cuando el modelo de estibamiento es directo, la menor diferencia de temperaturas es con la distribución de aire en forma transversal.

# INTRODUCCIÓN

El enfriamiento uniforme en un almacén frigorífico es difícil de lograr a nivel industrial debido a una distribución irregular del flujo de aire, lo cual afecta la calidad del producto y es significativamente dependiente del control de tres factores, que son: la temperatura, humedad relativa del almacén y la velocidad del aire. Uno de los aspectos más importantes en la preservación de la calidad de un producto, es que el aire circule y así la temperatura sea adecuada a través de todo el almacén frigorífico. La temperatura del producto en el almacén frigorífico puede variar debido a que la temperatura del aire aumenta a medida que circula a través del almacén y absorbe el calor del producto (ASHRAE, 2002). Además de la temperatura y del tiempo que puede preverse para la perfecta conservación de productos alimenticios, existen otros dos factores que afectan de manera significativa los resultados de dicha conservación: la humedad relativa del almacén y la velocidad del aire alrededor del mismo. La velocidad del aire está estrechamente ligada con la humedad y afecta considerablemente las propiedades físicas de los alimentos, los efectos de ambas variables son difíciles de identificar por separado (Dossat, 1998; Alarcón, 1998).

Un aspecto importante del estibamiento de producto es la disminución de costos de almacenamiento, lo cual se consigue mediante un buen acomodo de producto, así como, aprovechando el máximo del volumen de los almacenes frigoríficos (Velázquez, 1996). Estos aspectos contribuyen a una disminución de las diferencias de temperatura en toda la carga y por lo tanto a la preservación de la calidad, la seguridad, vida útil de los productos perecederos.

La necesidad de entender los patrones de flujo de aire y su relación con modelos de estibamiento, ha generado modelos computacionales que utilizan el método del elemento finito, que permiten la simulación de situaciones caracterizadas por la heterogeneidad de la distribución de flujo de aire que cambia con la temperatura y

ubicación. Es aconsejable, en estos casos, subdividir el sistema en porciones elementales y luego reconstruir el sistema para generar el modelo original. Si las porciones son finitas, recibe el nombre de discreto o numérico. En los problemas de transmisión de calor, la incógnita de la ecuación diferencial planteada está en función de la distribución de temperaturas, para ello podemos utilizar métodos analíticos o métodos aproximados. El método de elemento finito es un método particular aproximado dentro de la formulación variacional (Miranda, 2002), se obtienen funciones trigonométricas o polinomiales, la introducción del concepto de elementos finitos por Clough, sugería que la representación de un dominio da una colección de números de elementos finitos, subdominados por el tamaño y la forma de la variable, los cuales están interconectados en un número discreto de nodos. La solución de las ecuaciones diferenciales parciales es aproximada en cada elemento por debajo de un orden polinomial, y que de esta manera se define únicamente los términos de la solución en los nodos (Tijskens, 2004).

Se han realizado varios trabajos que estudian los patrones del flujo de aire; Moureh y Flick en el 2004, llevaron a cabo el estudio numérico y experimental de los patrones de flujo de aire en un camión frigorífico con dos filas de tarimas. La descripción de temperatura y flujo de aire se desarrolló en base a las leyes de conservación de masa, movimiento y energía. Los resultados obtenidos subrayaron la importancia del mantenimiento de las separaciones en la ventilación alrededor de las tarimas con el fin de eliminar el intercambio de calor a través del aislamiento de las paredes y por lo tanto disminuir las altas temperaturas alcanzadas a nivel local en las áreas más sensibles. Los modelos computarizados, que pueden predecir los efectos de los factores de operación, son una herramienta poderosa para la optimización, consumen menos tiempo y son aceptablemente exactos en comparación los métodos convencionales (Tijskens, 2004).

Estos modelo computarizados, con una adecuada validación, se utilizan como una herramienta de diseño para optimizar las configuraciones más complejas, reduciendo la necesidad de experimentos costosos (Mitoubkieta y col., 2006).

Por lo anterior, el propósito de este trabajo fue desarrollar un *software* donde se visualice el efecto del modelo de estibamiento y distribución de flujo de aire, en los patrones de flujo en un almacén frigorífico con el fin de adecuar y controlar el proceso de refrigeración y de este modo sea efectivo, ya que las condiciones de temperatura, humedad relativa del almacén y la velocidad del aire afectan directamente a la disminución de la calidad del producto.

# **CAPÍTULO 1. ANTECEDENTES**

## **1.1 Acondicionamiento interno de almacenes frigoríficos**

La técnica de conservación de alimentos usando bajas temperaturas data desde el siglo XVIII con el uso del hielo en casa. Estas estructuras, eran paredes por debajo del nivel de la tierra en cual la cosecha era almacenada. A principio del siglo XIX se dio la construcción de almacenes de refrigeración los cuales generalmente con el propósito de una mayor comercialización en los puertos marítimos de Europa y América. En los años veintes se desarrolló la industria de alimentos congelados, su propósito era simplemente proporcionar un medio de conservación de grandes toneladas de productos perecederos, como son los vegetales, helado, mantequilla, carne de res y pescado. La conservación por frío es capaz de mantener el sabor natural, el color y el aspecto de los productos, si las condiciones de almacenamiento son adecuadas (Clive, 1990).

El Instituto Internacional del Frío, define el almacén frigorífico como “edificio destinado para el almacenamiento de productos, especialmente perecederos, en condiciones específicas y controladas de temperatura y humedad, que no pueden obtenerse sin una instalación frigorífica y un aislamiento adecuado”. Se pone de manifiesto el mantenimiento de algunas condiciones internas de la cámara, destinadas a la buena consecución del objetivo buscado de conservación durante un cierto tiempo de un género almacenado.

El almacenamiento en condiciones de refrigeración se utiliza para retrasar el deterioro de la calidad en muchos productos alimenticios. El mantenimiento de la temperatura ideal del producto y la minimización de la pérdida de agua son de importancia. Esto se logra mediante condiciones uniformes (temperatura,

humedad relativa y velocidad del aire) en el entorno de almacenamiento. Además los factores de diseño y operación, tales como el diseño del almacén, los niveles de aislamiento, los dispositivos de puerta de protección, la frecuencia de uso de la puerta, los patrones de flujo de aire y los arreglos del producto, influyen en la uniformidad del medio ambiente y por lo tanto en el cambio de calidad del producto (Dincer, 1997).

El acondicionamiento interno del almacén involucra el control de temperatura del espacio, además de la humedad del mismo y movimiento del aire (Dossat, 1998). El mantenimiento del frío de los productos perecederos se asegura por la circulación de aire forzado por ventiladores. Cuando el aire debe circular de arriba abajo, las unidades de carga son apiladas en tarimas de madera o plástico, acondicionados para permitir la circulación del aire entre la carga y el suelo y su difusión en la carga. Para garantizar la uniformidad de temperatura en una carga, se necesitan tasas relativamente altas de la circulación de aire continuo y altos niveles de control de temperaturas son necesarias, sumándole el cuidado del estibamiento (Dincer, 1997).

### **1.1.1 Factores que influyen en el acondicionamiento interno de un almacén frigorífico**

#### **a) Temperatura del almacén frigorífico.**

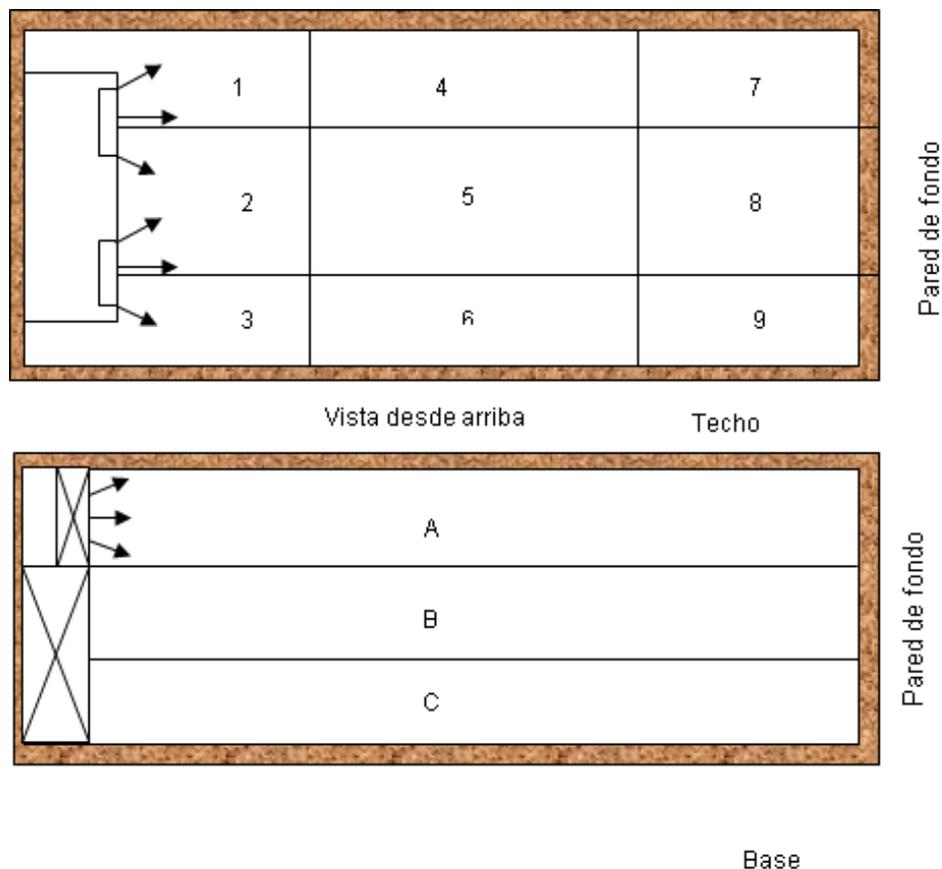
El mantenimiento de la temperatura en el almacén es esencial para preservar la calidad y vida de anaquel de los alimentos perecederos dentro del mismo, los niveles de temperatura y su homogeneidad depende directamente de los patrones del flujo del aire. El diseño del sistema de distribución de aire debe permitir que exista un flujo de aire adecuado para compensar el intercambio de flujo de calor a través de las paredes o el generado por los productos. Este proceso es esencial para disminuir la diferencia de temperaturas a través de la carga (Moureh y *col.* 2004).

En el almacén frigorífico se genera una diferencia de temperaturas entre el aire y el refrigerante. Se considera adecuada una diferencia igual a la que existe entre el paro y la puesta en marcha y que viene regulada por el termostato; esta diferencia suele ser de 1°C y máximo 1.5 °C. Lo ideal son 0.8°C para cuya regulación hay termostatos adecuados. Si la diferencia es superior a los dos grados, esto puede atribuirse a una mala circulación del aire, o que el salto térmico es excesivo o ambos; la mala circulación puede ser debida a su mal estibado, la disposición de embalajes; el uso de protectores laterales, a un coeficiente de recirculación insuficiente o ambas. (ASHRAE, 2002).

Para saber lo que ocurre en un almacén frigorífico existen las siguientes distinciones; que la instalación esté en marcha o esté parada; que en el exterior de la instalación el clima sea relativamente cálido o frío. En la figura 1 se muestra la distribución de la temperatura cuando el exterior es relativamente cálido; mientras está en marcha la instalación, se observa que se dan las temperaturas mínimas en las siguientes partes A y B, 1, 2, 3; también en A 4, 5, 6 en este sector es menos baja que las anteriores; las temperaturas máximas en B 4, 5, 6; C de 1a 6, unas máximas menos acentuadas en C 7,8, 9. Una vez establecido el equilibrio térmico que en general se puede considerar un ciclo de 30 minutos, durante los cuales 10 o 15 minutos esta la instalación parada y los restantes 20 o 15 en marcha, los períodos de funcionamiento son muy frecuentes (ciclo muy corto) y por consiguiente, el estancamiento del aire durante el tiempo de paro es casi imposible, por lo que entre la parte alta y la baja se producen variaciones de temperatura muy pequeñas.

Cuando el exterior es relativamente frío se puede considerar un ciclo de unas 5 o 6 horas, en el que durante 4 o 5 está la instalación parada y durante 1 hora en marcha. Por esta causa, la estratificación de aire es evidente y es sabido que el aire frío tiende a ocupar la parte más baja y el menos frío, al pasar menos, va a las capas superiores. Las temperaturas mínimas cuando la instalación está en marcha

se producen en los puntos A y B 1,2, y 3 y unas mínimas menos acentuadas en A 4,5 y 6 y unas temperaturas máximas en A 7, 8 y 9 y en B de 4 a 9. Con la instalación parada se producen unas mínimas en C de 1 a 9, por estratificación del aire y unas máximas en toda la zona A (Malagón, 1997).



**Figura 1. Temperaturas en las distintas partes del frigorífico (Malagón, 1997)**

En tiempo de paro, las temperaturas máximas tienden a desplazarse hacia paredes laterales y de fondo; las mínimas en la base, tienden a apartarse de dichas paredes. Las diferencias de temperaturas que se producen entre la parte más fría y la más cálida de la cámara son tanto mayores cuanto mayor es el salto térmico que en esta se produce; por otra parte, las temperaturas son tanto más uniformes cuanto mayor o más intensa es la circulación del aire y mejores son los

aislamientos y por lo tanto la tasa de cambio de la calidad del producto (Dincer, 1997).

b) Humedad relativa del almacén frigorífico.

Se entiende por humedad relativa, la relación entre la presión parcial de vapor de agua y su presión de vapor saturado a temperatura dada. En general, la humedad relativa puede ser un tanto elevada cuanto más baja es la temperatura (Plank, 2005). La pérdida de peso disminuye con una humedad relativa creciente del aire en el almacén. La humedad relativa, el estado de los embalajes, el salto térmico, la superficie de evaporación, la velocidad y caudal del aire; la necesidad de un completo llenado de las cámaras junto con la temperatura, ejercen una fuerte influencia sobre la conservación de alimentos.

La temperatura, cubre la importancia esencial de la humedad relativa ambiental, para la mayoría de los alimentos almacenados en refrigeración la humedad relativa óptima del ambiente está entre los 80 y 95%, relacionando esto generalmente con el contenido de humedad de los mismos alimentos y la facilidad con que se deshidratan, existiendo pérdidas de peso. Una humedad relativa excesivamente elevada, acompañada de una interrupción de la circulación del aire, pueden provocar un intenso desarrollo de la micro flora; por el contrario, una humedad relativa baja acentúa la desecación de los productos sin envasar o envueltos en materiales permeables, para contrarrestar esto, se utilizan sistemas de refrigeración que garantizan un suficiente movimiento de aire en todo el almacén, por lo común, es suficiente una velocidad de aire 0.1-0.3 m/s sobre la superficie de los productos (Malagón, 1997).

La toma de lectura que se haga durante el funcionamiento de ventiladores o que se lleve durante el ciclo de parada de los mismos, la diferencia puede ser de 2 a 3 puntos a lo largo del almacén. Es interesante realizar cuatro mediciones, producto, pasillo, con ventiladores en marcha y paro, como mínimo debe hacerse la medición en el pasillo, con la instalación en paro y marcha, situando el higrómetro

en un punto de la cámara que no sea considerado entre los más fríos ni entre los más cálidos, en una posición media en cuanto a la temperatura. Los controles se harán siempre y cuando se haya alcanzado el equilibrio térmico, en todo caso debe darse un mayor valor al control tomado durante un período estable que, en la mayor parte de la conservación coincide con los períodos de paso del compresor y ventiladores. Lo más frecuente, es que la humedad relativa de las cámaras sobre todo las convencionales, sea insuficiente, aunque ellos constituyan la excepción que se dé un exceso de humedad.

Los factores que contribuyen al aumento de la humedad relativa son:

- 1) Embalajes. En repetidas ocasiones se ha citado la influencia de los embalajes ejercen en la humedad relativa; la madera absorbe una importante cantidad de agua, que proviene de la humedad ambiental creada por el producto.
- 2) Carga del almacén. Es difícil alcanzar un buen grado de humedad relativa cuanto menos lleno esté, esto se puede subsanar con la humectación del suelo o la nebulización.
- 3) En cuanto a la temperatura de conservación, no debe perderse de vista que es más fácil lograr una humedad relativa alta cuanto más baja sea la temperatura (en un mismo volumen se precisa menos cantidad de agua, para tener una misma humedad relativa, cuanto más sea la temperatura de conservación). Esta temperatura vendrá limitada por aquellas fisiopatías que con las bajas temperaturas se pueden provocar o favorecer a la calidad del producto.
- 4) Aportación de agua al almacén. Como medida de emergencia y de utilización provisional, aunque de considerable eficacia, para aumentar la humedad relativa del almacén están:

- La aportación de agua mediante nebulización, inyectándola a la corriente de aire, a la salida de los ventiladores. Con este sistema, el reparto de humedad en el almacén es poco regular.
- Mediante vaporización, el inconveniente de este sistema exige trabajar con agua pobre en cal y el costo de transformar el agua en vapor, así como eliminar el calor producido en la operación.
- La aspersion de agua en el suelo, con los inconvenientes para la circulación de maquinas y personal; a diferencia de otros sistemas, la humedad aportada es bastante regular.

El exceso de humedad relativa. Cuando por diversas circunstancias, la humedad relativa llegue a superar lo adecuado y resulte aconsejable reducirla se puede recurrir a:

- Eficaz barrera anti-vapor
- Buenos aislamientos.
- Elevado coeficiente de aire y superficie de evaporación elevada cuando el decremento térmico es reducido.
- Embalajes de plástico, embalajes de maderas humedecidos.

c) Velocidad del aire.

La influencia de la velocidad del aire se ve reflejada en las pérdidas de peso, la evaporación de agua tiene lugar más rápidamente con la inadecuada circulación del aire. Para la transferencia de materia son válidas las misma leyes que las de transferencia de calor (Plank, 2005). Es necesario tener aire a alta velocidad a fin de extraer el vapor y de esa manera prevenir la condensación de la humedad sobre la superficie del producto. Aunque con aire a alta velocidad se tiende a aumentar la rapidez de la evaporación de la humedad del producto, esto acelera grandemente la rapidez del enfriamiento teniendo como resultado una reducción más rápida en la temperatura del producto y en la presión de vapor del aire. Ya que la reducción de la presión del vapor provocada por la rapidez del alto

enfriamiento más que compensar el aumento en la rapidez de la evaporación ocasionada por la alta velocidad del aire durante los primeros pasos del enfriamiento son para reducir pérdidas de la humedad del producto (Dossat, 1999).

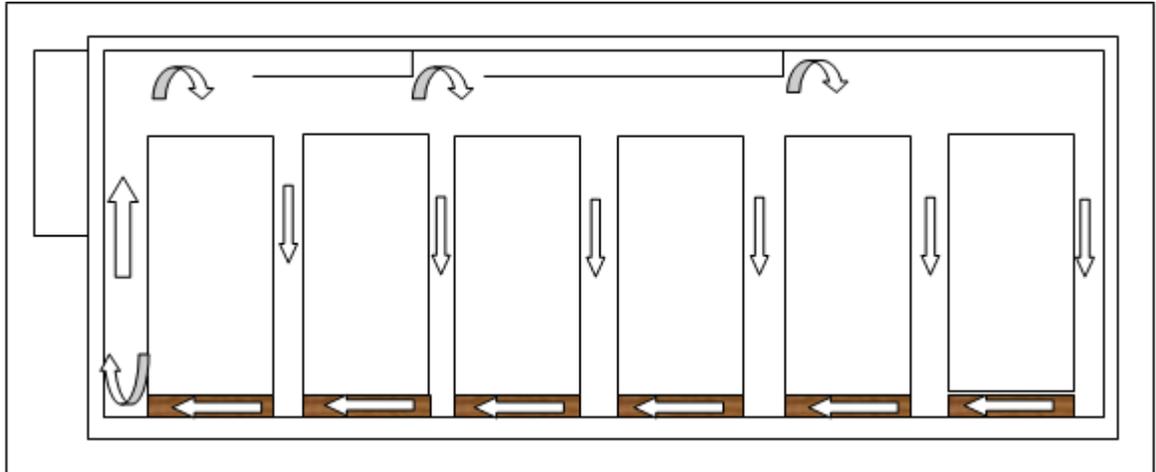
d) Recirculación del aire.

Se refiere a la circulación del aire, en circuito cerrado por el interior del almacén, bajo la acción de los ventiladores. La recirculación adecuada es necesaria, para lograr facilitar el rápido enfriamiento. El aire es el vehículo que evacua el calor hacia el evaporador, mezcla y homogeniza la temperatura y la humedad del almacén, eliminando o reduciendo los microclimas particulares, tratando de evitar zonas de aire estancado o muerto. Si la instalación da un suficiente número de recirculaciones en el almacén vacío según la densidad de carga, disposición y estibado y a pesar de ello, en el almacén lleno se producen enfriamientos irregulares, la causa de ello estará, con muchas posibilidades en una carga incorrecta. El error puede radicar en la densidad excesiva, en una mala disposición y estibado de los embalajes por no dejar espacios suficientes en el techo, laterales y suelo (Durán, 1983).

La circulación del aire está estrechamente ligada con la humedad y afecta de manera vital las condiciones de los alimentos, sus efectos son difíciles de identificar por separado. Cuanto más seco sea el aire y más rápida la circulación del aire, mayor cantidad de humedad perderá el producto a enfriar. Debe existir, alguna circulación del aire dentro de la cámara ya que el aire es el medio a través del cual el calor de los productos a enfriar es absorbido por el evaporador. Además, el aire estancado ocasiona la formación de mohos y bacterias en la superficie de los alimentos (Alarcón, 1998).

En el almacenamiento es muy importante proporcionar una buena circulación del aire entre las cajas y alrededor del producto (Figura 2). Una adecuada distribución

de aire es requerida para mantener una temperatura uniforme a través del almacén para prevenir estratificación del calor y humedad (Dincer, 1997).

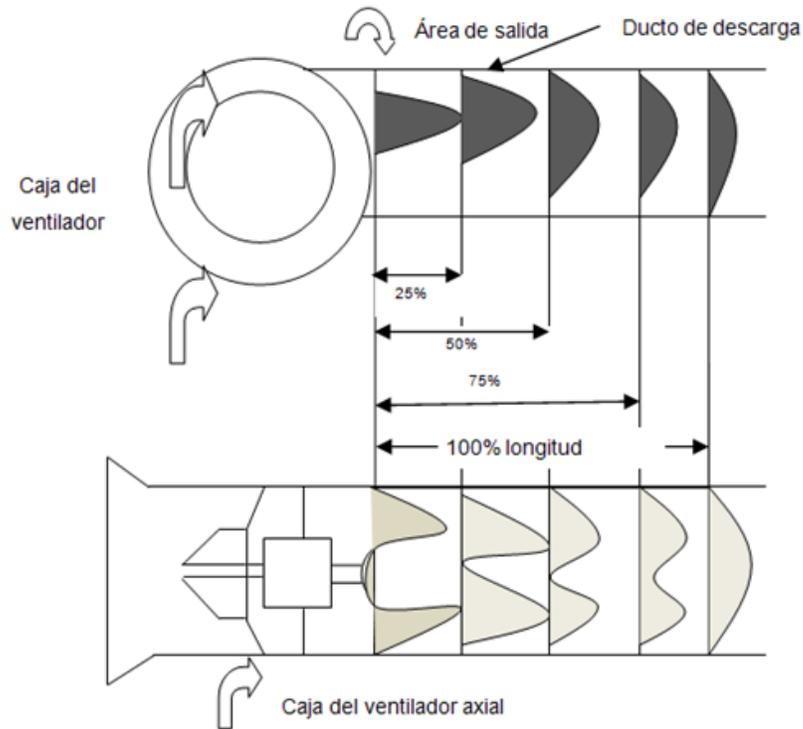


**Figura 2. Distribución del aire ideal en un almacén frigorífico (Dincer, 1997).**

Debido a que la transferencia de calor es mayor con los líquidos que con vapores, esta situación existe con frecuencia en aplicaciones de enfriamiento de aire donde la razón de flujo de calor desde la superficie interior hasta el refrigerante líquido es mucho mayor que la del aire a la superficie exterior. Por esta razón el uso de evaporadores aleteados para aplicaciones con enfriamiento de aire es muy utilizada (Dossat, 1998).

Los límites mínimos y máximo de temperatura dependen del tipo de ventilador y de la disposición de la transmisión. La temperatura de la corriente de aire está limitada en ventiladores que tienen motor, la transmisión y cojinetes en la corriente de aire. La temperatura de la corriente de aire también influye en la velocidad segura de funcionamiento de un ventilador, y está depende de los materiales de construcción. Por lo general, los aceros pierden resistencia al aumentar la temperatura, y se vuelven quebradizos si la temperatura es muy inferior a 0 °F; entonces, en ambos casos hay que reducir la velocidad. La mayor

parte de los ventiladores funcionan dentro de los límites de  $-25\text{ }^{\circ}\text{F}$  a  $1000\text{ }^{\circ}\text{F}$  y en cualquier caso en el que la temperatura no sea de  $70\text{ }^{\circ}\text{F}$ , es posible que se requiera corregir los límites estándar de velocidad de operación (Greene, 1992).



**Figura 3. Perfiles de velocidad a la salida del ventilador (Mc Quiston, 2003)**

En la Figura 3 se muestran los perfiles de velocidad de salida de los ventiladores, no están uniformemente distribuidos a través del ducto de salida hasta que el aire ha recorrido cierta longitud es denominada longitud de ducto efectiva. Para hacer mejor uso de la energía desarrollada por el ventilador, debe proporcionarse esta longitud de ducto en la descarga del ventilador (Mc Quiston, 2003, Carnicer, 2001).

### **1.1.2 Distribución de flujo de aire en almacenes refrigerados**

El mantenimiento de la uniformidad de la temperatura está ligado a la buena difusión de aire a través de la carga. La distribución del aire se hace por conductos y por suelos de aire soplantes.

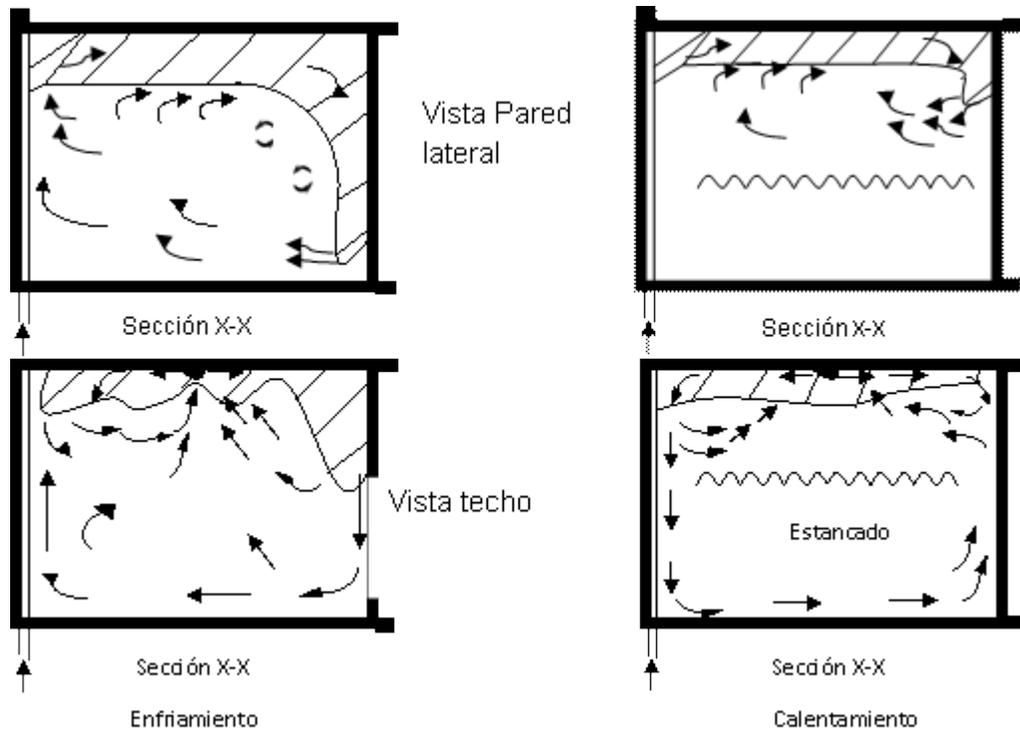
La difusión de aire correcta, así como la cantidad adecuada de aire acondicionado, es esencial para condiciones de confort en los sistemas por aire forzado. El aire acondicionado, se suministra normalmente a velocidades mucho mayores que las aceptables en la zona ocupada. La difusión de aire adecuada, por lo tanto, pide que (1) el arrastre de aire de la habitación por la corriente de aire primario fuera de la zona, y (2) neutralización de la convección natural y los efectos de la radiación dentro del almacén (ASHRAE,2002).

Las variaciones innumerables en la construcción de edificios, diseño del sistema, y los requisitos de funcionamiento, son problemas difíciles de resolver en la distribución del aire en el almacén:

- a. Selección y aplicación correcta de los puntos de suministro y consumo de retorno.
- b. Selección de los índices pertinentes de difusión de aire.
- c. Eliminación de los focos de conflicto en los sistemas existentes.
- d. La comparación de los estudios de campo de difusión de aire.
- e. La evaluación de otros factores que pueden afectar a la difusión del aire, tales como operaciones de carga y ventilador (funcionamiento del ventilador continuo o intermitente).
- f. La evaluación de los dispositivos de difusión de todo el aire antes de la instalación
- g. El diseño de puntos de suministro de salida.

A continuación se muestra la clasificación de los puntos de rendimiento del aire realizada por Straub, basada en el patrón primario del aire, el patrón de aire total y la circulación de aire en el almacén:

**Grupo A:** La salida es montada en o cerca del techo donde se descarga aire en horizontal. Este grupo incluye rejillas de flanco alto, difusores laterales, difusores de techo, difusores de techo lineales y salidas similares. El estándar de aire primeramente muestra un patrón horizontal de doble chorro para el flanco alto y a 360° el patrón de difusión para la salida en el techo. Aunque la variación de ajustes de las estibas podría causar una descarga en uno, dos o tres chorros en el caso de la salida por la pared lateral, o tienen un ángulo más pequeño de difusión para la salida de techo, el efecto general en cada uno es el mismo. Durante la refrigeración, el total de aire cae en la zona ocupada a cierta distancia de la salida, lo cual depende de la cantidad de aire, la velocidad, la diferencia de temperatura entre el suministro y la del aire en el almacén, el establecimiento de la deflexión, el efecto del techo y el tipo de carga dentro del espacio. La figura 4 muestra como el aire total cae a lo largo de la pared de enfrente y el flujo va lentamente de un lado a otro a cierta distancia del suelo. Esta condición debe ser evitada, ya que la región total se convierte en una zona de velocidad alta acompañada con depresiones de la temperatura. El esquema con vista del techo (Figura 4) muestra el movimiento de aire total se vea contrarrestado por el aumento corrientes de convección natural por el calentamiento de las paredes, y por tanto, cae antes de llegar a la pared. Ya que la descarga es de forma horizontal cerca del techo, el aire más cálido de la habitación se mezcla inmediatamente con aire primario frío muy por encima de la zona ocupada.

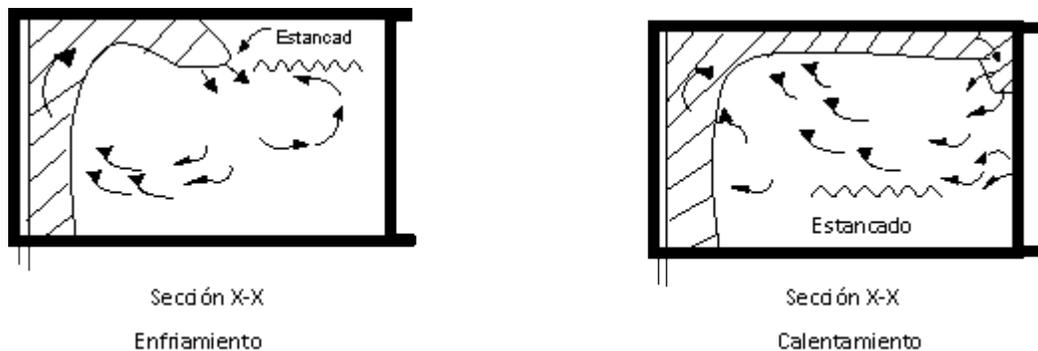


**Figura 4. Características del Grupo A (ASHRAE, 2002).**

Durante el calentamiento (Figura 4), el suministro de aire caliente en el techo puede causar estratificación en el espacio, si existe inducción insuficiente en la salida del aire del almacén. El caudal y la velocidad son las mismas para el calentamiento y enfriamiento, en el diagrama se muestra, que bajo estas condiciones, el aire total no desciende a lo largo de la pared. En consecuencia, las velocidades altas podrían ser benéficas en la eliminación de zonas de estancamiento, ya que la velocidad alta hace que en algunas zonas cálidas llegue el aire del nivel del suelo y contrarrestar la estratificación en la región estancada. La figura de calentamiento desde el techo, muestra el efecto de las corrientes de la convección natural que producen un gran lanzamiento hacia la pared fría expuesta.

**Grupo B.** Los puntos de salida están instalados en o cerca del piso donde la descarga de aire es vertical en un chorro no propagado. Este grupo incluye

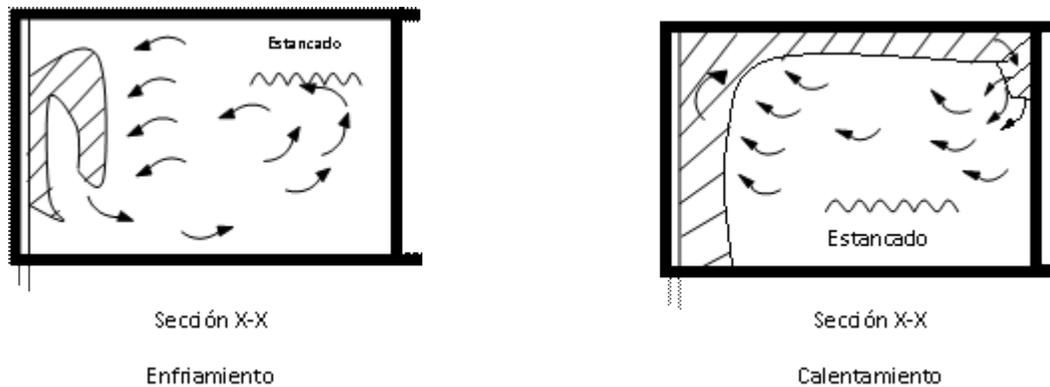
registradores de piso, unidades bordeadas de la base, rejillas de tipo lineal en el piso y salidas similares. Desde estas salidas no se tiene desviaciones de las paletas, el aire primario es descargado en un chorro simple vertical. Cuando el aire total, golpea el techo y los ventiladores en todas las direcciones desde el punto de contacto y durante el enfriamiento, sigue el techo por alguna distancia antes de caer a la zona ocupada. En el diagrama de enfriamiento (Figura 5), muestra que la forma en que la zona de estancamiento queda fuera de la región de aire total por encima de su punto terminal. Debajo de la zona de estancamiento, la temperatura es uniforme, efectuando el enfriamiento completo. También en el espacio por debajo del punto terminal el aire total es satisfactoriamente enfriado. La zona de estancamiento en calentamiento es pequeña en comparación al grupo A (Figuras 4 y 5). Esto se traduce a una mayor igualación de temperatura y menor dinamismo del aire total.



**Figura 5. Características del Grupo B (ASHRAE, 2002).**

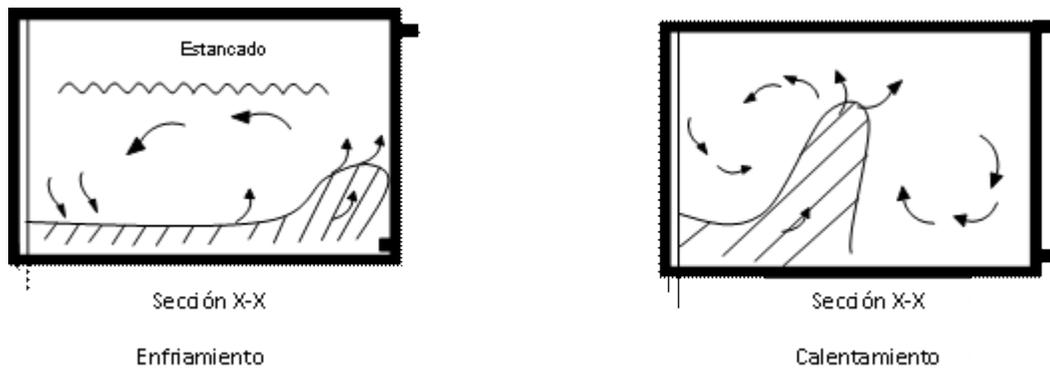
**Grupo C:** Las salidas son montadas (Figura 6) en o cerca del piso, la descarga de aire en un chorro de propagación vertical. Este grupo incluye difusores en el piso, difusores laterales, difusores de tipo lineal y otras salidas instaladas en el piso. Aunque se relaciona con los del grupo B, estos se caracterizan por que el chorro es propagado ampliamente. El aire total y el

aire del recinto son similares a los del grupo B, aunque la zona de estancamiento formada es grande durante el enfriamiento y pequeña durante el calentamiento. La difusión del aire total primario causa doblamiento del aire total en el aire primario y total durante el enfriamiento, en vez de seguir al techo. Esta acción de difusión de las salidas hace más difícil para proyectar el aire frío, pero proporciona una mayor área por inducción por aire en el recinto. Esta acción es benéfica durante el calentamiento por la inducción del aire desde las áreas bajas del almacén.



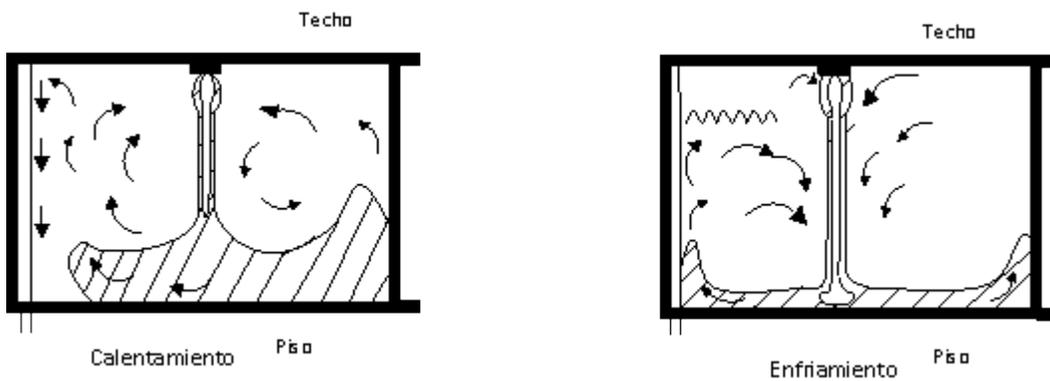
**Figura 6. Características del Grupo C (ASHRAE, 2002).**

**Grupo D:** Los puntos de salida están instalados en o cerca del piso donde la descarga de aire es horizontal. Este grupo incluye plataformas y registradores laterales bajos y salidas similares. Estas salidas descargan el aire primario en simple o múltiples chorros. Ya que el aire es descargado horizontalmente a través del piso, el aire total, durante el enfriamiento, permanece cerca del piso, y una gran zona de estancamiento forma en toda la región superior del recinto. Durante el calentamiento (Figura 7), el aire total se eleva hacia el techo a causa del efecto boyante de aire tibio, excepto en la región de aire total.



**Figura 7. Características del Grupo D (ASHRAE, 2002).**

**Grupo E:** Puntos de salida instalados en o cerca del techo donde el aire se proyecta de salidas similares, montadas para que la proyección del aire baje de forma vertical. Durante el enfriamiento (Figura 8), el aire total es proyectado al seguimiento del piso, produciendo una región de estancamiento cerca del techo. Durante el calentamiento, el aire total alcanza el piso y dobla hacia el techo. Si el aire no se proyecta hasta el piso, se produce una zona de estancamiento (ASHRAE, 2002).



**Figura 8. Características del Grupo E (ASHRAE, 2002).**

El análisis del rendimiento de salida está basado primeramente en el patrón de aire, en el patrón de aire total, la capa de aire estancado, en las corrientes de convección natural, patrón de aire de retorno y el movimiento del aire en el recinto. Durante el enfriamiento, el total de aire que cae dentro de la zona ocupada a una distancia desde la salida, depende en la cantidad de aire, la velocidad de suministro, la diferencial de temperatura entre la salida del aire y el recinto, establecimiento de la desviación, efecto del techo, y el tipo de carga con el espacio.

Para la distribución uniforme y aspiración del aire, se puede dotar o adicionar a la caja conductos o canales con bocas reguladas por mamparas o deflectores. La forma clásica es de sección rectangular, montados contra el techo. Tienen la desventaja de obstruir el espacio, si no es en la planta más alta de los locales, desde ser dejada libre de estibamiento, una altura parecida al menos aquella de los conductos. Es útil que las bocas impulsantes en correspondencia de los pasillos de pasen entre las estibas de los productos, de modo de que el tiro de aire llegué hasta el piso.

### **1.1.3 Manejo del producto y modelos de estibamiento**

La capacidad de carga se entiende como la cantidad de producto por hora o por día que tiene la capacidad de enfriar una instalación determinada, no debe entrar en la cámara más producto que aquella que la capacidad refrigeradora de la misma permita.

La densidad de la carga, es la cantidad de productos que pueden ser estibados en un metro cúbico de espacio completamente lleno. Debe ser tal que, por lo menos el 10% del total del volumen de la cámara quede libre; sin ello la circulación y penetración del aire se ven enormemente dificultados y el enfriamiento no es el correcto, ni una distribución regular ni en cantidad adecuada, influyendo en la temperatura.

El volumen bruto de un almacén es el espacio geoméricamente comprendido entre sus paredes, el piso y el techo.

El volumen útil, es el volumen bruto menos el volumen ocupado por los equipos productores de frío.

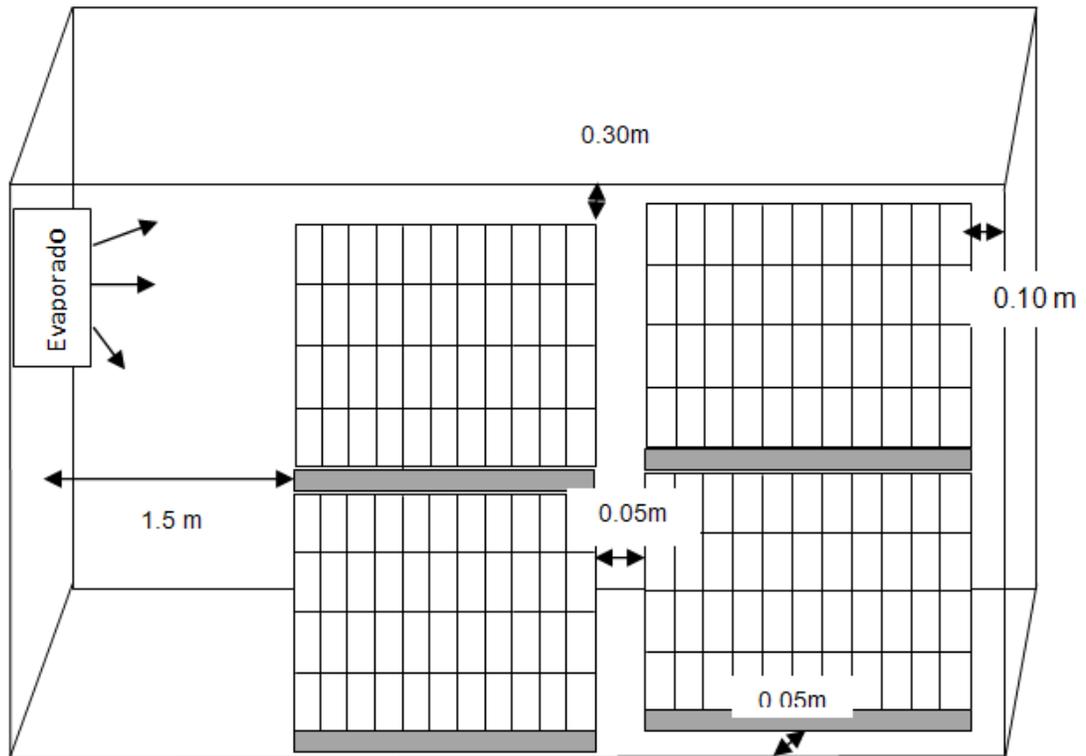
El volumen neto, es el volumen útil menos los espacios ocupados por los pilares o equipo, o los que deben ser dejados libres a lo largo del piso, paredes y techos para regular la distribución del aire y el tráfico interno (Durán, 1984).

#### **1.1.4 Estibado**

Los criterios de estibado se presenta en la figura 9 y se describen a continuación.

- a) La altura de carga no tiene otros límites que la altura del frigorífico; debe guardarse una separación libre entre la parte superior de la carga y el techo, que oscila entre 30 y 40 cm en el punto de mínima separación, en el caso más frecuente, en que los ventiladores están situados en el extremo de la cámara.
- b) Considerando la altura de los embalajes se procura que la carga compacta de los mismos no sea superior de seis embalajes de altura, situado en una tarima, para facilitar el paso de aire (Velázquez, 1996).
- c) Cualquiera que sea el tipo de frigorífico, deben dejarse las siguientes separaciones: en el techo se procederá como ya sea dicho con anterioridad, en las paredes laterales se debe de dejar un espacio libre no inferior a los 5 cm y en la de fondo las tarimas deben dejar un espacio libre no inferior de 10 cm, el espacio entre tarima y tarima debe ser mayor de 10 cm, considerando que el evaporador y ventiladores en un extremo, debe cargarse dejando sin hacerlo en una franja cuya anchura sea como mínimo igual a la que ocupa el evaporador y por debajo de

este, 1.5 m en sistemas con ventilación forzada, prever también pasillos o espacios libres que permitan las visitas de la inspección de las cargas (Velázquez, 1996; Melgarejo, 2000).



Sección longitudinal

**Figura 9. Criterios de Estibado.**

Tanto la disposición como el estibado se realizan pensando, esencialmente en la buena circulación y penetración del aire impulsado por los ventiladores. Se debe tener presente la disposición de los embalajes con respecto a los ventiladores; en las cámaras con ventiladores en un extremo, es importante que las tarimas se coloquen en su máxima dimensión (longitudinalmente), paralelos a la máxima longitud de la cámara, así el número de pasillos es muy superior al que se obtendría si los embalajes se dispusieran en sentido transversal e impiden la

circulación del aire. Cuando los ventiladores están en un extremo, es importante que en el estibado y disposición de los embalajes, así como el establecimiento de pasillos o corredores, se tengan en cuenta las siguientes medidas:

- 1) No crear pasillos preferenciales, más anchos que otros, para la circulación o retorno de aire, en tal caso éste se canaliza por los citados pasillos en deterioro de aquellos que son estrechos.
- 2) En el extremo opuesto a los ventiladores, la altura de estibado debe ser la misma, formando una línea continua que obligue al aire impulsado por los ventiladores a girar encima de ella de manera uniforme (Velazquez, 1996).

#### **1.1.4.1 Modelos de estibamiento**

Para facilitar las maniobras de los productos al interior del almacén frigorífico, se utilizan una gran variedad de elementos auxiliares, de los que tres son esenciales.

El apilamiento en bloque se toma en cuenta cuando se requiere un guardado profundo de mercancías, ya que dará un volumen neto alto de los actuales productos almacenados. Es necesario donde se guardan tarimas en bloque, tener un espacio de no menos de 40 cm, entre la cimbras de las columnas de paletas y el techo del lugar frigorífico, para permitir una adecuada circulación de aire. El espacio deberá permitir entre las columnas de paletas un buen guardado de tarimas. El apilado entre paletas no debe permitir que se alcance el exterior de las paredes, puede causar que la tarima más alta de una columna se incline y alcance la pared, el apilado puede caer e impedir la circulación de aire; pueden traer como consecuencia, el aumento de temperatura dentro de la cámara (Clive, 1990).

##### **A) Tarimas.**

Son utilizadas debido a las ventajas que ofrecen, aprovechamiento del espacio vertical y la superficie del piso, movimiento y elevación de cargas mecánicamente,

ahorro de hasta 80% del costo de manejo de mercancías, ya que se requiere menos número de personas, manejo de mercancías con mayor rapidez, simplificación al preparar inventarios (Bancomext, 2010).

Las tarimas pueden hacerse simples o dobles, con dimensiones homologadas que permitan la paletización los cuales son de 100 x 120 y 180 x 120 cm, aunque también hay de 120 x 120, pueden ser de madera, plástico, acero, madera reforzada con acero, aluminio o de tablero de fibra.

Se construyen de las siguientes formas: largueros nivelados o bloques externos nivelados con los extremos del entablado, donde terminan dentro del entablado superior pero están nivelados con los extremos del entablado inferior para dar cabida a eslingas de barra u otros dispositivos para mover tarimas (Figura 10).

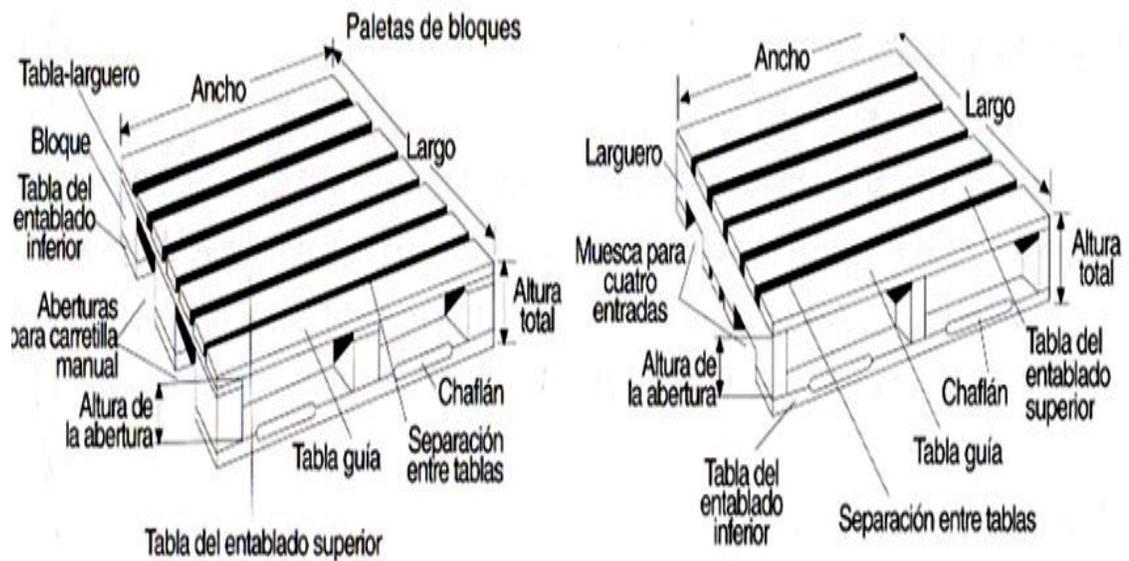
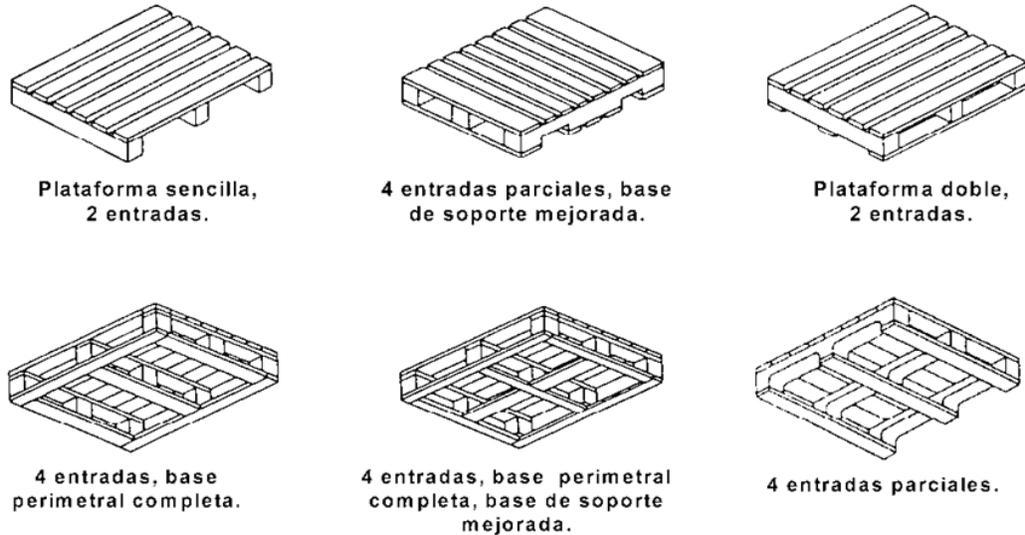


Figura 10. Elementos de una tarima (Bancomext, 2010).



**Figura 11. Ejemplos de tipos de tarimas (Bancomext, 2010).**

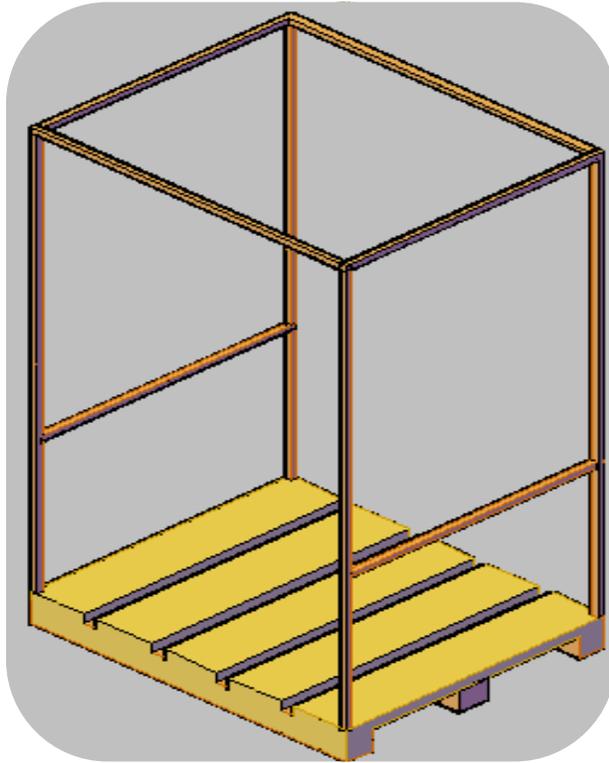
Los tipos de tarimas (Figura 11) más comunes son:

- a. Plataforma de dos entradas, que permitan la entrada de horquillas elevadoras o carretillas manuales de dos costados solamente y en direcciones opuestas.
- b. Plataforma de cuatro entradas, que permite la entrada desde los cuatro costados.

## B) Convertidor

Un convertidor de tarimas es una estructura de metal unida a una tarima de madera y queda por encima del material (Figura 12), para asegurar la carga y permitir el apilado en cargas unitarias, sin estructuras convencionales de almacenaje. No resultan económicos por posición de la tarima, pero pueden utilizarse de este modo en ciertos casos, hasta seis niveles con cargas limitadas a 1 ton por tarima. Se puede organizar mejor el almacén multiplicando el espacio y dinero ya que permiten un máximo aprovechamiento vertical del espacio. Ofrece una máxima protección de los productos contra la humedad, manejo deficiente,

caídas y extravío (Velázquez, 1996). Son útiles cuando los materiales no tienen rigidez o estabilidad para apilarlos en el piso y cuando hay gran número de unidades de almacenamiento en existencia. A veces se colocan varias hileras de tarimas y esto ahorra espacio en el piso por comparación con bastidores o estantes para tarimas que requieren acceso desde los pasillos. Se puede desmontar si no se requiere apoyo para la carga que está en la tarima.



**Figura 12. Convertidor.**

### C) Tipos de *Racks*.

Es una estructura metálica que se constituye de perfiles, largueros y cabeceras; que se troquelan, sueldan y se sujetan por medio de tornillos de alta resistencia.

En los centros de distribución es necesaria la implementación de *racks*, para lograr una respuesta eficiente, flexible y dinámica a los clientes, además de que se

reducen costos en las empresas, aumentan la productividad y las ventas. Se maximiza el potencial del área donde se pretende almacenar, así lograr el valor agregado en ahorros por rentas de espacios y aumentos de mercancías.

- *Rack* dinámico. Las estanterías dinámicas para el almacenaje de productos estibados son estructuras compactas que incorporan caminos de rodillos, colocados con una ligera pendiente que permite el deslizamiento de las tarimas sobre ellos. Las paletas se introducen por la parte más alta de los caminos y se desplazan (Figura 13), por gravedad y a velocidad controlada, hasta el extremo contrario, quedando dispuestas para su extracción. La estiba dinámica por gravedad es un sistema idóneo para las siguientes áreas en las que se trabaja con productos estibados:

- Almacenes de productos perecederos.
- Almacenes intermedios entre dos zonas de trabajo.
- Zonas de expedición en las que se necesita una gran agilidad en la extracción de paletas.
- Almacenes de espera (pedidos preparados, canales para clasificación en circuitos automáticos, etc.).

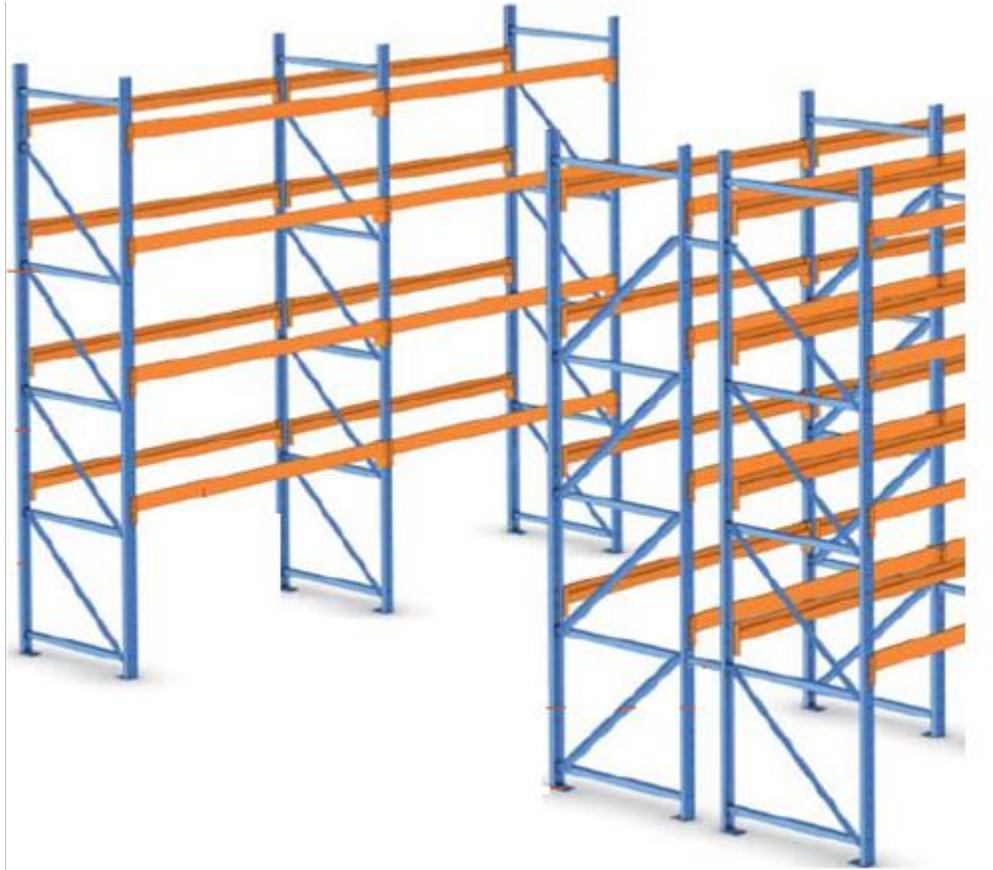
En esta estructura de estanterías pueden disponerse diferentes niveles dinámicos sobre soportes de regulación. Estos niveles forman una unidad completa cuya inclinación o incluso altura entre pisos puede variarse a intervalos muy reducidos. Los carriles de roldanas estables garantizan una circulación perfecta de los contenedores desde la entrada a la salida de almacén.



**Figura 13. Rack dinámico (Mecalux, 2009)**

- *Rack* selectivo. Los sistemas de estanterías de una sola posición son especialmente adecuados para mercancías con idéntica superficie de base, pero distinta altura. En especial, cuando se trata del almacenamiento de pocos artículos diferentes en cantidades muy grandes, las estanterías de una sola posición son muy eficaces.

Se utilizan para almacenaje de tarimas con mercancías de medio a gran volumen y de una carga de media a muy elevada, por ejemplo para servicios logísticos o en almacenes de distribución (Shaffer, 2006, Mecalux, 2009).



**Figura 14. Rack selectivo (Mecalux, 2009)**

- Conducido en *rack* (*Rack drive in*). Se suele utilizar en bodegas donde hay muchos artículos del mismo tipo. Como se necesitan muy pocos pasillos para que maniobre el montacargas, la mayor parte del espacio disponible se puede dedicar a superficie de almacenamiento. Ofrece un almacenamiento de productos tipo L.I.F.O. (primeras entradas primeras salidas), puesto que la última tarima almacenada es la primera tarima que recoge el montacargas.

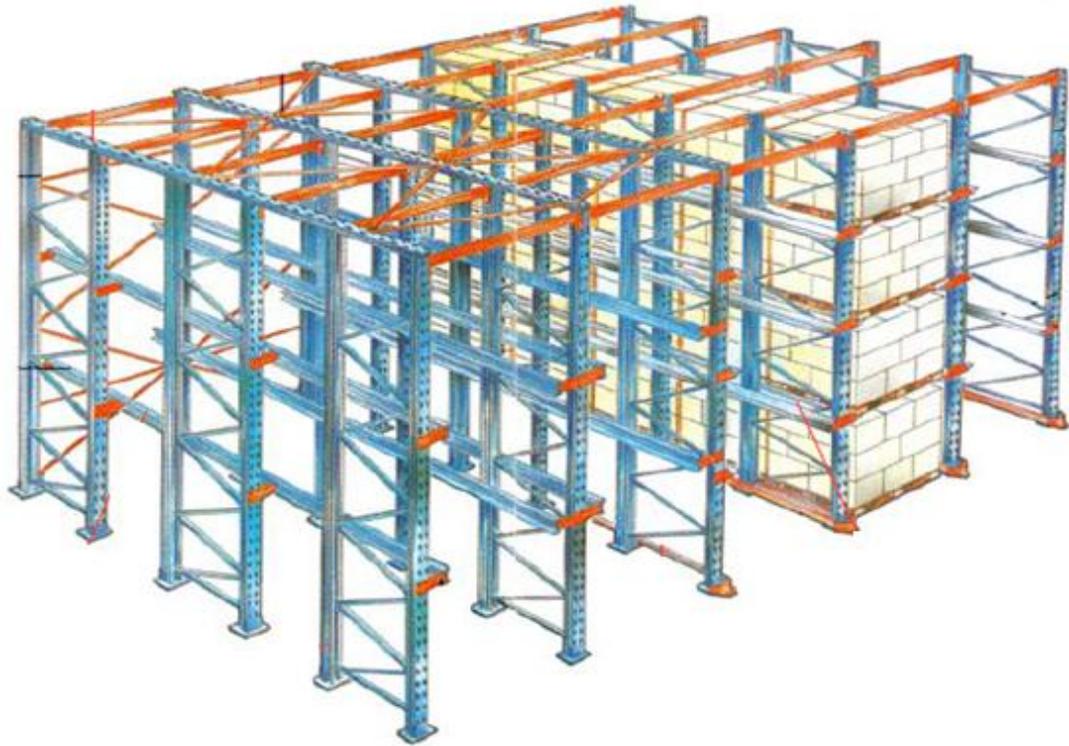
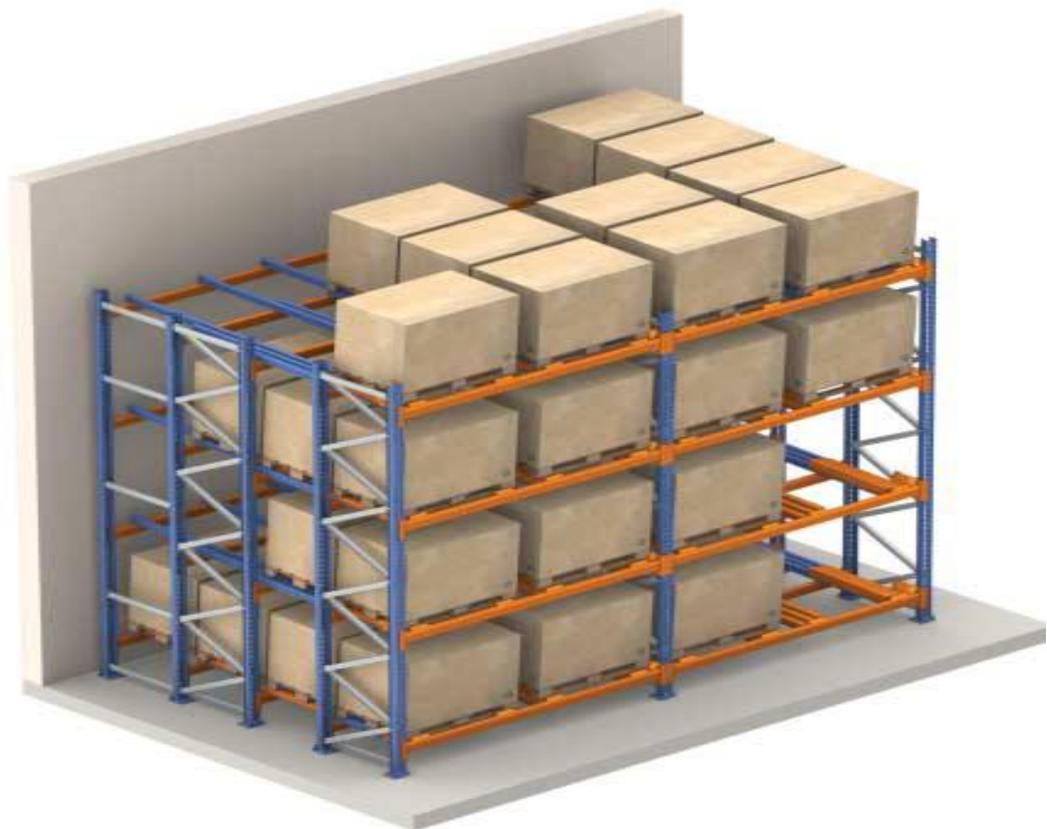


Figura 15. Rack Drive in (Mecalux, 2009)

Está formado por *racks* distribuidos en forma de pasillo de carga, con carriles guía en los laterales. Los montacargas circulan por estos pasillos interiores, con la carga levantada por encima del nivel donde se va a depositar. Se necesitan muy pocas calles para que maniobre el montacargas, la mayor parte del espacio disponible se puede dedicar a superficie de almacenamiento. Por ello, el *rack drive* reduce significativamente la superficie ocupada por racks, en comparación con el *rack selectivo*. El máximo aprovechamiento de la bodega es del 60 al 80 % (Mecalux, 2009).

- *Rack por empuje (push back)*. Es un sistema de almacenaje por acumulación que permite almacenar hasta cuatro tarimas en fondo por nivel. Todas las paletas de cada nivel, a excepción de la última, se depositan sobre un conjunto de carros que se desplazan, por empuje, sobre los carriles de rodadura.

Estos carriles están montados con una ligera inclinación, siendo la parte delantera la de menor altura, para permitir que las paletas posteriores avancen cuando se retira la que da al pasillo. Las tarimas depositadas en cada nivel han de ser de la misma referencia y se gestionan por el principio LIFO. Cada nivel de estantería incorpora dos o tres carros paralelos con alturas diferentes. La carretilla deposita la primera tarima sobre el conjunto de carros paralelos más elevado. Con la segunda tarima a almacenar, la carretilla empuja la primera hasta descubrir el siguiente par de carros y deposita la paleta sobre ellos y la última se apoyará directamente sobre los carriles de rodadura, no sobre los carros. Para retirar las tarimas se invierte la forma de actuar, de manera que al retirar la primera paleta las demás se desplazan una posición hacia el pasillo (Mecalux, 2009).



**Figura 16. Rack push back (Mecalux, 2009)**

### **1.1.4.2 Equipos de carga**

Los niveles de inventario que se deben mantener determinan el tipo y número de unidades del equipo de almacenamiento. El volumen de movimiento son factores decisivos en la selección del equipo para manejo de los productos. Los más utilizados son el patín y el montacargas.

- 1) Patines. Se utilizan para la demanda de paso rápido de carga/descarga, cualquier área donde la mayor maniobrabilidad es requerida. Para todo tipo de tarima, pueden llevar tres cargas sobre ruedas simultáneamente cuando son de horquillas largas (Mommat, 2009).



**Figura 17. Patín de carga (Mommat, 2009)**

- 2) Montacargas. Algunas características generales de los montacargas son: alta capacidad de manejo de carga, motores de baja o nula emisión de contaminante y controles para el operador. Permiten el aumento de la altura constructiva de los almacenes refrigerados. Los que se utilizan en la

industria de alimentos son los eléctricos, es importante tomar en cuenta lo largo del montacargas y que se ajuste al ancho del pasillo.



**Figura 18. Montacargas (Crown 2009)**

## **1.2 Simulación de procesos frigoríficos**

La simulación se define como una técnica numérica empleada para realizar experimentos con ciertos tipos de modelos matemáticos que describen el comportamiento de un sistema complejo, en una computadora digital y durante períodos prolongado. La principal diferencia entre un experimento de simulación y uno real es que, en el primer caso, el experimento se lleva a cabo con un modelo del sistema real; en lugar de hacerlo con el sistema propiamente dicho. La

estructura de los simuladores de procesos involucra dos trayectorias constituidas por un conjunto de ecuaciones que reproducen en forma aproximada el comportamiento de un equipo y cuya aplicación es particular a un proceso específico (Miranda, 2002).

La simulación es la operación del modelo, que se realiza con el fin de obtener información sobre el comportamiento del sistema, bajo las condiciones exteriores que se espera del prototipo.

### **1.2.1 Modelación matemática**

Un modelo es una representación de un objeto, sistema o idea en alguna forma diferente a la entidad misma. Su propósito es usualmente ayudar a explicar entender o mejorar un sistema. Los modelos se refieren a los cambios espacio-tiempo real que sufren algunos atributos de interés, se ha mostrado que un lenguaje muy apropiado para la descripción de modelos es la matemática, capturan las interacciones y relaciones lógicas del sistema que se esté modelando. En investigación y desarrollo se determinan mecanismos y parámetros de plantas piloto, explorando los efectos de diferentes condiciones de operación para estudios de optimización, agregando cálculos a escala. En diseño se escala y calcula el tamaño de equipos de proceso para ejecución dinámica; estudiando las interacciones de varias partes de los procesos.

### **1.2.2 Método del elemento finito**

El método del elemento finito es simplemente una técnica numérica para obtener la solución aproximada de un problema de campo. Convierte el manejo de ecuaciones diferenciales en un conjunto de ecuaciones algebraicas lineales, y su gran aceptación se debe principalmente a la facilidad; con estas ecuaciones pueden resolverse por computadora.

El fundamento matemático del método del elemento finito fue establecido al principio del siglo veinte por Ritz y Galerkin. Basado en cálculos varacionales, Ritz desarrolló en 1909 un método para la solución parcial de las ecuaciones diferenciales. El asumió en una solución aproximada la ecuación diferencial que rige puede ser representada por una serie de funciones analíticas (pruebas de función), con coeficientes desconocidos. Determinó estos coeficientes reduciendo al mínimo una función con respecto a éstos coeficientes. El método se limita a los problemas de minimización equivalente que pueden ser establecidos, lo cual no siempre es el caso.

En 1915 Galerkin, presenta un método relacionado para el cálculo de equilibrio elástico de placas delgadas. Como en el método de Ritz, expresó la solución parcial de las ecuaciones diferenciales como series de funciones con coeficientes desconocidos. La sustitución de la solución aproximada en la ecuación diferencial produce en general un residual distinto a cero (Tijskens, 2004).

El cálculo vectorial es el lenguaje natural para tratar los problemas de campo. El (vector) gradiente de un campo escalar,  $u$ , se denota como  $\nabla u$ ; la divergencia (escalar) de un campo vectorial  $\mathbf{v}$  se denota  $\Delta^* \mathbf{v}$ . Se dan por hecho resultados tales como  $\nabla^* (uv) = \nabla u + u \nabla^* v$  y ocasionalmente se usará el teorema de la divergencia. La mayor parte del análisis se desarrolla primero en problemas bidimensionales y después se generaliza a problemas tridimensionales. El método del elemento finito concentra su atención en puntos particulares o *nodos* en la región de la solución, y la mayor parte del análisis se refiere a escalares, vectores o matrices asociados con los nodos. Dichas cantidades contienen subíndices que indican el o los nodos a los que están asociados (Tijskens, 2004).

### **1.2.2.1 Comparación de diferencias finitas y elemento finito**

Los métodos más utilizados para la resolución de ecuaciones, son el del elemento finito y de diferencias finitas; a continuación se enlistan, las ventajas y desventajas del elemento finito contrapuesto con el de diferencias finitas.

Las ventajas del elemento finito comparado con el método de diferencias finitas son:

- La variación espacial de las propiedades de los materiales se puede manejar fácilmente.
- Las regiones irregulares pueden ser modeladas con gran exactitud.
- Se adecua mejor a problemas no lineales
- El tamaño del elemento puede ser variado fácilmente
- La interpolación espacial es mucho más significativa.
- Los problemas con condiciones limite mezcladas son fáciles para manejar.

Las desventajas son:

- Las ecuaciones discretas son usualmente matemáticamente más complejas.
- El método requiere más recurso de la computadora para el mismo problema.

Las aplicaciones del método de elemento finito incluye la simulación de transferencia de calor por conducción en alimentos con formas geométricas complicadas. Se ha prestado especial atención a los métodos de elementos finitos estocásticos los cuales fueron desarrollados para tener en cuenta la variabilidad aleatoria del producto y los parámetros de los procesos.

### 1.2.3 Simulación con *Visual Basic*

Existen distintos tipos de lenguajes de programación. En los primeros tiempos de las computadoras, los programas eran de tipo secuencial (también llamados tipo *batch*) Un programa secuencial es un programa que se arranca, lee los datos que necesita, realiza los cálculos e imprime o guarda en el disco los resultados; mientras un programa secuencial está ejecutándose no necesita ninguna intervención del usuario. A este tipo de programas se les llama también programas basados u orientados a procedimientos o a algoritmos (*procedural languages*). Este tipo de programas siguen utilizándose ampliamente en la actualidad, pero la difusión de los PCs ha puesto de actualidad otros tipos de programación. Los programas interactivos exigen la intervención del usuario en tiempo de ejecución, bien para suministrar datos, bien para indicar al programa lo que debe hacer por medio de menús. Por su parte los programas orientados a eventos son los programas típicos de *Windows*, tales como *Netscape*, *Word*, *Excel* y *PowerPoint*. Cuando uno de estos programas ha arrancado, lo único que hace es quedarse a la espera de las acciones del usuario, que en este caso son llamadas eventos. El usuario dice si quiere abrir y modificar un fichero existente, o bien comenzar a crear un fichero desde el principio. Estos programas pasan la mayor parte de su tiempo esperando las acciones del usuario (eventos) y respondiendo a ellas. Las acciones que el usuario puede realizar en un momento determinado son variados, y exigen un tipo especial de programación: la programación orientada a eventos.

Es uno de los tantos lenguajes de programación que se encuentran hoy en día, con el propósito de servir a aquellas personas que estaban interesadas en iniciarse en algún lenguaje de programación, la versión del año 2008 es la 6, que se incluye en el paquete *Visual Studio 6* de *Microsoft*. Esta versión combina la sencillez del *Basic* con un poderoso lenguaje de programación *Visual* que juntos permiten desarrollar robustos programas. Es un lenguaje de programación visual de cuarta generación, esto quiere decir que un gran número de tareas se realizan

sin escribir código, simplemente con operaciones gráficas realizadas con el ratón sobre la pantalla.

La aplicación *Visual Basic* de *Microsoft* puede trabajar de dos modos distintos: en modo de diseño y en modo de ejecución. En modo de diseño el usuario construye interactivamente la aplicación, colocando controles en el formulario, definiendo sus propiedades, y desarrollando funciones para gestionar los eventos. La aplicación se prueba en modo de ejecución. En ese caso el usuario actúa sobre el programa (introduce eventos) y prueba cómo responde el programa. Hay algunas propiedades de los controles que deben establecerse en modo de diseño, pero muchas otras pueden cambiarse en tiempo de ejecución desde el programa escrito.

En la terminología de *Visual Basic 6.0* se llama formulario (*form*) a una ventana. Un formulario puede ser considerado como una especie de contenedor para los controles. Una aplicación puede tener varios formularios, pero un único formulario puede ser suficiente para las aplicaciones más sencillas. Los formularios y los distintos tipos de controles son entidades genéricas de las que puede haber varios ejemplares concretos en cada programa. En programación orientada a objetos (más bien basada en objetos, habría que decir) se le llama así a estas entidades genéricas, mientras que se llama objeto a cada ejemplar de una clase determinada. Por ejemplo, en un programa puede haber varios botones, cada uno de los cuales es un objeto del tipo de control *command button*, que sería la clase. Cada formulario y cada tipo de control tienen un conjunto de propiedades que definen su aspecto gráfico (tamaño, color, posición en la ventana, tipo y tamaño de letra, etc.) y su forma de responder a las acciones del usuario (si está activo o no, por ejemplo). Cada propiedad tiene un nombre que viene ya definido por el lenguaje. Por lo general, las propiedades de un objeto son datos que tienen valores lógicos (True, False) o numéricos concretos, propios de ese objeto y distintos de las de otros objetos de su clase. Así pues, cada clase, tipo de objeto o control tiene su conjunto de propiedades, y cada objeto o control concreto tiene

unos valores determinados para las propiedades de su clase. Casi todas las propiedades de los objetos pueden establecerse en tiempo de diseño y también casi siempre en tiempo de ejecución. En este segundo caso se accede a sus valores por medio de las sentencias del programa, en forma análoga a como se accede a cualquier variable en un lenguaje de programación. Para ciertas propiedades ésta es la única forma de acceder a ellas. Por supuesto *Visual Basic 6.0* permite crear distintos tipos de variables, como más adelante se verá. Se puede acceder a una propiedad de un objeto por medio del nombre del objeto a que pertenece, seguido de un punto y el nombre de la propiedad (García, 1999).

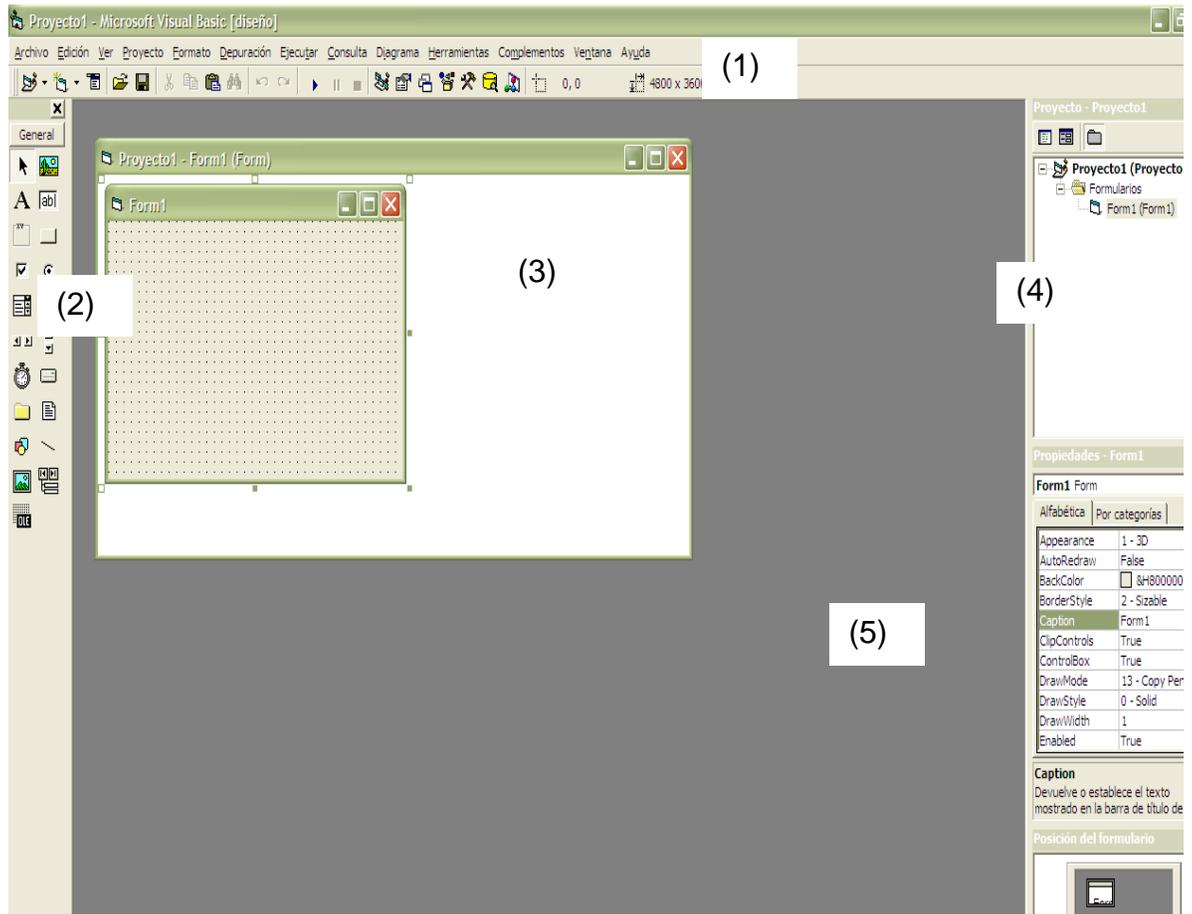


Figura 19. Elementos gráficos de Visual Basic 6.0

En la Figura 19 se muestra los diferentes elementos que conforman la pantalla de *Visual Basic 6.0*, los cuales son la barra de títulos, menús y herramientas situados en la parte superior de la pantalla (1). Del lado izquierdo la caja de herramientas o *toolbox* con los controladores disponibles (2). En el centro está el formulario donde se puede ir situado los controles, tiene una rejilla para facilitar la ubicación de estos (3). La ventana de proyecto, que muestra los formularios y otros módulos de programas que forman parte de la aplicación, está arriba a la derecha.

La ventana de propiedades, en la que se pueden ver las propiedades del objeto seleccionado o del propio formulario en el centro a la derecha (4). Si esta ventana no aparece, se puede hacer visible con la tecla <F4>.

Ventana *form layout*, que permite determinar la forma en que se abrirá la aplicación cuando comience a ejecutarse abajo a la derecha (5).

Existen otras ventanas para edición de código (*Code Editor*) y para ver variables en tiempo de ejecución con el depurador o *Debugger* (ventanas *Immediate*, *Locals* y *Watch*).

## **CAPÍTULO 2. METODOLOGÍA DE INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL**

### **2.1 Descripción de la metodología**

#### **Objetivo general.**

Predecir el efecto de los diferentes modelos de estibamiento sobre los patrones del flujo de aire en un almacén frigorífico, mediante el método del elemento finito para la adecuación de los factores de acondicionamiento interno en el manejo de alimentos a bajas temperaturas.

#### **Objetivos particulares.**

1. Definir las ecuaciones de transferencia de calor y movimiento, mediante la evaluación del comportamiento de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire dentro de la instalación, que permita la modelación del almacén frigorífico.
2. Establecer las condiciones de frontera que se utiliza en la resolución de las ecuaciones de transferencia de calor y movimiento mediante el diseño de un *software* de aplicación para la simulación del comportamiento del flujo de aire, humedad relativa y temperatura en un almacén frigorífico.

## 2.2 Selección y justificación de variables

La eficiencia de los procesos de enfriamiento con aire forzado se mide por el tiempo del proceso y uniformidad de la temperatura. El posicionamiento y orientación de las tarimas, la distribución del flujo de aire; son efectos significativos en los patrones de temperatura, velocidad y humedad relativa. En estudios recientes realizados en el 2009 por Mustafa y colaboradores determinaron que para optimizar el diseño, deben ser conocidos los patrones de flujo de aire y la distribución de temperatura.

Se experimentó con los modelos de estibamiento y la distribución de flujo de aire (Tabla 1), variándolos en tres niveles, dando de respuesta los perfiles de temperatura, velocidad y humedad del aire.

**Tabla 1. Tabla de variables.**

Factor de variación	Niveles de variación	Número de repeticiones	Variables dependientes	Variables de respuesta	Instrumentos de medición
Modelo de estibamiento	-Estibamiento directo -Convertidores -Tipo <i>rack</i>	3	-Temperatura del aire  -Velocidad del aire	-Perfil de temperatura  -Perfil de velocidad	-Termopares  -Anemómetro  -Higrómetro con puerto USB
Distribución del flujo de aire	Longitudinal  Transversal  Vertical		-Humedad relativa del aire	-Perfil de humedad relativa	

## 2.3 Análisis estadístico

La experimentación se basó en un diseño factorial  $3^2$ , empleando tres niveles de variación para los dos factores. Cada evento se realizó por triplicado. En la tabla 2, se muestran la combinación de variables.

**Tabla 2. Experimentos a realizar con las variables de estudio, de acuerdo con el diseño de experimentos con el análisis factorial.**

<b>Evento</b>	<b>Modelo</b>	<b>Flujo</b>
1	Convertidor	Longitudinal
2	<i>Rack</i>	Transversal
3	<i>Rack</i>	Longitudinal
4	Directo	Vertical
5	Convertidor	Transversal
6	<i>Rack</i>	Vertical
7	Directo	Longitudinal
8	Convertidor	Vertical
9	Directo	Transversal
10	Convertidor	Longitudinal
11	<i>Rack</i>	Transversal
12	<i>Rack</i>	Longitudinal
13	Directo	Vertical
14	Convertidor	Transversal
15	<i>Rack</i>	Vertical
16	Directo	Longitudinal
17	Convertidor	Vertical
18	Directo	Transversal
19	Convertidor	Longitudinal
20	<i>Rack</i>	Transversal
21	<i>Rack</i>	Longitudinal
22	Directo	Vertical
23	Convertidor	Transversal
24	<i>Rack</i>	Vertical
25	Directo	Longitudinal
26	Convertidor	Vertical
27	Directo	Transversal

## 2.4 Materiales y métodos

### 2.4.1 Validación de termopares

De acuerdo a ITS (*International Temperature Scale 90*), la validación de termopares se basa en un número suficiente de temperaturas conocidas, algunas de las cuales pueden ser puntos fijos, para que con algunos métodos estadísticos se obtenga el valor que se utiliza para corregir la temperatura. A continuación se muestra los cálculos estadísticos que se deben seguir (Tabla 3) para la validación de los termopares.

**Tabla 3. Cálculos estadísticos para la validación de termopares**

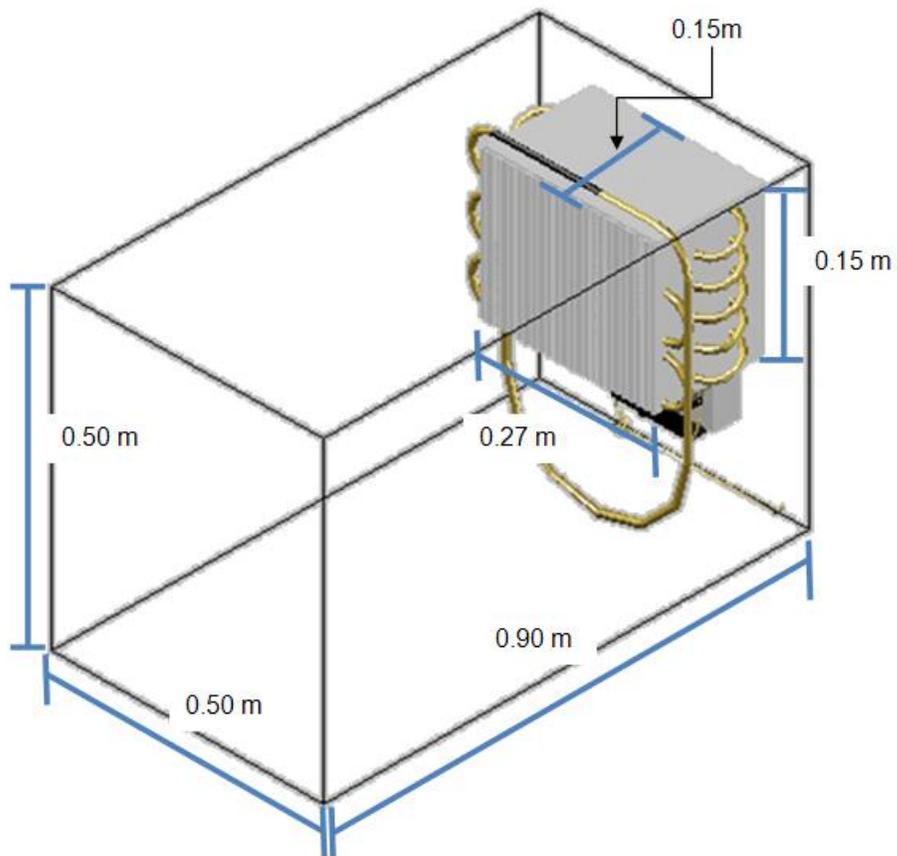
<b>Tiempo (min)</b>	<b>T<sub>termopar</sub> (°C)</b>	<b>T<sub>termómetro</sub> (°C)</b>
<b>Relación</b>	$T_{\text{termopar}}/T_{\text{termómetro}}$	
<b>Promedio relación</b>		
<b>Desviación estándar</b>		
<b>Coef. Var.</b>		

### 2.4.2 Caracterización del almacén frigorífico piloto

Para la modelación del almacén frigorífico piloto, se utilizó un prototipo de un túnel de congelación que se construyó con anterioridad y en base a sus medidas, se diseñó la distribución de la carga, los pasillos, los techos, las tarimas, convertidores, *racks*; a una escala de 1:20.

Se identificaron cada uno de los componentes de la instalación para realizar las siguientes mediciones:

- La altura, anchura y longitud interna del almacén frigorífico interno.
- Las dimensiones del evaporador.
- Velocidad del aire a la salida del evaporador.
- Tiempo del ciclo de refrigeración.



**Figura 20. Dimensiones del almacén frigorífico piloto**

### **2.4.3 Localización de los puntos críticos en la cámara**

De acuerdo a la bibliografía (Figura 20). Para una visión general de la estratificación de las temperaturas se colocaron termopares en diferentes lugares predeterminados:

- Termopar 1: Salida del aire del evaporador. Es la temperatura más baja del aire, cuando el equipo estaba en funcionamiento.
- Termopar 2: Entrada del aire del evaporador. Es una de las temperaturas más altas, al funcionar el equipo (Herrero, 1992).
- Termopar 3, 11: Situados entre la pared de fondo y la parte posterior de la carga. Son unas de las temperaturas más altas cuando el equipo está parado.
- Termopar 4, 12: Situados en el centro de la carga y cerca del techo. Una de las temperaturas más altas cuando el equipo está parado.
- Termopar 5, 9: Situados en el centro del pasillo. Temperaturas bajas al funcionar el equipo.
- Termopar 6, 8: Se localizan en la parte frontal de la carga y donde el aire choca con esta. Indica la temperatura más fría del producto.
- Termopar 7,10. Situados entre las paredes laterales y la carga. Son unas de las temperaturas más altas cuando el equipo está parado.

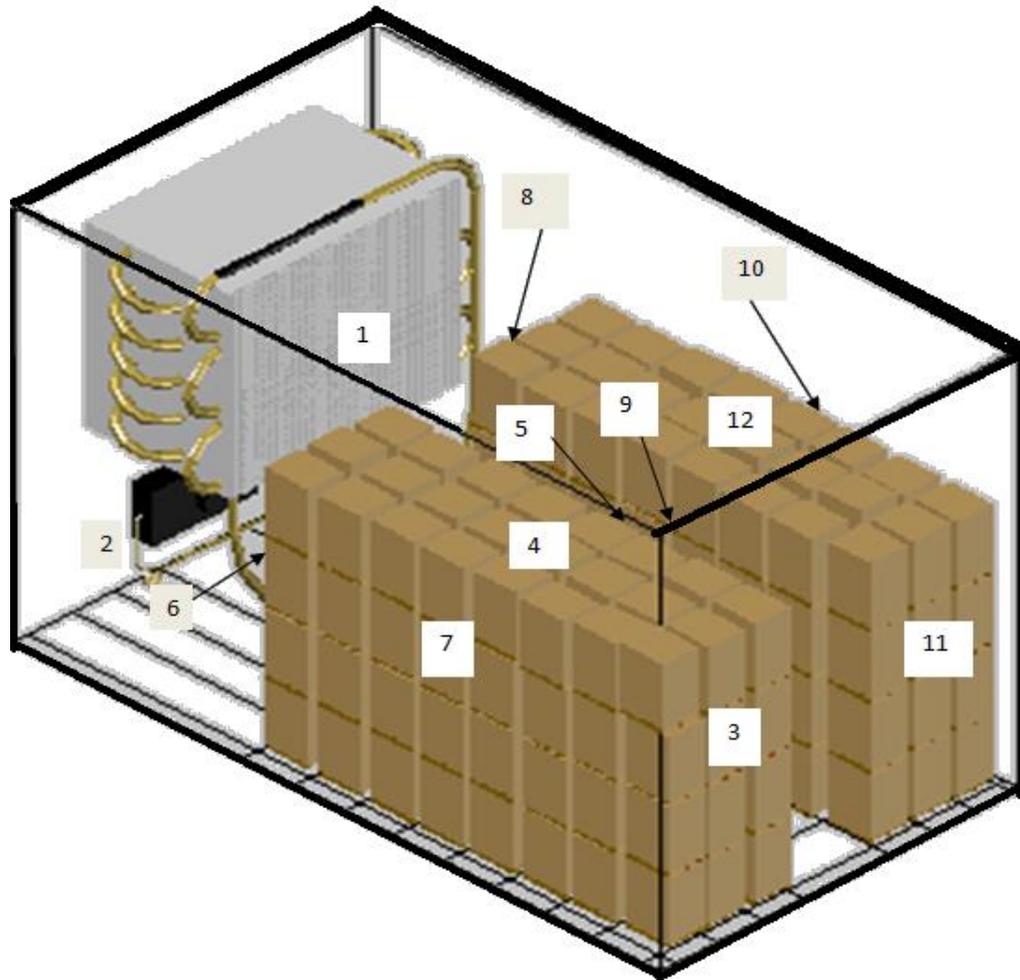


Figura 21. Distribución de los modelos de estiba y localización de puntos críticos para medición de temperatura, humedad y velocidad del aire.

#### 2.4.4 Selección de tres modelos de estiba y tres tipos de distribución de flujo de aire

Esto se realizó de acuerdo con las necesidades prácticas de los centros de distribución que se requieren para un adecuado manejo de producto al interior del almacén frigorífico. Los modelos más utilizados en la industria de alimentos son las tarimas, los convertidores, y los *racks*, por esta razón fueron seleccionados. Los tipos de distribución de flujo de aire elegidos fueron: en forma longitudinal,

vertical, transversal. Todos los techos se construyeron con papel cascaron por facilidad.

Para la distribución de aire longitudinal se dejó un espacio entre la pared de fondo y el techo, igual a la altura del evaporador. En la distribución transversal no se colocó techo, solo se cambió la posición del estibado, pasándolo a lo ancho del almacén piloto, no a lo largo como se hizo con las distribuciones anteriores.

Para lograr que el aire tuviera distribución de aire en forma vertical se midió, el área de paso con las dimensiones del evaporador, el flujo másico del aire; todo lo anterior para calcular el número de orificios que se le hicieron al techo como se muestra en la siguiente ecuación:

$$A = b * h$$

$$m = v * A$$

$$N^{\circ} \text{ orif} = \frac{A_T}{A_{orf}}$$

Donde:

$A$  = Área de paso del aire (del evaporador)

$b$  = Base del evaporador

$h$  = Altura del evaporador

$m$  = Flujo de másico

$v$  = Velocidad del aire a la salida el evaporador

$N^{\circ} \text{ orif}$  = Número de orificios

$A$  = Área total (del evaporador)

$A_{orf}$  = Área de los orificios

#### **2.4.4.1 Distribución de los modelos de estiba en el almacén frigorífico**

La distribución de las tarimas, convertidores y *rack* en el almacén se realizó tomando en cuenta las recomendaciones de los centros de distribución (Carboneras, 2003).

- a) El límite de altura de la carga es la parte inferior del evaporador.
- b) El espacio entre pared y tarima es de 40 cm para el caso de refrigeración.
- c) La separación entre tarima y tarima es de 20 cm.
- d) El pasillo se diseño en base al ángulo de giro del montacargas, que fue de 3 m.

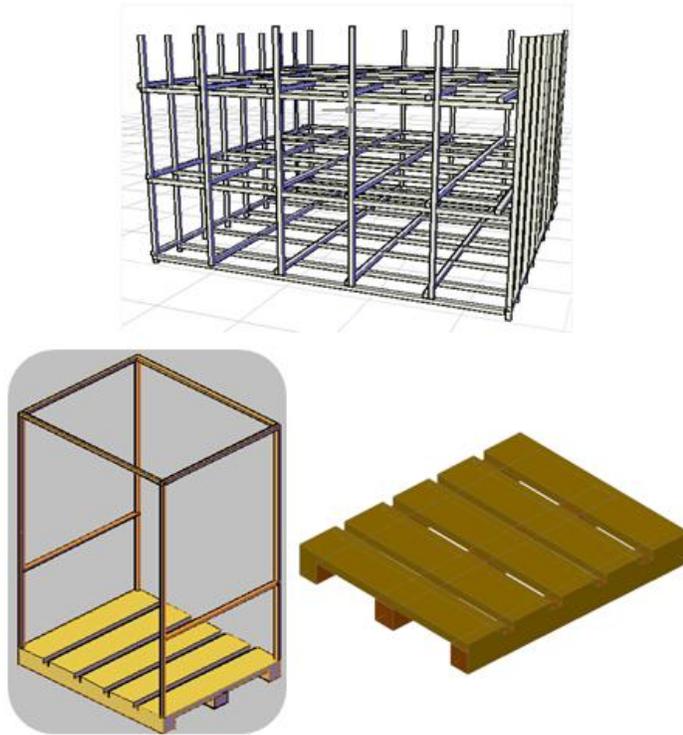
Todas las recomendaciones anteriores, se realizaron a escala de 1:20.

Longitudinalmente se acomodaron ocho tarimas y a lo ancho 6 con un pasillo; dando un total de cuarenta y ocho tarimas en primer nivel y fueron tres niveles. El mismo acomodo fue para los convertidores (Figura 20).

Para tipo *rack*, siguiendo las recomendaciones anteriores y de fabricantes de *racks*, el diseño fue de tres pasillos con tres niveles y en cada nivel se acomodaron 8 tarimas (Figura 21).

#### **2.4.4.2 Construcción de prototipos de estibas**

Todos los modelos se construyeron a escala de 1:20. La modelación de la carga fue con poliestireno expandido de acuerdo a las medidas de las tarimas y para la altura se consideró la altura máxima recomendada para almacenes de refrigeración.



**Figura 22. Diseño de tarimas, convertidores y rack**

Se construyeron tarimas de madera, a las medidas estándares, que se utilizan en refrigeración de alimentos, los convertidores se construyeron con las tarimas anteriores y alambre recocido, el *rack* fue construido con madera y la mediadas fueron hechas de acuerdo a las recomendaciones de fabricantes y al espacio del almacén piloto. En total se realizaron 144 tarimas y convertidores, dos *racks* (Figura 22).

#### **2.4.4.3 Obtención de datos de temperatura, humedad relativa del almacén frigorífico piloto y velocidad del aire**

Los datos de temperatura se obtuvieron con el uso de termopares distribuyéndolos como se muestra en la figura 21, las lecturas se realizaron durante todo el ciclo

frigorífico (paro y arranque); para cada combinación de modelo de estiba y distribución de flujo de aire. Las tomas de lecturas se repitieron tres ciclos de refrigeración continuos. Se realizaron gráficos donde el eje X corresponde al tiempo que duró el ciclo frigorífico y el eje Y a las temperaturas en los diferentes puntos del almacén piloto.

La humedad relativa, se midió con un higrómetro con puerto *USB*, cuando el equipo frigorífico estaba en arranque; como la apertura de puertas afecta en el valor de la humedad relativa, la medición se realizó por cada ciclo refrigeración: una toma en cada punto repitiéndose tres veces, los puntos son los mismos que se muestran en la figura 21.

La velocidad del aire se midió con un anemómetro de hilo caliente, y la toma de mediciones se hizo al igual que la humedad relativa y en los mismos puntos de la figura 21.

En ambos casos, en los gráficos realizados el eje X corresponde a la posición con respecto al evaporador; el eje Y, a las variables antes mencionadas (humedad relativa y velocidad del aire).

#### ***2.4.4.4 Determinación del modelo matemático del comportamiento de la temperatura, humedad relativa del almacén y la velocidad del aire***

Para efectuar el análisis del almacén frigorífico, fue necesario obtener un modelo matemático que represente el comportamiento de las variables, lo que equivale a una ecuación matemática y de esta forma conocerlo.

Se utilizó el programa, *Curve Expert* (Figura 23) para obtener las ecuaciones que más se ajustaran al comportamiento de la temperatura, humedad relativa y la velocidad del aire dentro del almacén piloto.

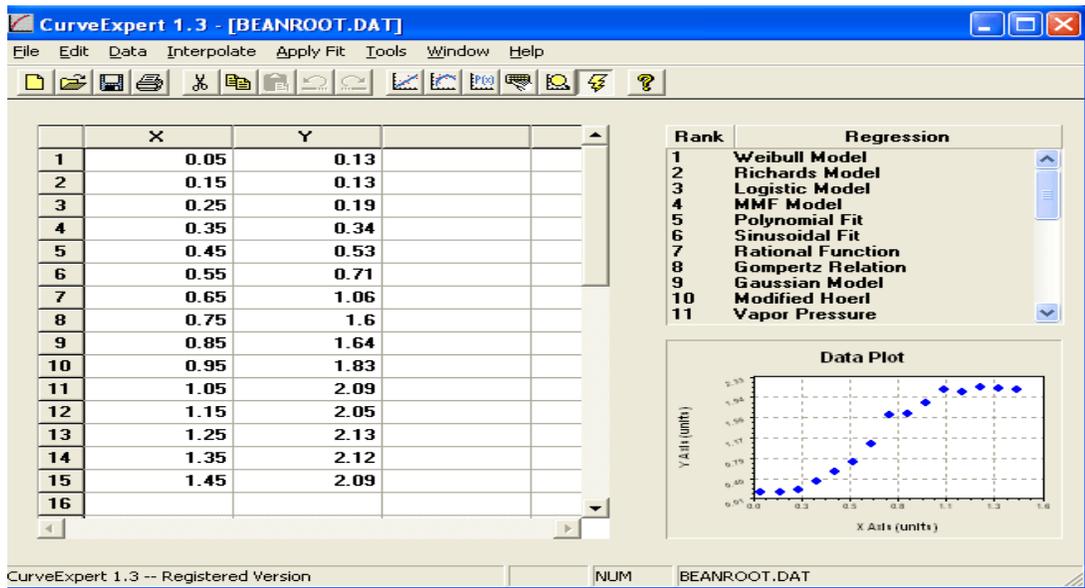
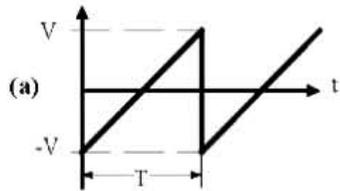


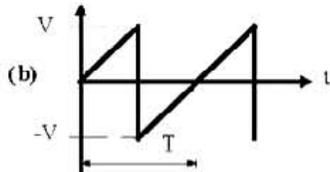
Figura 23. Curve Expert 1.3

Se introducen los datos en una tabla y dar clic en el icono de “Definir modelo” y el programa automáticamente ajusta una ecuación a los datos proporcionados. En el caso de temperatura con este programa no existió ningún modelo que se ajustara al comportamiento de la temperatura dentro del almacén piloto, por lo que se procedió a utilizar la ecuación del inciso e las Series de Fourier (Figura 24) que permitió obtener resultados adecuados.

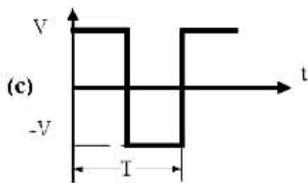


$$f = \frac{1}{T} \quad \omega = 2\pi f$$

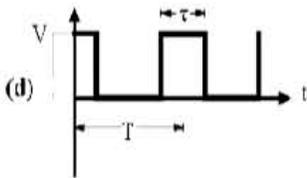
$$V = \frac{2V}{\pi} \left[ \text{sen } \omega t + \frac{1}{2} \text{sen } 2\omega t + \frac{1}{3} \text{sen } 3\omega t + \frac{1}{4} \text{sen } 4\omega t + \dots \right] \quad V < 0$$



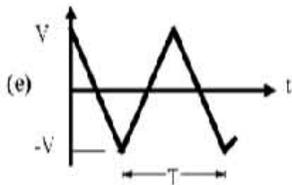
$$V = \frac{2V}{\pi} \left[ \text{sen } \omega t - \frac{1}{2} \text{sen } 2\omega t + \frac{1}{3} \text{sen } 3\omega t - \frac{1}{4} \text{sen } 4\omega t + \dots \right]$$



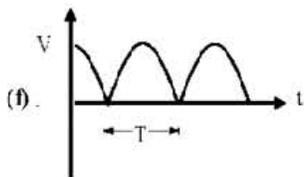
$$V = \frac{4V}{\pi} \left[ \text{sen } \omega t + \frac{1}{3} \text{sen } 3\omega t + \frac{1}{5} \text{sen } 5\omega t + \dots \right]$$



$$V = V \frac{\tau}{T} + 2V \frac{\tau}{T} \left[ \frac{\text{sen } \pi (\tau/T)}{\pi (\tau/T)} \cos \omega t + \frac{\text{sen } 2\pi (\tau/T)}{2\pi (\tau/T)} \cos 2\omega t + \frac{\text{sen } 3\pi (\tau/T)}{3\pi (\tau/T)} \cos 3\omega t + \dots \right]$$



$$V = \frac{8V}{\pi^2} \left[ \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 3\omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \dots \right]$$



$$= \frac{2V}{\pi^2} \left[ 1 + \frac{2\cos 2\omega t}{3} - \frac{2\cos 4\omega t}{15} + \dots (-1)^{n/2} \frac{2\cos n\omega t}{n^2 - 1} + \dots \right] \quad (n \text{ par})$$

Figura 24. Series de Fourier (Bhathia, 2005)

### 2.4.5 Crear los modelos en el programa *Visual Basic*

Para modelar el programa fue necesario realizar un diagrama de flujo que a continuación se muestra (Figura 25), se describe la secuencia que se desarrolló para la simulación de los perfiles de temperatura, velocidad y humedad relativa.

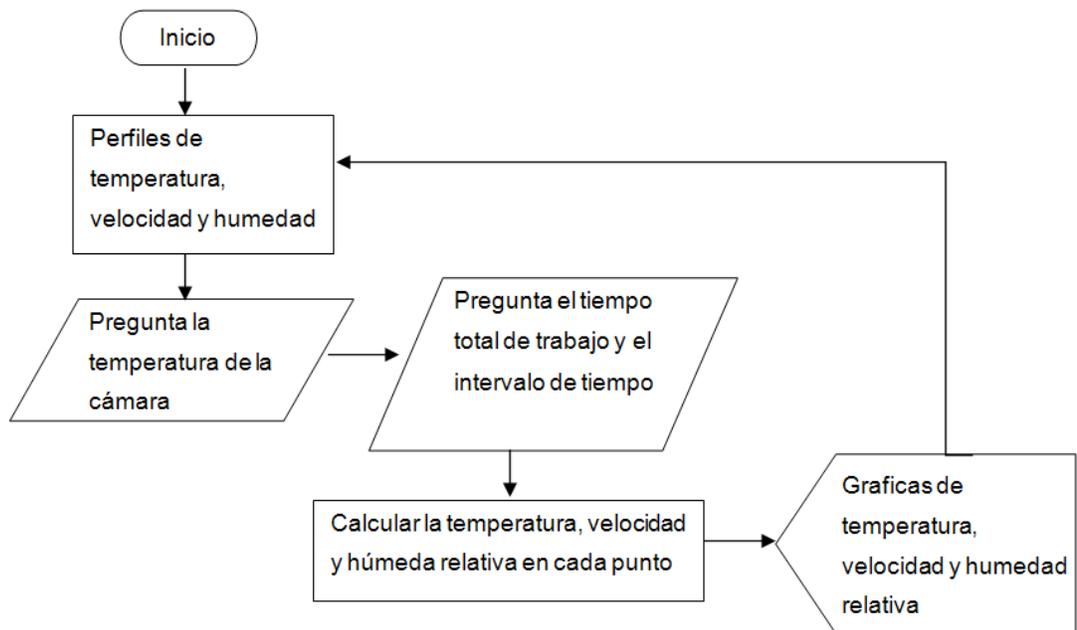


Figura 25. Diagrama de flujo de la simulación de los perfiles de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire

Para la simulación, mediante una aplicación de *Visual basic*, se realizó lo siguiente:

- a. Abrir un formulario el cual se llama *form 1*, en el *grid* insertar dos tablas usando el control de *MSFlexGrid*. Además de dos *label*, dos *textbox*, tres *commandbutton*.

- b. El *command 1*, pregunta la temperatura de la cámara, *label 1* pregunta el tiempo total en que trabajará la cámara y *label 2* pregunta el intervalo de tiempo en que se requieren los datos.
- c. El *command 2*, es el paso para los cálculos , determina el numero de datos y se escribió el código de manera que presentará en cada columna la temperatura de cada posición y en la segunda columna el tiempo, en la tabla uno.
- d. El *command 3*,es donde se hacen todos los cálculos para cada posición, se introdujeron las ecuaciones definidas por los ajustes estadísticos a los comportamientos de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire dentro del almacén frigorífico; en el programa se escribieron en el código todas la ecuaciones para cada uno de los modelos y distribución de flujo de aire.
- e. La presentación de cada perfil de temperatura, velocidad y humedad relativa, se realiza abriendo tres *form* para cada modelo con su distribución de aire. El primer *form* es para la temperatura, se insertan tres *label* donde aparecerá el nombre del perfil de temperaturas del modelo y distribución de aire correspondiente, esto es para cada *form*; en el eje Y, temperatura y el eje X el tiempo. Para el segundo y tercer *form* en el eje Y, se ubica la humedad relativa y la velocidad del aire y en el eje X la posición.  
Se escribe en el código para que aparezcan las graficas como se desea.

## CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

### 3.1 Tratamiento y análisis de resultados

#### 3.1.1 Validación de termopares

La validación se hizo en base a *The International Temperature Scale of 1990 (ITS 1990)*. Se obtuvieron los factores de corrección de temperaturas de cada uno de los termopares, presentando mayor desviación el T11 (ver Tabla 4 y Figura 26).

**Tabla 4. Factores de corrección de temperaturas**

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10	T11	T12
Factor de corrección	1.003	1.011	1.009	1.008	1.004	1.010	1.000	0.996	0.997	1.006	1.160	1.009
Desv. Estándar	0.007	0.010	0.010	0.010	0.013	0.012	0.019	0.018	0.018	0.018	0.024	0.009
Coef. Var.	0.704	0.943	1.002	0.999	1.268	1.162	1.893	1.831	1.779	1.817	2.103	0.915

En la Figura 26 se ilustran las temperaturas marcadas por los termopares y los termómetros. La validación se realizó en dos eventos pues eran demasiados termopares. Se observa que todos los termopares tienen un comportamiento similar a los termómetros, excepto el termopar once, tal situación se corrigió con el factor de corrección de 1.16, que se obtuvo de la diferencia de valores registrados de temperatura constante del termopar y la temperatura constante registrada por los termómetros.

A los datos obtenidos durante la experimentación, se le aplicaron estos factores y así se obtuvieron temperaturas confiables estadísticamente.

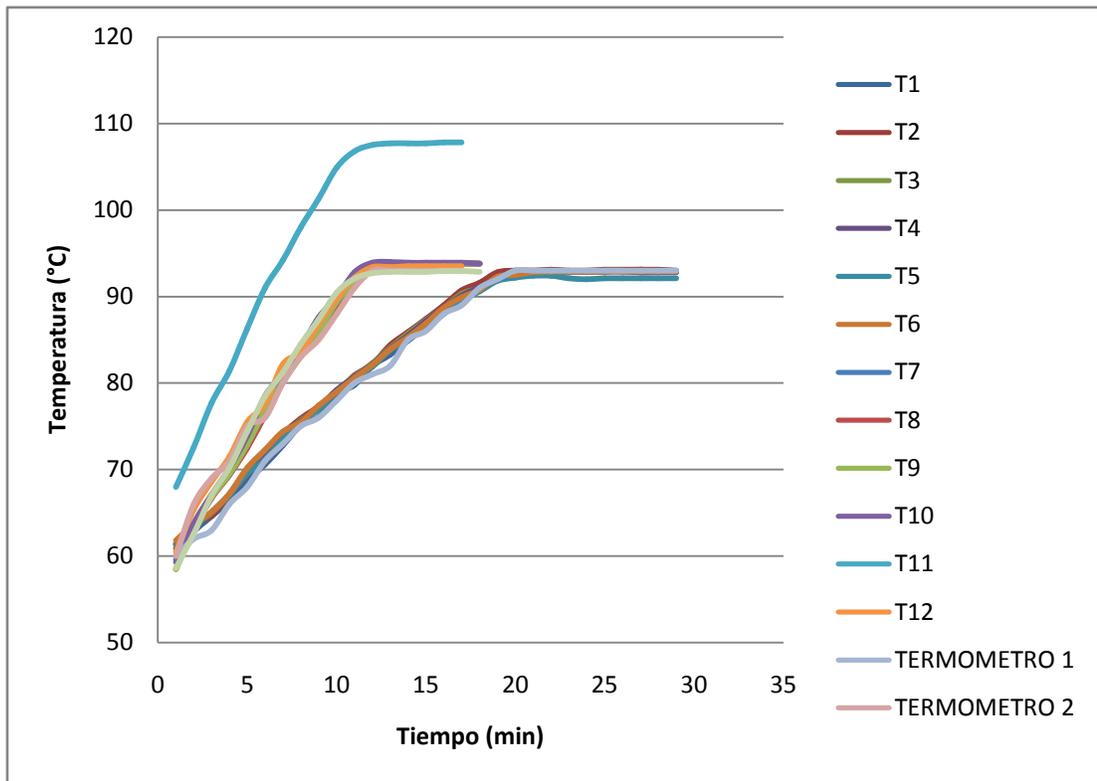


Figura 26. Validación de termopares

### 3.1.2 Perfiles de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa dentro del almacén piloto

Después de realizar los eventos en base al diseño factorial, se realizaron los gráficos para obtener los perfiles de temperatura, humedad relativa, velocidad del aire dentro del almacén frigorífico. Se muestra a continuación, en primer lugar los perfiles de temperatura, seguido por los de velocidad y por último humedad relativa.

### 3.1.2.1 Perfiles de temperatura

Los perfiles muestran el comportamiento de temperatura en función del tiempo; la temperatura se rige por el ciclo de funcionamiento del compresor. Se utilizó la ecuación del inciso e de las series de Fourier, por que se ajustaron mejor los datos experimentales, por lo que el comportamiento de la temperatura es cíclico de segundo orden.

$$T = Tm + 8 \frac{A}{\pi^2} \left[ \cos \frac{2\pi * t}{p} + \frac{1}{3^2} \cos \frac{3 * 2\pi * t}{p} + \frac{1}{5^2} \cos \frac{5 * 2\pi * p}{A} \right]$$

Donde:

$T$ = Temperatura del aire

$Tm$ = Temperatura del medio

$A$ = Amplitud

$t$ = Tiempo

$p$ = periodo

a) Distribución de flujo longitudinal.

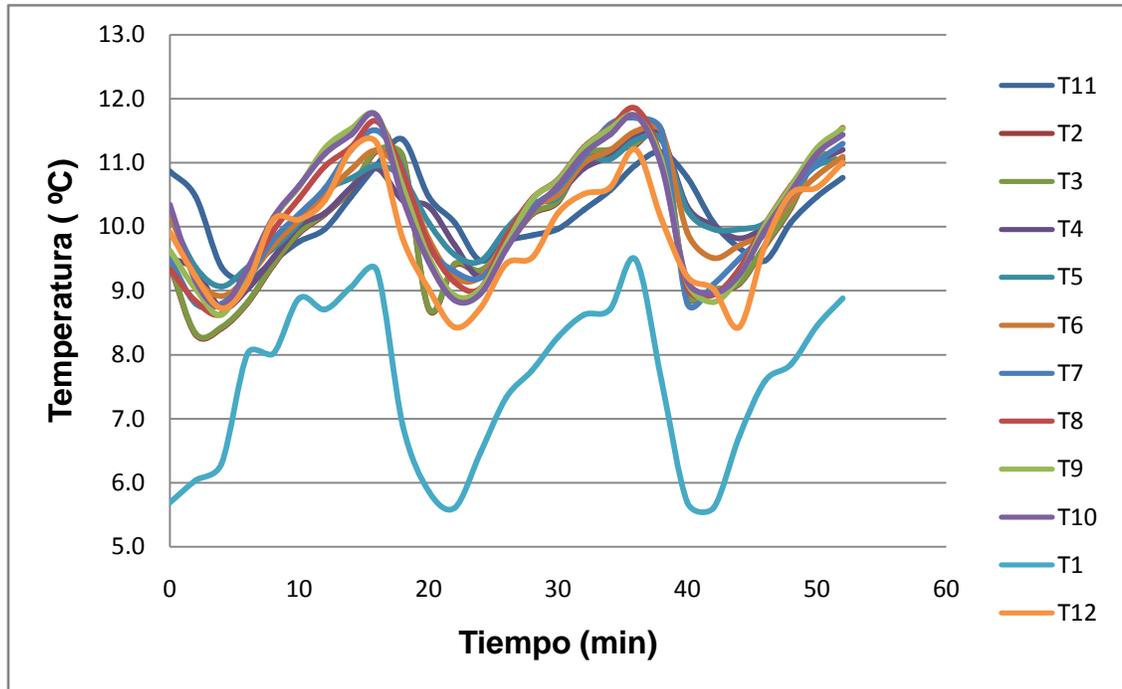


Figura 27. Perfil de velocidades del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo longitudinal.

Tabla 5. Prueba de *Tukey* para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento *rack*. distribución y distribución del flujo de aire longitudinal

Nivel	N	Media	Desv.Est.	basados en Desv.Est. agrupada
1	27	7.533	1.270	(--*--)
2	27	10.303	0.646	(--*--)
3	27	9.983	0.981	(--*--)
4	27	10.217	0.725	(--*--)
5	27	9.861	0.863	(--*--)
6	27	10.210	0.596	(--*--)
7	27	10.224	0.763	(--*--)
8	27	10.242	0.977	(--*--)
9	27	10.237	1.007	(--*--)
10	27	9.964	0.979	(--*--)
11	27	10.196	0.956	(--*--)
12	27	10.257	1.026	(--*--)

La Figura 28 muestra, el perfil de temperatura en las diferentes posiciones ubicadas en el almacén frigorífico, cuando el flujo del aire se distribuye longitudinalmente y el modelo de estiba es un *rack*. Se visualiza que todos los termopares siguen un mismo comportamiento, salvo el termopar 1, el cual está ubicado a la salida del aire del evaporador. Estadísticamente como muestra en la tabla 5, la temperatura del aire no se ve afectada por la posición donde se realice la medición de la misma, por esta razón la temperatura del aire es homogénea cuando se utiliza una distribución de aire longitudinal y un modelo de estibamiento de *rack*.

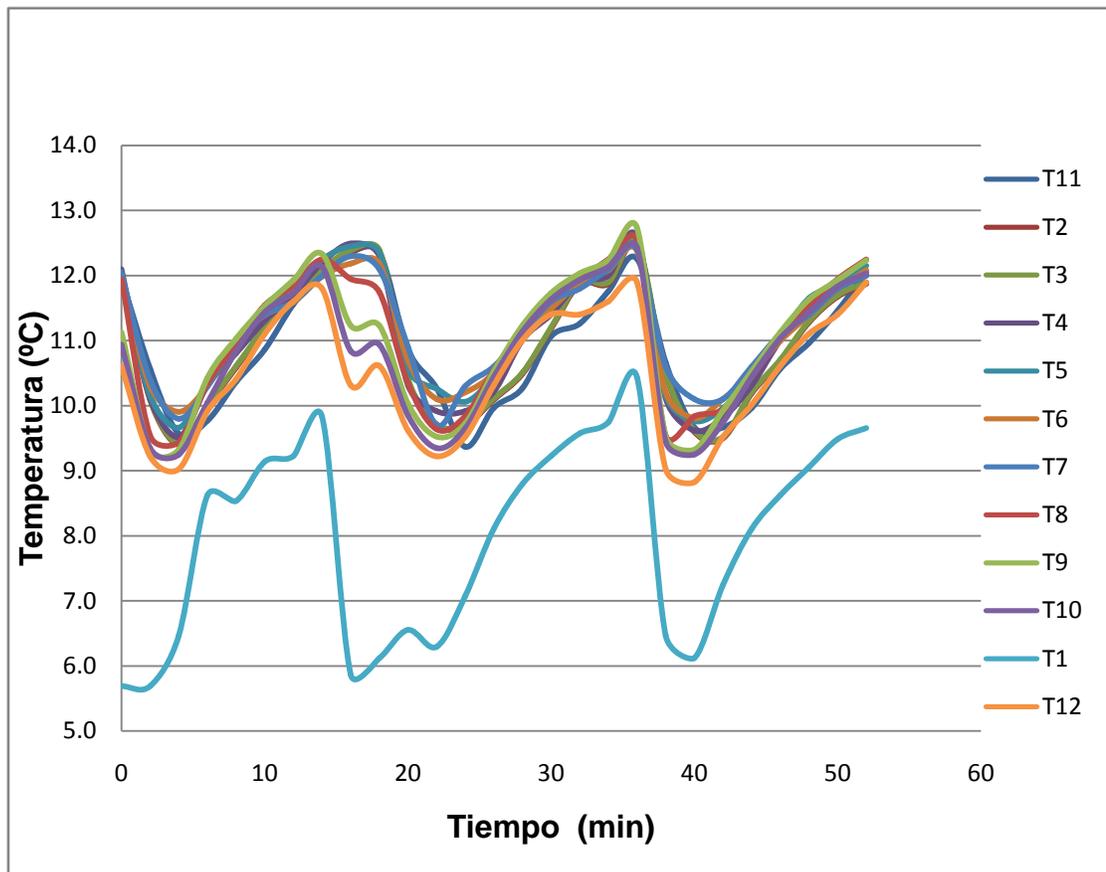
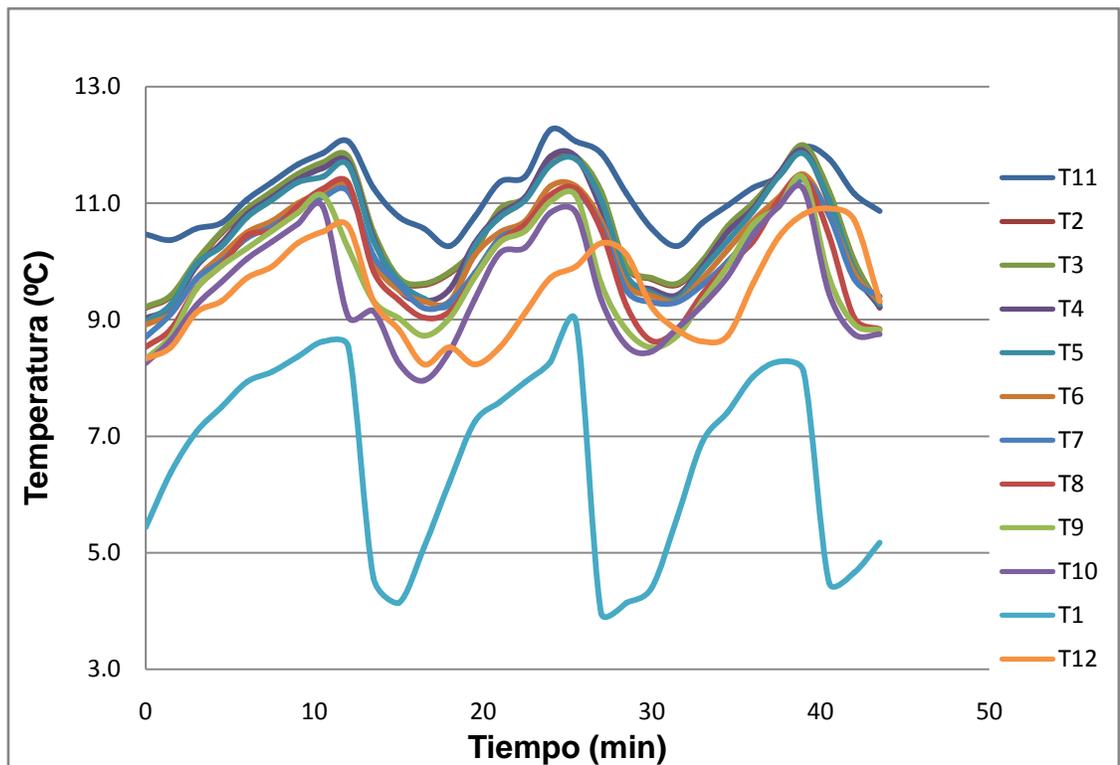


Figura 28. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal.

**Tabla 6. Prueba de *Tukey* para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	basados en Desv.Est. agrupada
1	27	7.990	1.523	-----+-----+-----+-----+----- (---*---)
2	27	11.163	0.937	(---*---)
3	27	10.944	1.060	(---*---)
4	27	11.151	0.817	(---*---)
5	27	10.871	0.943	(---*---)
6	27	11.116	0.833	(---*---)
7	27	11.047	0.980	(---*---)
8	27	10.788	1.032	(---*---)
9	27	10.481	0.986	(---*---)
10	27	10.917	0.996	(---*---)
11	27	11.036	1.014	(---*---)
12	27	10.938	0.998	(---*---)



**Figura 29. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal.**

La Figura 28 muestra el perfil de temperatura, las posiciones graficadas tienen un comportamiento similar, excepto la posición 1, ya que ésta se encuentra a la salida del aire del evaporador. Estadísticamente las posiciones (Tabla 6) no tienen diferencias significativas, pero la posición uno si es significativamente diferente, por la posición en donde se encontraba colocada. Basado en la prueba de Tukey, la temperatura es homogénea cuando la distribución del flujo del aire es longitudinal y el modelo de estiba es con tarima directa.

**Tabla 7. Prueba de Tukey para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con convertidor y flujo de aire longitudinal.**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	basados en Desv.Est. agrupada
1	27	7.990	1.523	(---*---)
2	27	11.163	0.937	(---*---)
3	27	10.944	1.060	(---*---)
4	27	11.151	0.817	(---*---)
5	27	10.871	0.943	(---*---)
6	27	11.116	0.833	(---*---)
7	27	11.047	0.980	(---*---)
8	27	10.788	1.032	(---*---)
9	27	10.481	0.986	(---*---)
10	27	10.917	0.996	(---*---)
11	27	11.036	1.014	(---*---)
12	27	10.938	0.998	(---*---)

En la figura 29, se visualiza el perfil de temperaturas, las posiciones muestran un comportamiento similar, la posición 1 a menor temperatura se localiza a la salida del aire del evaporador. Estadísticamente (Tabla 7) no hay diferencias significativas entre las posiciones salvo la posición uno, la temperatura es homogénea cuando la distribución del aire es en forma longitudinal y el modelo de estiba son convertidores.



b) Distribución tipo vertical.

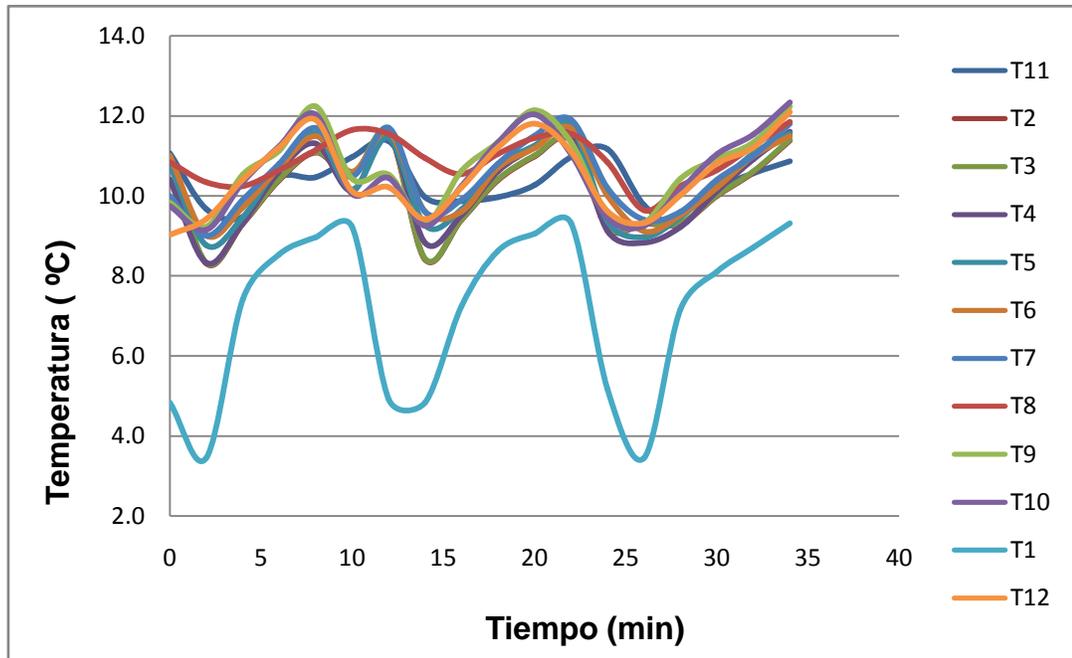


Figura 30. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo vertical

Tabla 9. Prueba de Tukey para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo vertical

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
1	18	7.128	2.103	(---*---)
2	18	10.505	0.951	(---*---)
3	18	10.156	1.025	(---*---)
4	18	10.175	1.067	(---*---)
5	18	10.690	0.985	(---*---)
6	18	10.349	0.623	(---*---)
7	18	10.455	0.883	(---*---)
8	18	10.137	1.023	(---*---)
9	18	10.590	1.025	(---*---)
10	18	10.347	0.988	(---*---)
11	18	10.538	0.910	(---*---)
12	18	10.910	0.585	(---*---)

Cuando la distribución del flujo de aire es en forma vertical y el modelo de estibamiento es un *rack*, la temperatura es homogénea, en la Figura 30 las curvas muestran un comportamiento similar. En la prueba de Tukey (Tabla 9) demuestra que la posición 1 tiene una diferencia significativa pues la parte más fría del almacén (la salida del evaporador), las demás posiciones no tienen diferencias por esta razón se considera que la temperatura es homogénea en este caso.

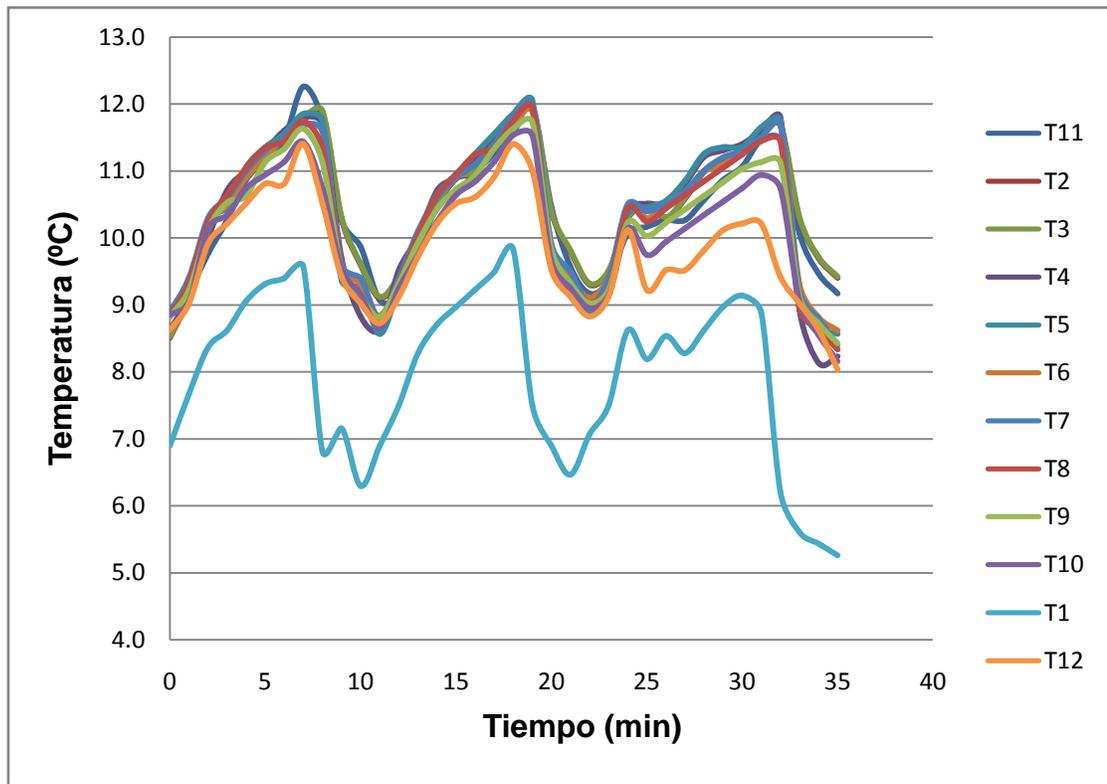


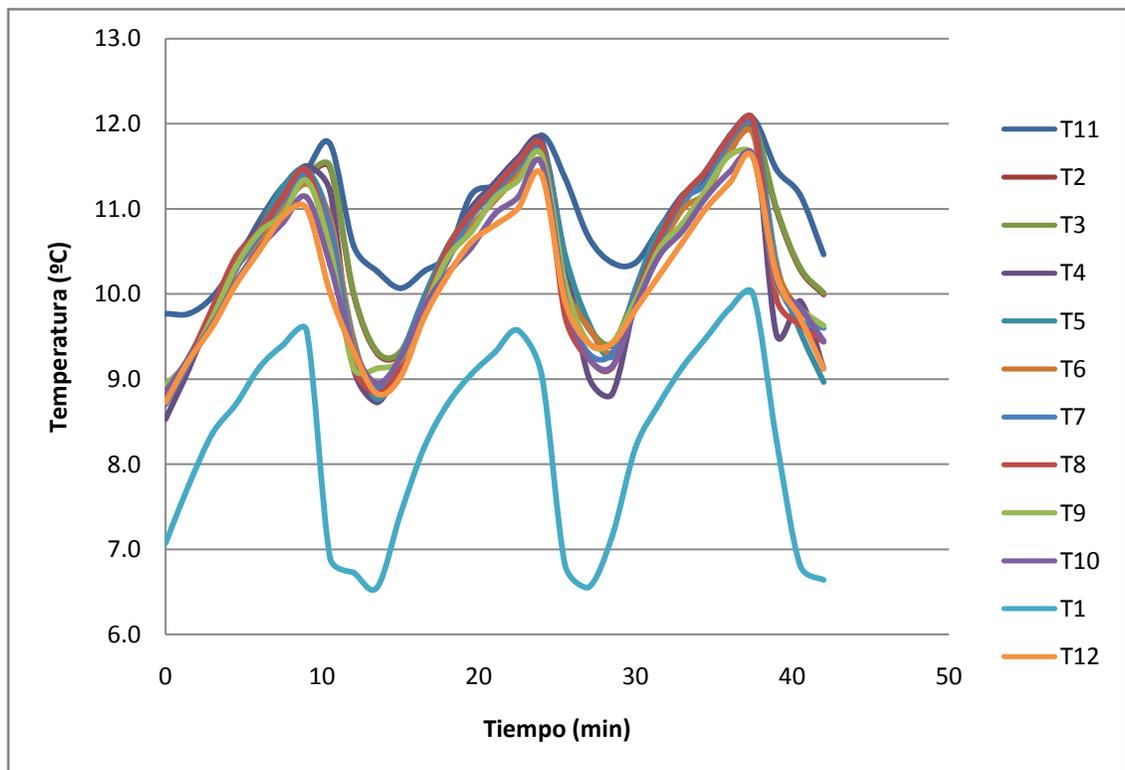
Figura 31. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical

La Figura 31 visualiza, las curvas de temperaturas de las diferentes posiciones donde se hizo la lectura, las cuales muestran un comportamiento muy similar; solo se visualiza la posición 1 diferente esto se debe a su ubicación a la salida del evaporador; por lo tanto existen diferencias significativas estadísticamente (Tabla 10). Las demás posiciones no se encuentran diferencias puesto que la

temperatura es homogénea cuando la distribución del flujo del aire es vertical y el modelo de estibamiento es directo.

**Tabla 10. Prueba de *Tukey* para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	basados en Desv.Est. agrupada
1	36	7.923	1.266	(--*--)
2	36	10.510	0.926	(--*--)
3	36	10.205	0.955	(--*--)
4	36	10.399	1.031	(--*--)
5	36	10.382	0.931	(--*--)
6	36	10.376	1.004	(--*--)
7	36	10.531	0.928	(--*--)
8	36	9.803	0.844	(--*--)
9	36	10.397	1.124	(--*--)
10	36	10.046	0.920	(--*--)
11	36	10.322	1.056	(--*--)
12	36	10.353	1.175	(--*--)



**Figura 32. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical**

**Tabla 11. Prueba de Tukey para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
1	36	8.016	1.358	(--*--)
2	36	10.461	0.968	(---*---)
3	36	10.250	0.919	(---*---)
4	36	10.330	1.034	(---*---)
5	36	10.358	0.890	(---*---)
6	36	10.159	0.919	(---*---)
7	36	10.855	0.703	(---*---)
8	36	10.033	0.878	(---*---)
9	36	10.335	1.136	(---*---)
10	36	10.363	0.965	(---*---)
11	36	10.288	1.077	(---*---)
12	36	10.454	1.058	(---*---)

En la Figura 32 muestra la temperatura en las diferentes posiciones como en los anteriores modelos, la única que muestra comportamiento diferente y con diferencia estadística significativa (Tabla 11) es la posición 1, por su ubicación a la salida del evaporador, las demás posiciones tienen el mismo comportamiento y sin diferencias estadísticas, la temperatura es homogénea a lo largo del almacén frigorífico cuando la distribución de flujo de aire es en forma vertical y el modelo de estibamiento es con convertidores.

**Tabla 12. Prueba de Tukey para la variación de la temperatura de los tres modelos de estibamiento con distribución del flujo vertical**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
RACK	11	3.2542	0.2014	(---*---)
DIRECTO	11	2.4590	0.2014	(--*--)
CONVERTIDOR	11	2.1372	0.2014	(--*--)

Desv.Est. agrupada = 0.2014

2.10      2.45      2.80      3.15

Para esta prueba de *Tukey* (Tabla 12) se tomó en cuenta la diferencia de temperatura que existe entre posición uno (salida del evaporador) y las posiciones a lo largo del almacén, siendo el modelo de estibamiento *rack* con diferencia estadística significativa, teniendo un efecto en el diferencial de temperatura.

c) *Distribución de flujo transversal*

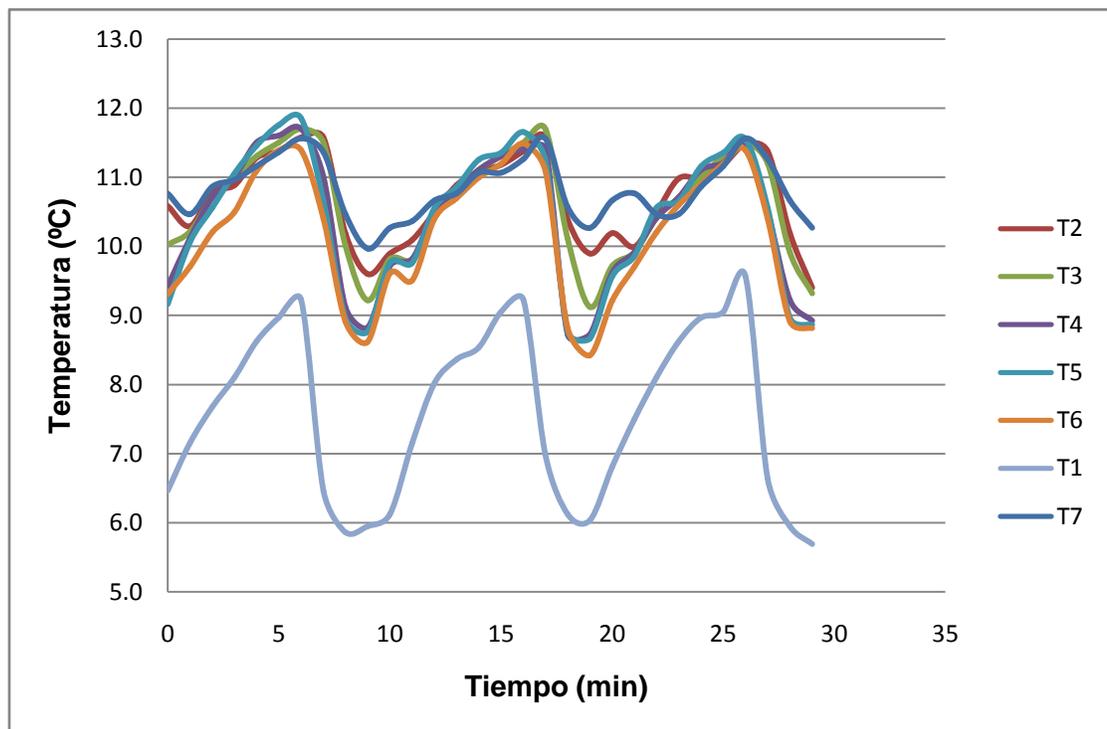
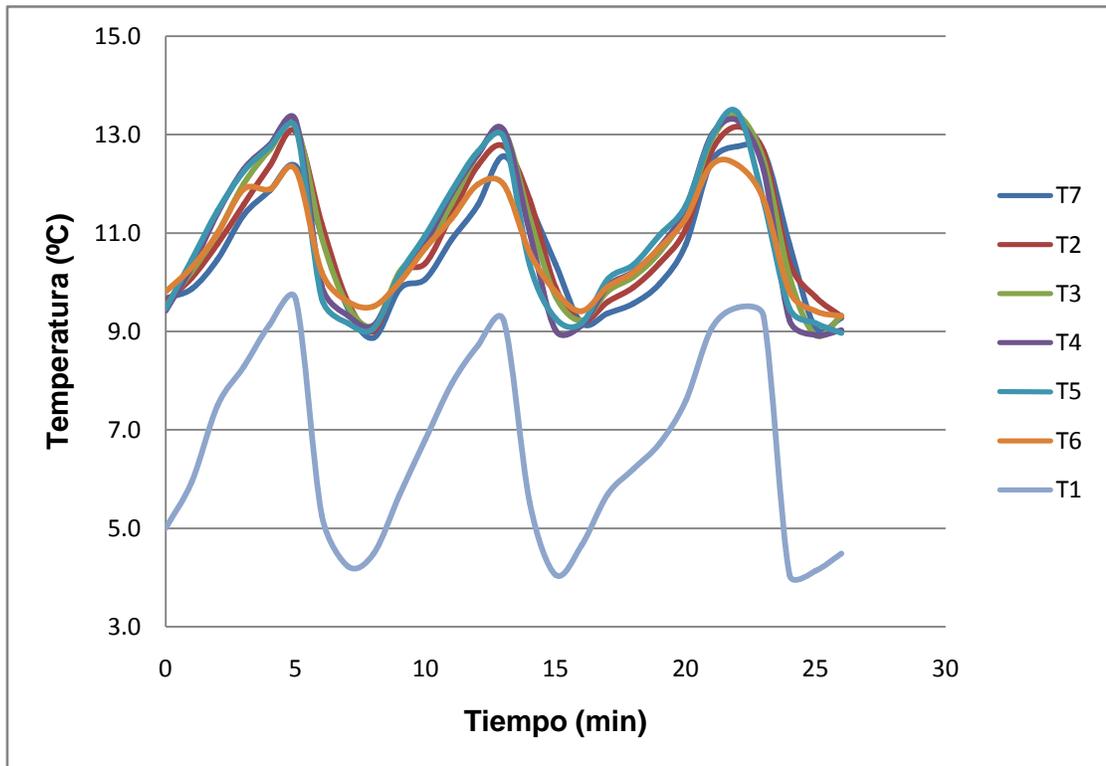


Figura 33. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo transversal

La Figura 33 muestra que la posición uno tiene la temperatura más baja pues es la que se localiza a la salida del evaporador, las demás posiciones siguen un comportamiento similar, la temperatura es homogénea. Estadísticamente la posición uno es significativamente diferente (Tabla 13), las demás posiciones no tienen diferencias significativas.

**Tabla 13. Prueba de *Tukey* para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo transversal**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
1	30	7.568	1.248	(---*---)
2	30	10.375	1.033	(---*---)
3	30	10.595	0.787	(---*---)
4	30	10.388	0.967	(---*---)
5	30	10.709	0.635	(---*---)
6	30	10.169	0.966	(---*---)
7	30	10.831	0.436	(---*---)

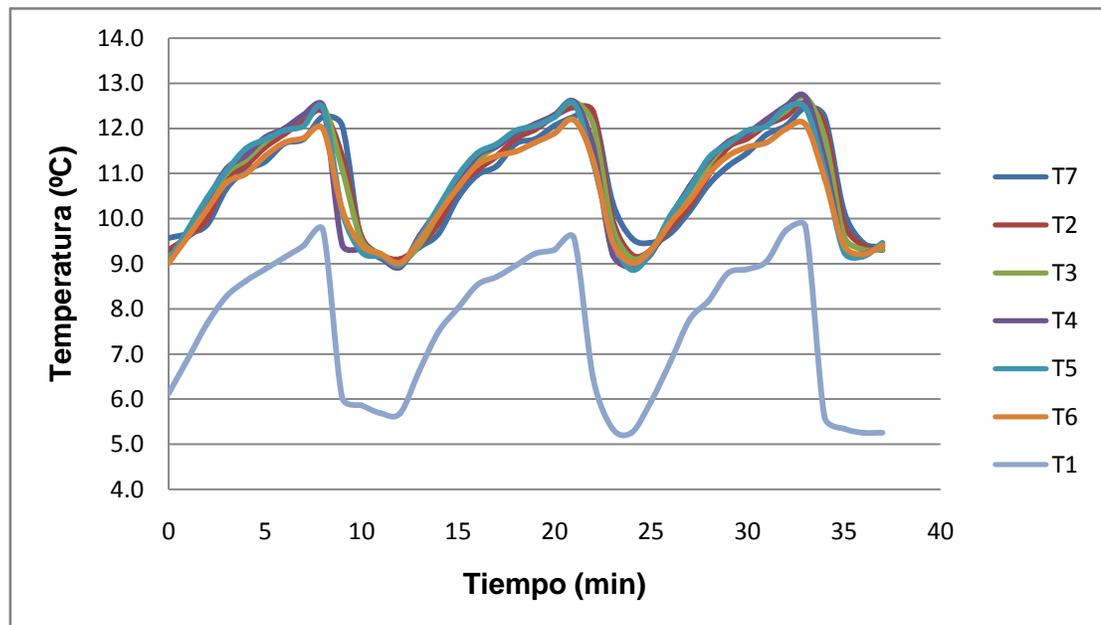


**Figura 34. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal**

**Tabla 14. Prueba de *Tukey* para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
1	27	6.623	1.965	+-----+-----+-----+----- (---*---)
2	27	10.864	1.480	(--*--)
3	27	10.949	1.413	(---*---)
4	27	10.871	1.525	(--*--)
5	27	10.888	1.312	(---*---)
6	27	10.716	1.039	(--*--)
7	27	10.650	1.228	(---*---)

El perfil de temperatura en la Figura 34 muestra, como en los anteriores casos, un comportamiento similar en todas las posiciones excepto en la uno pues se encuentra a la salida del evaporador; la temperatura a lo largo del almacén es homogénea. Por las razones anteriores, estadísticamente (Tabla 14) la posición uno es significativamente diferente.



**Figura 35. Perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal**

**Tabla 15. Prueba de Tukey para la variación de la temperatura en los diferentes puntos del almacén frigorífico del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
1	30	7.568	1.248	(---*--)
2	30	10.375	1.033	(---*---)
3	30	10.595	0.787	(---*---)
4	30	10.388	0.967	(---*---)
5	30	10.709	0.635	(---*---)
6	30	10.169	0.966	(---*---)
7	30	10.831	0.436	(---*---)

La temperatura no se ve afectada por la posición, esto se ve en la Figura 35 donde todas las curvas presentan el mismo comportamiento, solo la posición uno tiene la temperatura más baja pues se encuentra a la salida del evaporador y así estadísticamente es significativamente diferente (Tabla 15). Estadísticamente no hay diferencias significativas, por esto la temperatura es homogénea.

**Tabla 16. Prueba de Tukey para la variación de la temperatura de los tres modelos de estibamiento con distribución del flujo transversal.**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
RACK	6	2.9437	0.2445	(---*---)
DIRECTO	6	4.1996	0.1145	(---*---)
CONVERTIDOR	6	3.2106	0.0920	(---*---)

+-----+-----+-----+-----+  
2.80      3.20      3.60      4.00

En el caso de distribución de flujo de aire transversal, el modelo de estibamiento directo tiene diferencia significativa (Tabla 16), en su diferencia de temperaturas entre la salida del evaporador y las posiciones a lo largo del almacén. El diferencial de temperaturas se ve afectado por el modelo de estibamiento.

La distribución de la temperatura del aire dentro del almacén piloto, en los nueve casos el termopar uno es el que registra la temperatura más baja, este se encontraba a la salida del evaporador, en las demás posiciones la diferencia en la temperatura tiende a homogeneizarse y generar un comportamiento similar.

La medición de la temperatura del aire se realizó durante el tiempo que duran tres ciclos de compresión, obteniéndose los mayores tiempos cuando se utilizó la distribución de flujo de aire longitudinal, esto es debido a que el aire tardaba más en llegar al área de carga por el techo falso, puesto a lo largo del almacén piloto, los de menor tiempo fueron los de distribución de flujo de aire transversal en donde se tiene la menor carga a almacenar a diferencia de los demás experimentos. Los eventos de menor tiempo son los modelos de estibamiento directo y *rack* con distribución de flujo del aire transversal.

La diferencia de temperaturas más alta fue donde se tenía distribución de flujo del aire transversal con modelo de estibamiento directo, seguido por el experimento de distribución de flujo del aire longitudinal con modelo de estibamiento convertidores y por el de distribución de flujo del aire vertical con modelo de estibamiento *Rack*.

Los de menor diferencia de temperaturas fueron los experimentos con distribución de flujo del aire vertical con modelo de estibamiento con convertidores, distribución de flujo del aire vertical con estibamiento directo y distribución de flujo del aire longitudinal con modelo de estibamiento con *rack*.

Al tener una diferencia de temperaturas baja, el tiempo del ciclo es más alto en comparación a los experimentos con diferencias de temperaturas altas donde el tiempo del ciclo es corto.

En los resultados anteriores existe una distribución homogénea del aire dentro del almacén para cualquiera de las combinaciones de distribución de flujo de aire y estibamiento, para confirmar que esto sea exactamente igual para todas las combinaciones se realizó un análisis de Tukey, obteniéndose los siguientes resultados:

**Tabla 17. ANOVA para perfiles de temperatura**

<b>Factor</b>	<b>S.C</b>	<b>g.l</b>	<b>C.M</b>	<b>F</b>	<b>F tablas</b>	
<b>Modelo</b>	18.2521498	2	9.1260749	1.13610589	2.329	2.270
<b>Distribución</b>	0.0356517	2	0.01782585	0.00221914	2.329	2.270
<b>Interacción</b>	523.92403	4	130.981008	16.3058375	1.973	4.270
<b>Error</b>	2168.84733	270	8.03276788			
<b>Total</b>	29182.2094	278				

En la Tabla 17 se muestra el resultado del análisis de varianza, realizado para el modelo de estiba y la distribución de flujo de aire, determinándose que no existen diferencias significativas para cada factor individualmente, pero en combinación de los factores existen diferencias significativas.

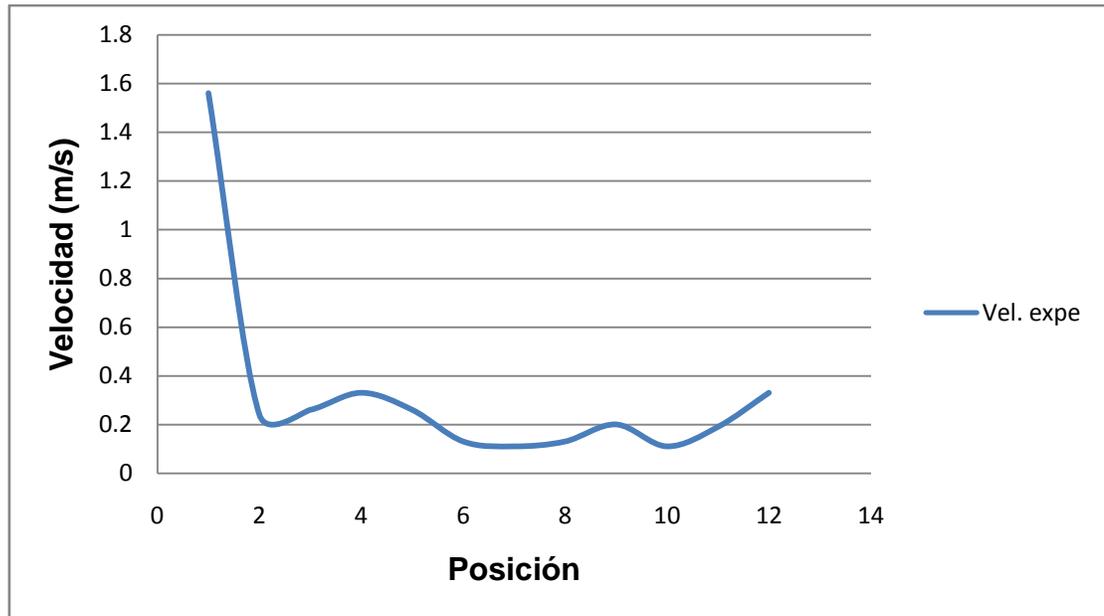
Por lo cual se realizó un análisis de prueba de bondad de ajuste de Tukey (Tabla 18) entre las nueve combinaciones, estableciéndose que la combinación que más diferencias estadísticas significativas tiene, es la estiba directa con distribución longitudinal del flujo de aire.

**Tabla 18. ANOVA entre las combinaciones**

		<b>RACK- -VERT</b>	<b>RACK- -TRAN</b>	<b>DIR- -LOG</b>	<b>DIR- -VERT</b>	<b>DIR- -TRAN</b>	<b>CONV- -LOG</b>	<b>CONV- -VERT</b>	<b>CONV- -TRAN</b>
		M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
<b>RACK- -LOG</b>	M1	1.200	0.811	4.018	0.880	1.503	0.100	1.403	2.078
<b>RACK- -VERT</b>	M2		0.389	2.818	0.320	0.303	1.300	0.203	0.878
<b>RACK- -TRAN</b>	M3			3.207	0.069	0.692	0.911	0.592	1.267
<b>DIR- -LOG</b>	M4				3.138	2.515	4.118	2.615	1.940
<b>DIR- -VERT</b>	M5					0.623	0.980	0.523	1.198
<b>DIR- -TRAN</b>	M6						1.603	0.100	0.575
<b>CONV- -LOG</b>	M7							1.503	2.178
<b>CONV- -VERT</b>	M8								TABLAS 1.973

### 3.1.2.2 Perfiles de velocidad del aire

a) Distribución longitudinal.



**Figura 36. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo longitudinal**

En los tres modelos se observa que la velocidad más alta, se encuentra en el punto uno, el cual está ubicado a la salida del evaporador (Figuras 36, 37, 38). En los otros dos experimentos de distribución del flujo de aire longitudinal su comportamiento es muy similar, solo cambian los valores de los factores de la ecuación, esto se debe a que en el caso de los convertidores, la velocidad es menor a comparación del estibamiento directo;

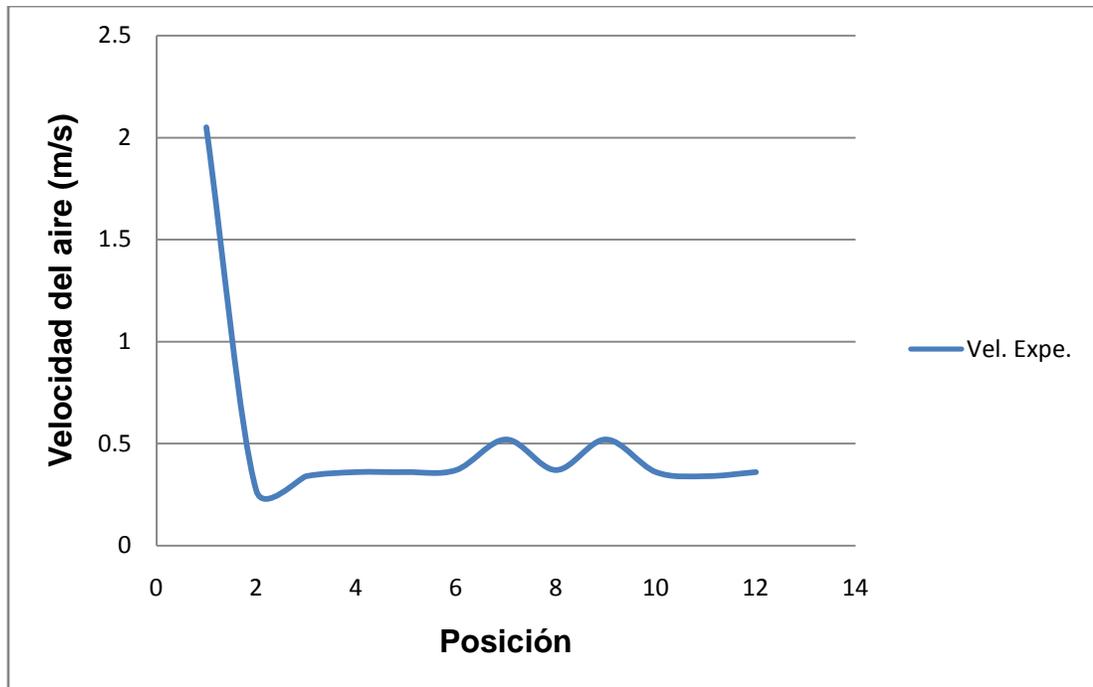


Figura 37. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal

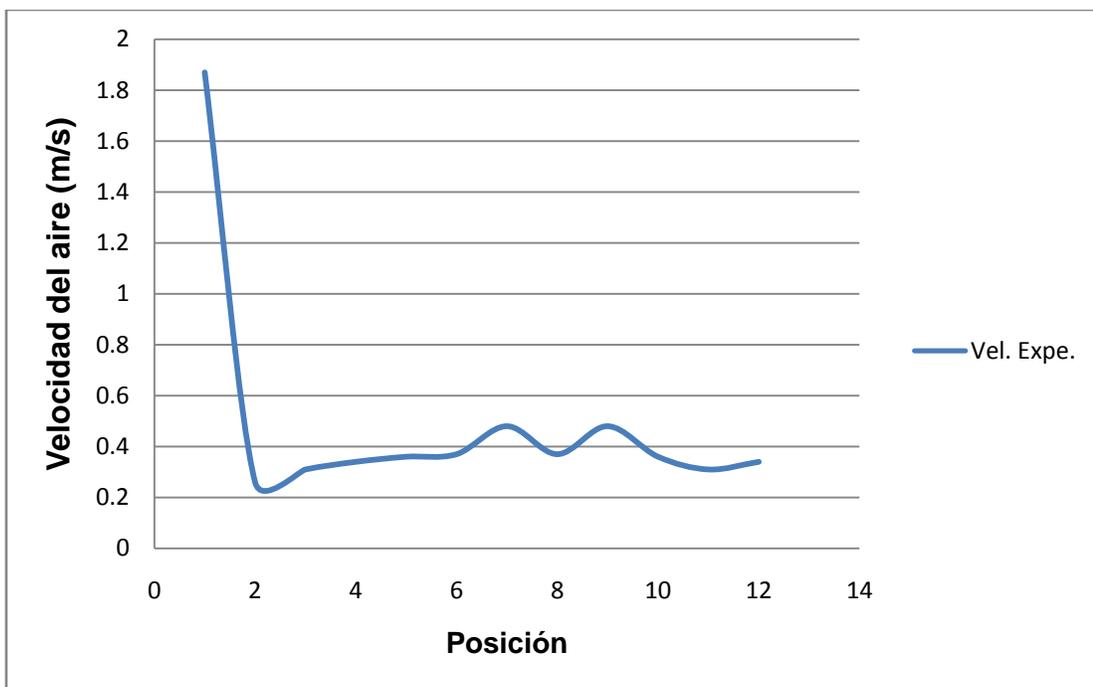
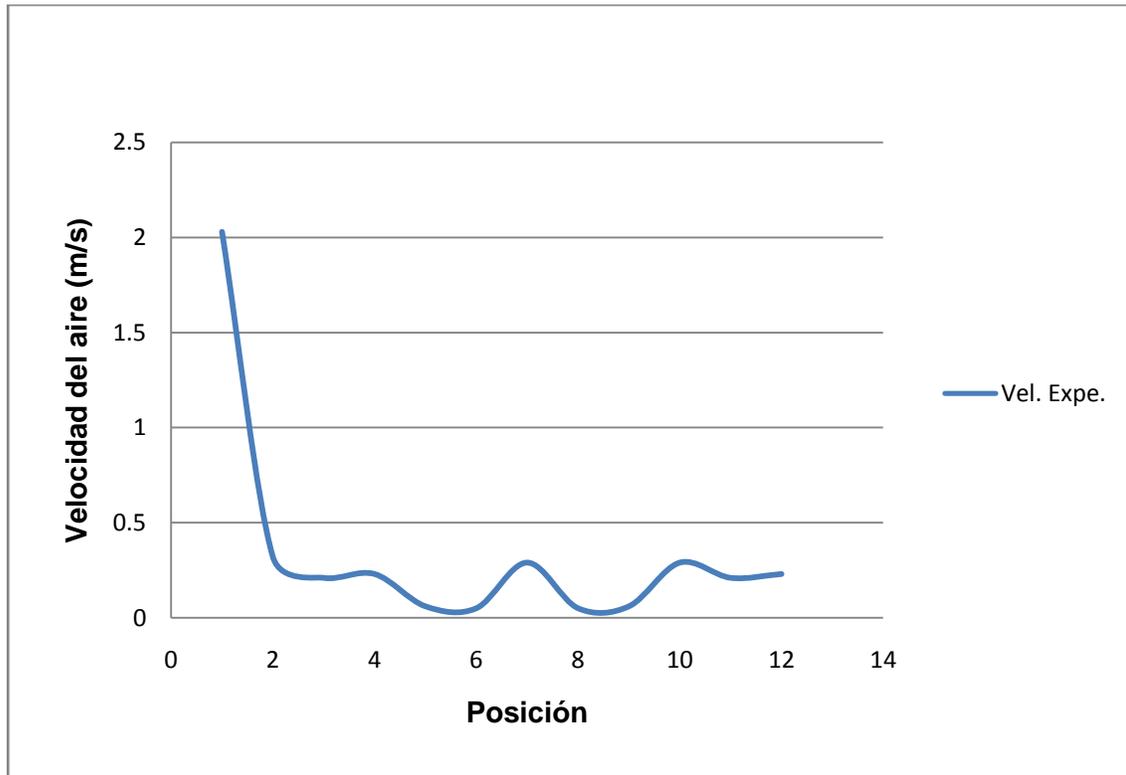


Figura 38. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal

Los puntos con velocidad alta en ambos experimentos fueron el punto siete que se ubicaba entre la pared lateral de la cámara y la carga; el nueve ubicado en el pasillo del almacén, estos puntos se ubican en zonas donde no existe algún obstáculo para que el aire pueda fluir rápidamente. En los demás puntos las velocidades son constantes, aquí el aire tarda más tiempo en llegar a este punto por el acomodo de las tarimas. Las velocidades más altas en los tres modelos fueron obtenidas cuando se utilizó el modelo de estibamiento directo.

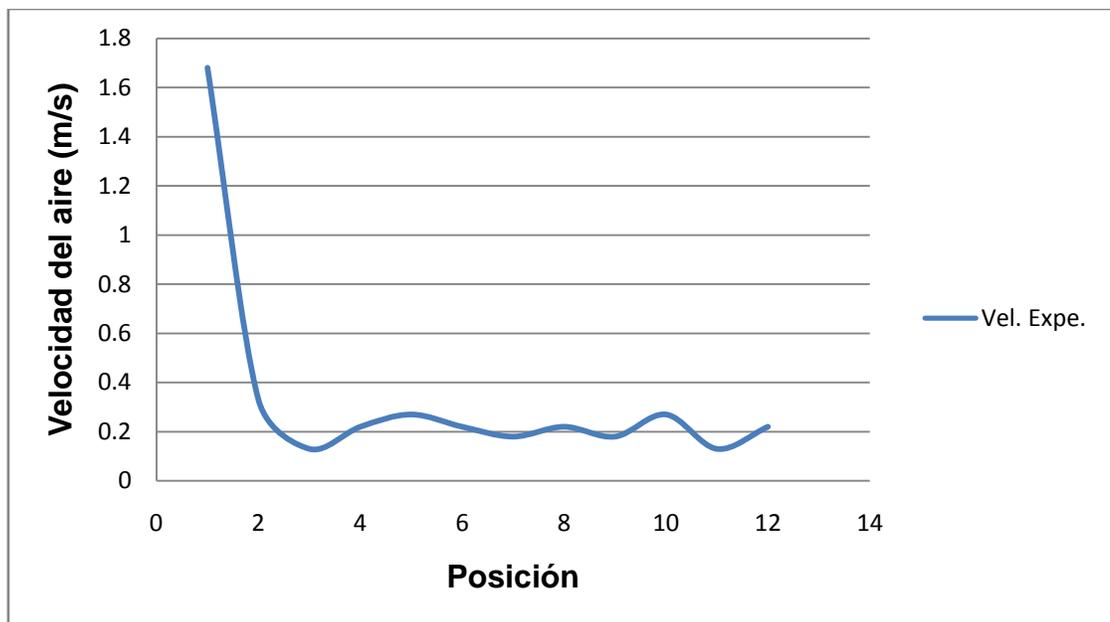
b) Distribución de flujo vertical.



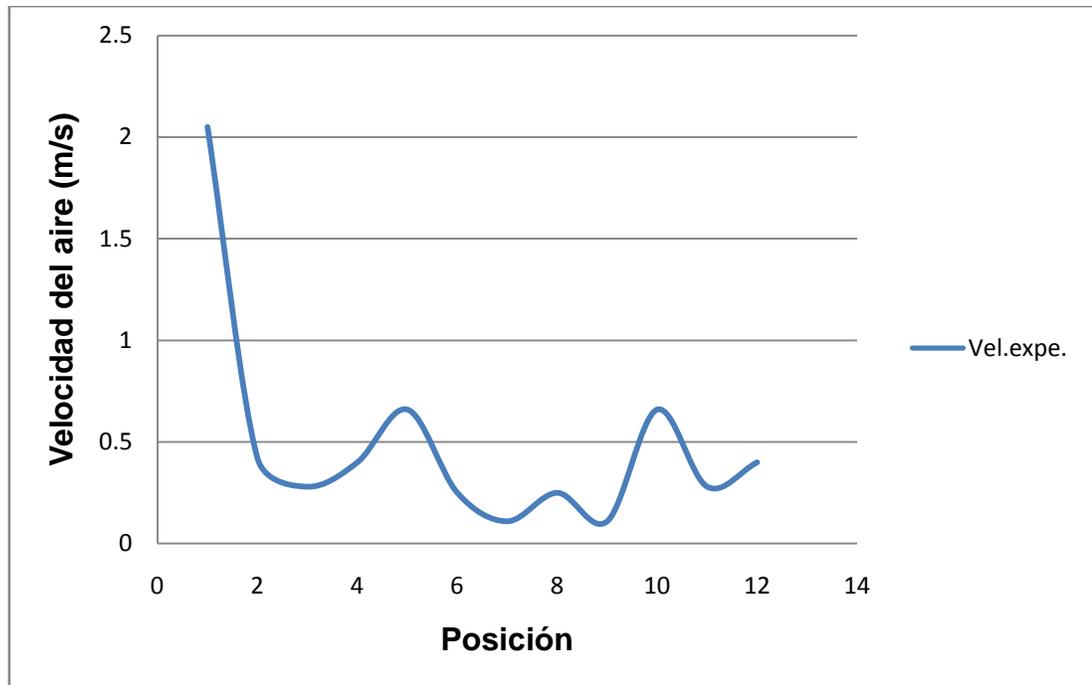
**Figura 39. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo vertical.**

En los tres experimentos de distribución del flujo de aire vertical la velocidad más alta fue a la salida del evaporador; la velocidad del aire sigue un comportamiento

diferente en cada modelo de estibamiento (Figuras 39, 40, 41), en el caso del modelo *rack*, la velocidad más alta después del punto uno, a lo largo de la cámara fue el punto siete ubicado entre la pared lateral izquierda y la carga, el punto diez ubicado entre la pared lateral derecha y la carga, lo anterior se debió a la posición de estos puntos, pues no existen obstáculos para que el aire fluya, los puntos donde la velocidad es baja están ubicados en la parte delantera de la carga (6,8) y los puntos en el pasillo (9,5), estos por el acomodo de la carga y la forma de distribuir el aire, este encuentra en su recorrido obstáculos que dificultan que fluya rápidamente.



**Figura 40. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical**



**Figura 41. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical**

En los modelos de estiba directa y convertidores los puntos con la velocidad alta son los puntos ubicados a la mitad del pasillo (5) y el punto ubicado entre la pared lateral derecha y la carga (10), en estas posiciones el aire fluye sin ningún obstáculo debido al acomodo de la carga y la forma de distribución del aire; en el experimento de estiba directa los demás puntos la velocidad se mantiene constante; en el caso de convertidores las velocidades bajas están en los puntos ubicados en la parte delantera de la carga (6,8), el punto en el pasillo (9) y el punto siete ubicado entre la pared lateral izquierda y la carga, el aire tarda más tiempo en llegar por los obstáculos que encuentra a su paso, por el acomodo de las tarimas y el techo falso construido para la distribución del aire. Las velocidades más bajas de los tres experimentos es el de estiba directa y las más altas las del modelo de convertidores. Los puntos donde la velocidad es baja el aire tardo más tiempo en llegar, esto se debe al techo que se construyó para dar la distribución vertical y el acomodo de las tarimas.

c) Distribución del aire transversal.

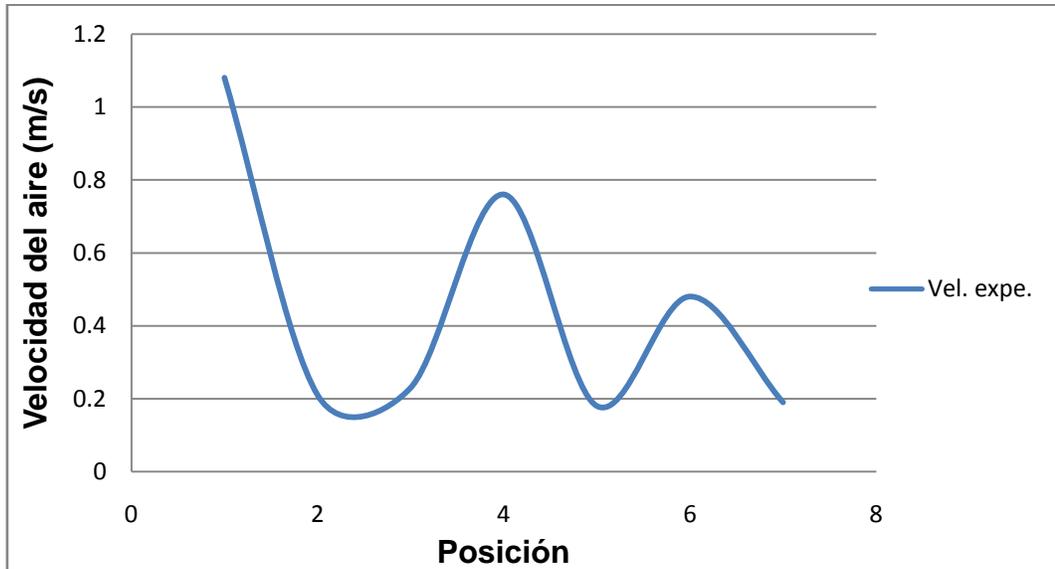


Figura 42. Perfil de velocidad del aire del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo transversal

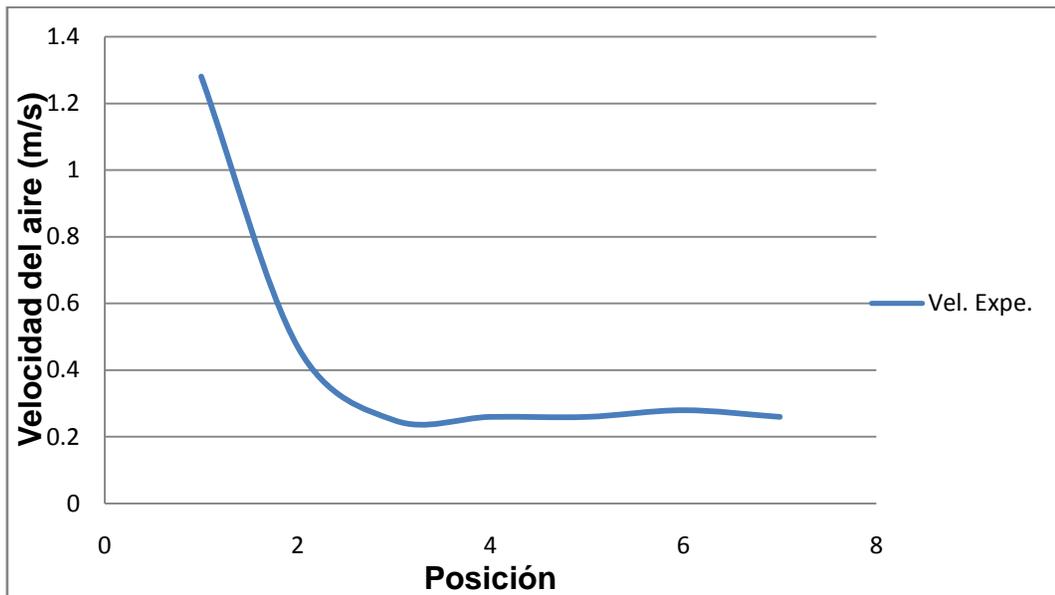
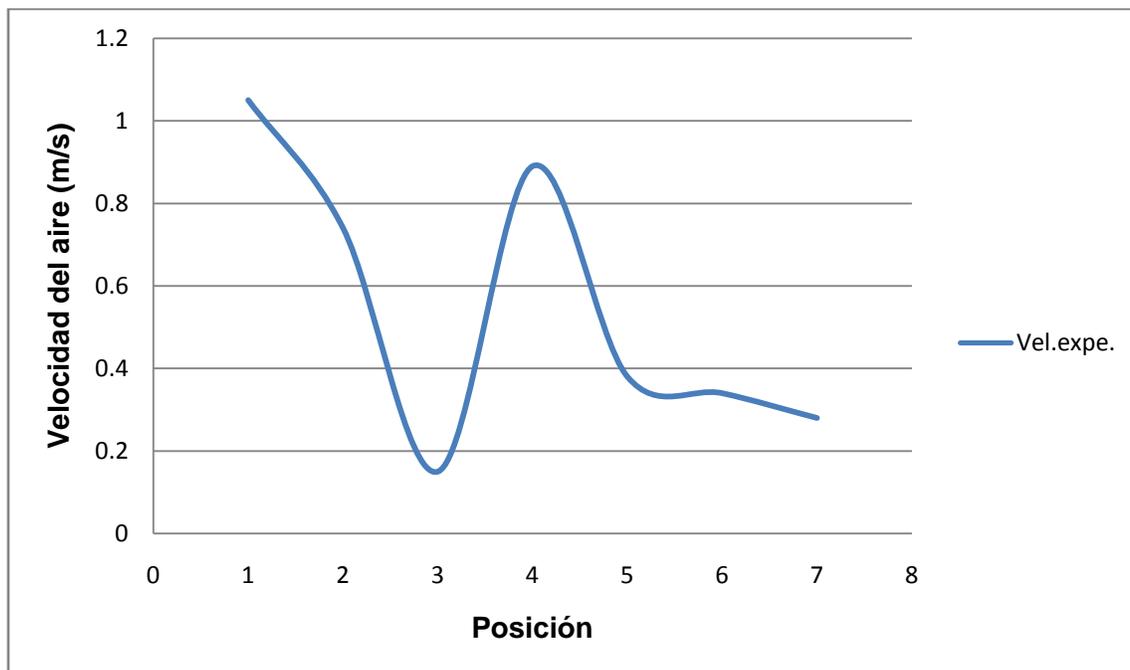


Figura 43. Perfil de velocidad del aire modelo de estibamiento directo con distribución transversal



**Figura 44. Perfil de velocidad del aire modelo de estibamiento con convertidores y distribución del flujo transversal**

En los tres modelos (Figuras 42, 43, 44) la velocidad más alta está a la salida del evaporador, el modelo de estibamiento donde se observa la velocidad más alta, de los tres es el de estiba directa, por el acomodo de la carga y la distribución del aire. El modelo *rack* el punto con mayor velocidad después del punto uno, es el punto cuatro ubicado en la parte superior de la carga seguido por el punto seis ubicado en la parte frontal de la carga, debido a que aquí no existe ningún obstáculo que le impida al aire recorrer el almacén rápidamente; la menor velocidad es el punto cinco ubicado entre la pared lateral derecha y la carga dado que la carga esta posicionada de forma transversal el aire encuentra obstáculos que dificultan su fluidez. En el modelo de estibamiento directo la velocidad se mantuvo similar en todos los puntos excepto el punto uno, esto quiere decir que el aire tarda en llegar a esa posición el mismo tiempo que a los demás.

**Tabla 19. ANOVA para perfiles de velocidad**

<b>Factor</b>	<b>S.C</b>	<b>gl</b>	<b>C.M.</b>	<b>F</b>	<b>F tablas</b>	
<b>Modelo</b>	0.053503544	2	0.02675177	1.8327814	2.329	2.270
<b>Distribución</b>	0.008438421	2	0.00421921	0.28906087	2.329	2.270
<b>Interacción</b>	0.923306257	4	0.23082656	15.8140789	1.973	4.270
<b>Error</b>	3.94099289	270	0.01459627			
<b>Total</b>	103.0796	278				

El modelo de convertidores el punto con mayor velocidad es el punto ubicado en la parte superior de la carga (4), la de menor velocidad es la ubicada en la parte posterior (3) gracias al acomodo y a la forma de distribuir el aire.

La velocidad máxima se alcanza a la salida del evaporador y disminuye conforme avanza a lo largo del almacén, lo cual genera una variación de la temperatura mientras el aire avanza a la posición de medición.

Las velocidades más altas se ubicaron entre las paredes laterales y la carga, las que estaban ubicadas a la mitad del pasillo, en las demás posiciones la velocidad es similar a la que se midió en el punto dos (a la entra del aire al evaporador), por el acomodo de la carga y la forma de distribuir, pues en las zonas de velocidad alta no se encuentran obstáculos que dificulten la fluidez del aire.

Tabla 20. ANOVA entre combinaciones

		<b>RACK- VERT</b>	<b>RACK- TRAN</b>	<b>DIR- LOG</b>	<b>DIR- VERT</b>	<b>DIR- TRAN</b>	<b>CONV- LOG</b>	<b>CONV- VERT</b>	<b>CONV- TRAN</b>
		<b>M2</b>	<b>M3</b>	<b>M4</b>	<b>M5</b>	<b>M6</b>	<b>M7</b>	<b>M8</b>	<b>M9</b>
<b>RACK- LOG</b>	M1	0.620	2.703	4.668	0.169	2.836	4.070	4.161	5.624
<b>RACK- VERT</b>	M2		2.083	4.049	0.451	2.216	3.450	3.542	5.004
<b>RACK- TRAN</b>	M3			1.966	2.534	0.133	1.367	1.459	2.921
<b>DIR- LOG</b>	M4				4.499	1.833	0.599	0.507	0.956
<b>DIR- VERT</b>	M5					2.667	3.901	3.992	5.455
<b>DIR- TRAN</b>	M6	<b>TABLAS</b>	<b>1.973</b>				1.234	1.326	2.788
<b>CONV- LOG</b>	M7							0.092	1.554
<b>CONV- VERT</b>	M8								1.463

El análisis de varianza muestra los mismos resultados que en la temperatura individualmente los factores no tienen diferencias significativas (Tabla 19) pero en combinación presenta diferencias significativas (Tabla 20), siendo las combinaciones con más diferencias; el modelo de estibamiento *rack* y distribución del flujo de aire longitudinal y el mismo modelo con distribución del flujo vertical.

En la velocidad del aire hay una gran influencia de la distribución de aire y el modelo de estibamiento esto hace que las velocidades sean diferentes en cada punto crítico, por lo que resultan las ecuaciones diferentes en cada experimento.

### 3.1.2.3 Perfiles de humedad relativa

a) Distribución longitudinal.

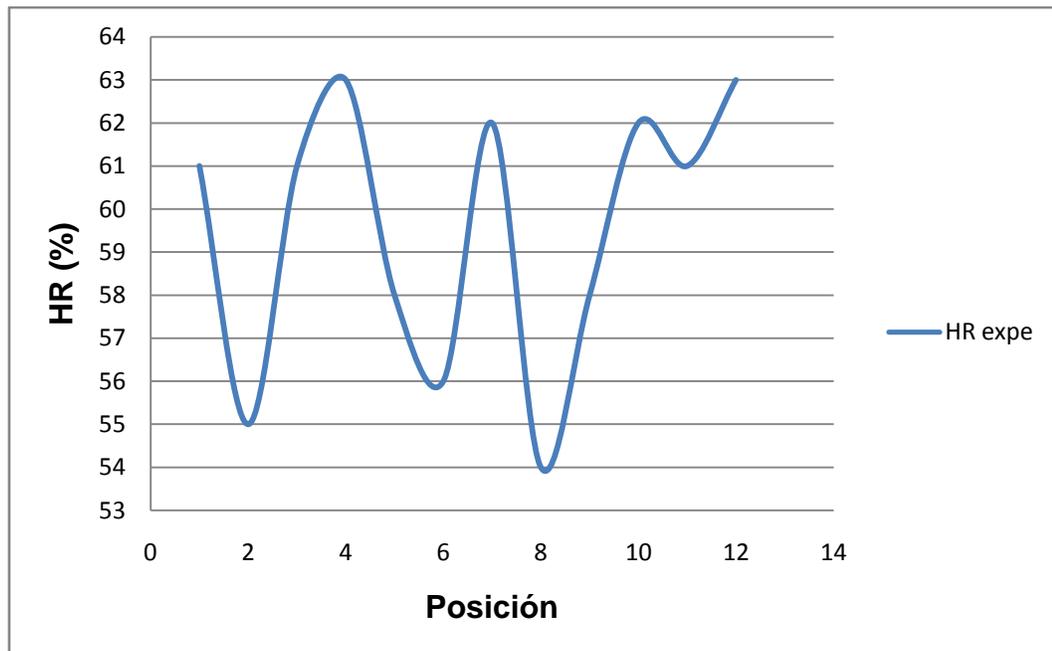
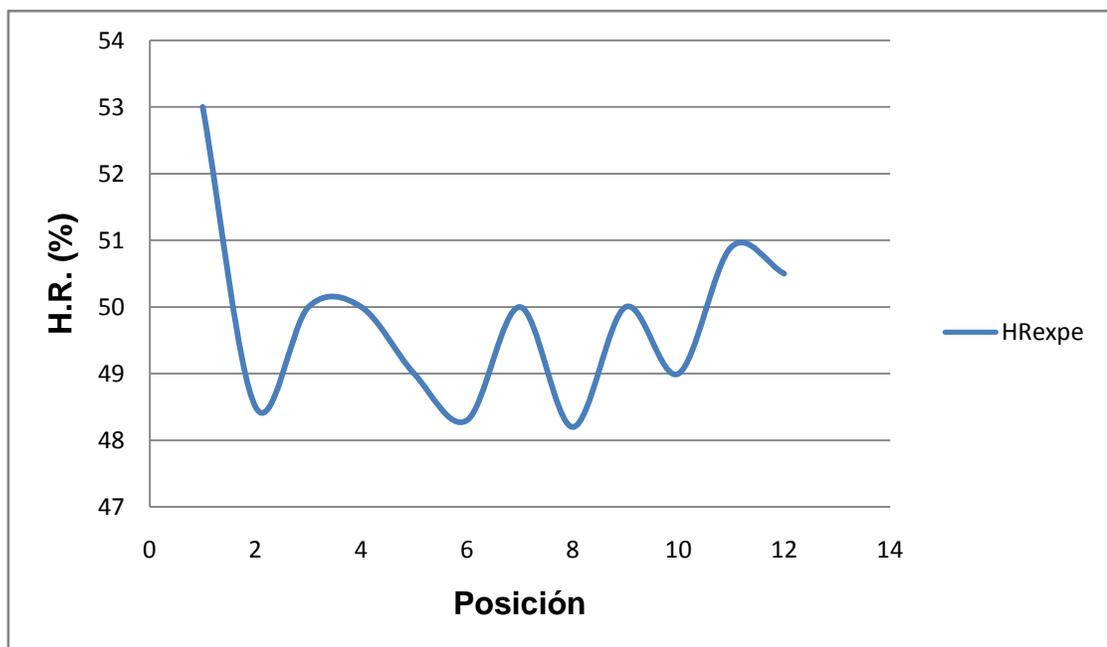


Figura 45. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo longitudinal

Tabla 21. Prueba de *Tukey* del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo longitudinal

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
1	3	61.167	0.153	
2	3	55.167	0.153	(-*)
3	3	61.167	0.153	
4	3	63.100	0.100	
5	3	58.167	0.153	(-*)
6	3	56.167	0.153	(*)
7	3	62.100	0.100	
8	3	54.167	0.153	(-*)
9	3	58.100	0.100	
10	3	62.100	0.100	
11	3	61.500	0.700	(-*)
12	3	64.433	1.242	(-*)

En el experimento de distribución de flujo del aire longitudinal con modelo de estibamiento *rack* (Figura 45), estadísticamente se encuentran tres zonas de distribución de la humedad relativa; la zona de humedad más baja es en la cara frontal de la carga y la entrada del aire al evaporador (Tabla 21). La siguiente zona con menor humedad relativa es a la mitad del pasillo, estas zonas están libres de tarimas por lo que el aire circula fácilmente y no permite que haya condensación. La zona con humedad relativa alta, es a la salida del aire del evaporador, los puntos entre tarimas y paredes laterales y traseras, en la parte de arriba de la carga, lo anterior se debe que el aire no circula tan rápidamente por los obstáculos que encuentra con el acomodo de las tarimas, que tiende a hacer que el vapor de agua del aire se condense.

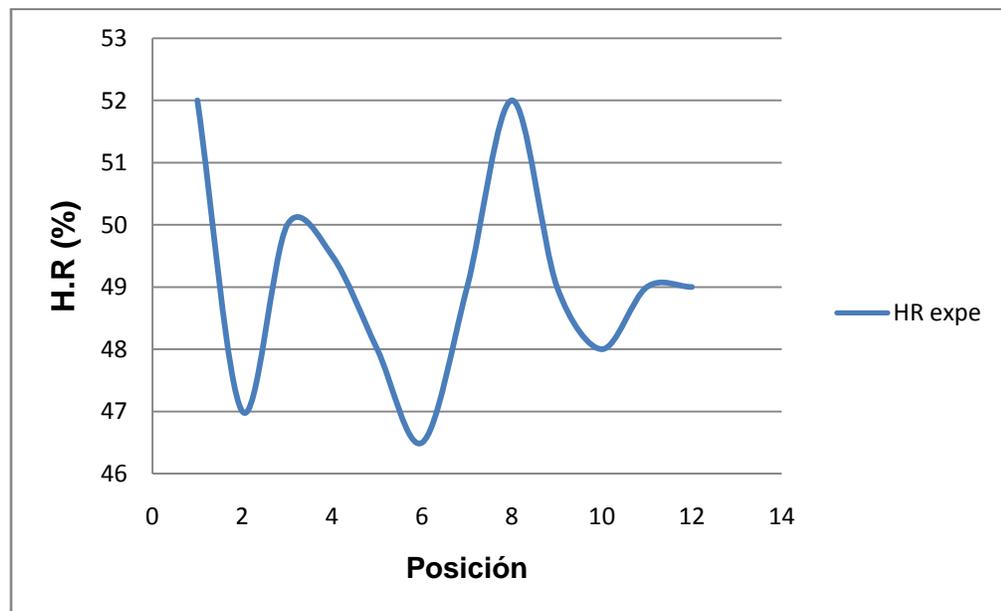


**Figura 46. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal**

**Tabla 22. Prueba de *Tukey* del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
1	3	53.1000	0.1000	
2	3	48.6000	0.1000	(*)
3	3	50.1000	0.1000	
4	3	50.1000	0.1000	(*)
5	3	49.1000	0.1000	(*)
6	3	48.3000	0.1000	(*)
7	3	50.1000	0.1000	(*)
8	3	48.2000	0.1000	(*)
9	3	50.1000	0.1000	(*)
10	3	49.1000	0.1000	(*)
11	3	50.8667	0.0577	(*)
12	3	50.4667	0.0577	(*)

En este experimento con modelo de estibamiento directo, estadísticamente se distinguen tres zonas (Figura 46 y tabla 22), la humedad relativa alta es la que se encuentra a la salida del aire del evaporador, la siguiente zona con humedad relativa alta es el espacio que existe entre las paredes, techo y tarimas, además del pasillo medio, aquí también el aire no circula rápidamente por los obstáculos encontrados por el acomodo de la carga y el vapor de agua del aire tiende a condensarse.



**Figura 47. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal**

**Tabla 23. Prueba de Tukey del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
1	3	52.100	0.100	
2	3	47.100	0.100	(*)
3	3	50.100	0.100	
4	3	49.500	0.100	
5	3	48.100	0.100	(*)
6	3	46.500	0.100	(*)
7	3	49.100	0.100	
8	3	52.100	0.100	
9	3	49.100	0.100	
10	3	48.100	0.100	(*)
11	3	49.100	0.100	
12	3	49.100	0.100	

En este experimento con modelo de estibamiento de convertidores, estadísticamente existen tres zonas (Tabla 23), la mayor humedad relativa se concentra a la salida del aire del evaporador (Figura 47) y en la parte frontal derecha de la carga (posición 8) la humedad relativa del aire alta en esta posición es debido a modelo de estibamiento y el acomodo de la carga. La siguiente zona con mayor humedad relativa es donde se encuentran los convertidores, aquí el aire gracias al acomodo de los convertidores no circula rápidamente y el vapor de agua del aire se tiende a condensar. La zona con humedad relativa baja es donde no encontramos ningún obstáculo para que el aire circule, la cual está a la entrada del evaporador y la parte frontal de la carga de lado izquierdo.

En ninguno de los experimentos se observa humedad relativa homogénea, tiene un comportamiento similar por zonas, siendo la de mayor humedad relativa a la salida del aire del evaporador, seguida por la zona donde se encuentra la carga, la zona con menor humedad relativa es la zona frontal de la carga, todo se debe al acomodo de las tarimas que impiden o permiten la circulación del aire, si el aire no circula rápidamente el vapor de agua del aire tiende a condensarse.

b) Distribución de aire vertical.

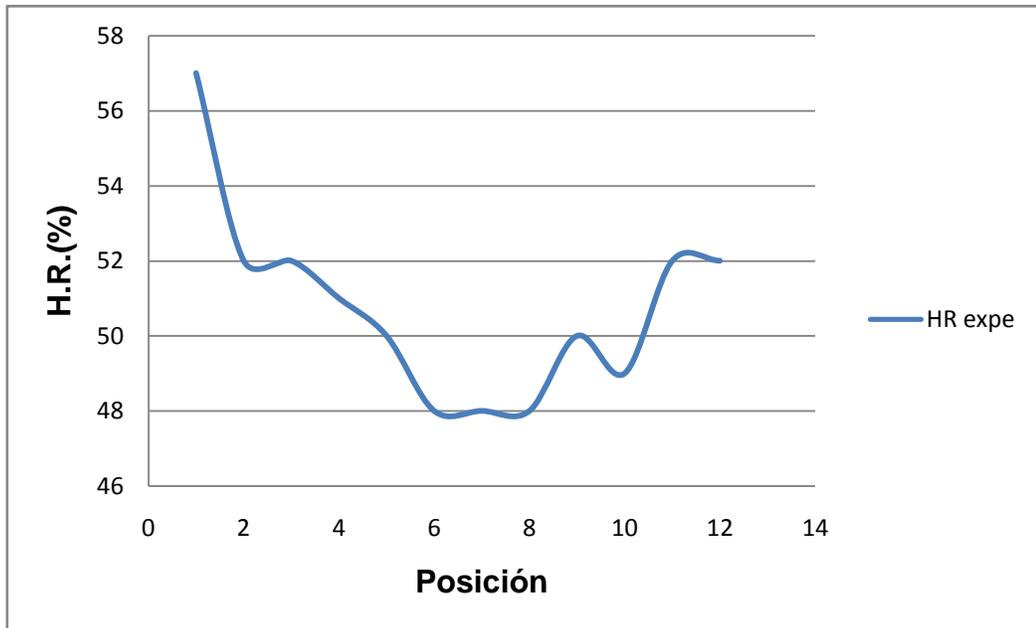


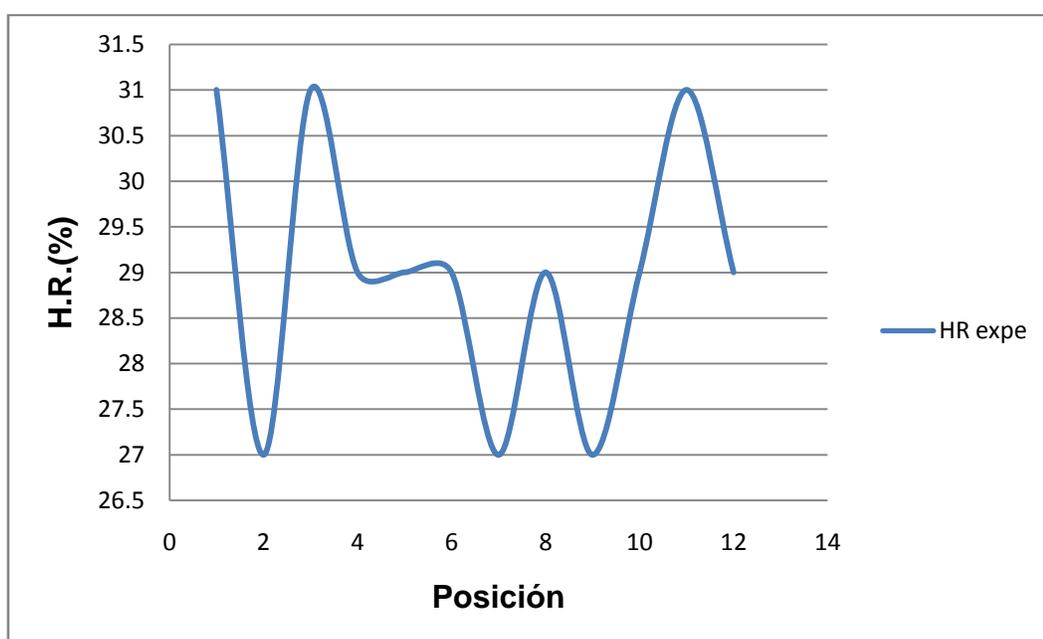
Figura 48. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo vertical

Tabla 24. Prueba de *Tukey* del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo vertical

Nivel	N	Media	Desv.Est.	
1	3	57.100	0.100	
2	3	52.100	0.100	
3	3	52.100	0.100	*)
4	3	51.100	0.100	*)
5	3	50.100	0.100	*)
6	3	48.100	0.100	*)
7	3	48.100	0.100	*)
8	3	48.100	0.100	*)
9	3	50.100	0.100	*)
10	3	49.100	0.100	*)
11	3	52.100	0.100	*)
12	3	52.100	0.100	*)

La humedad está dividida en tres zonas (Figura 48 y Tabla 24), siendo la zona con humedad relativa alta donde está la salida del aire del evaporador, la zona que

sigue de mayor humedad relativa es donde la parte de arriba de la carga y el espacio entre las tarimas y la pared trasera de la cámara, a la entrada del aire al evaporador, el vapor de agua del aire tiende a condensar por la circulación del aire que se ve afectado por el acomodo de las tarimas y la forma de distribución del aire. La zona donde el aire circula con mayor fluidez por lo tanto es la ubicada en las paredes laterales, la parte frontal de la carga y el pasillo medio de la cámara, aquí influye la forma de distribución del aire.



**Figura 49. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical**

En estibamiento directo con distribución de flujo del aire en forma vertical (Figura 49 y Tabla 25), la zona con mayor humedad relativa es a la salida del evaporador y en la parte posterior de la cámara; la siguiente zona se ubica de la cámara en parte de arriba, lateral y frontal de la carga, en el pasillo medio del lado izquierdo. La zona con menor humedad relativa a la entrada del aire al evaporador, la pared lateral izquierda y el pasillo medio derecho.

Tabla 25. Prueba de *Tukey* del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical

Nivel	N	Media	Desv.Est.				
1	3	31.167	0.153				(-*)
2	3	27.100	0.100	(-*)			
3	3	31.167	0.153				(-*)
4	3	29.100	0.100			(-*)	
5	3	29.100	0.100			(-*)	
6	3	29.100	0.100			(-*)	
7	3	27.100	0.100	(-*)			
8	3	28.900	0.458			(-*)	
9	3	27.100	0.100	(-*)			
10	3	29.167	0.153			(-*)	
11	3	31.167	0.153				(-*)
12	3	29.100	0.100			(-*)	

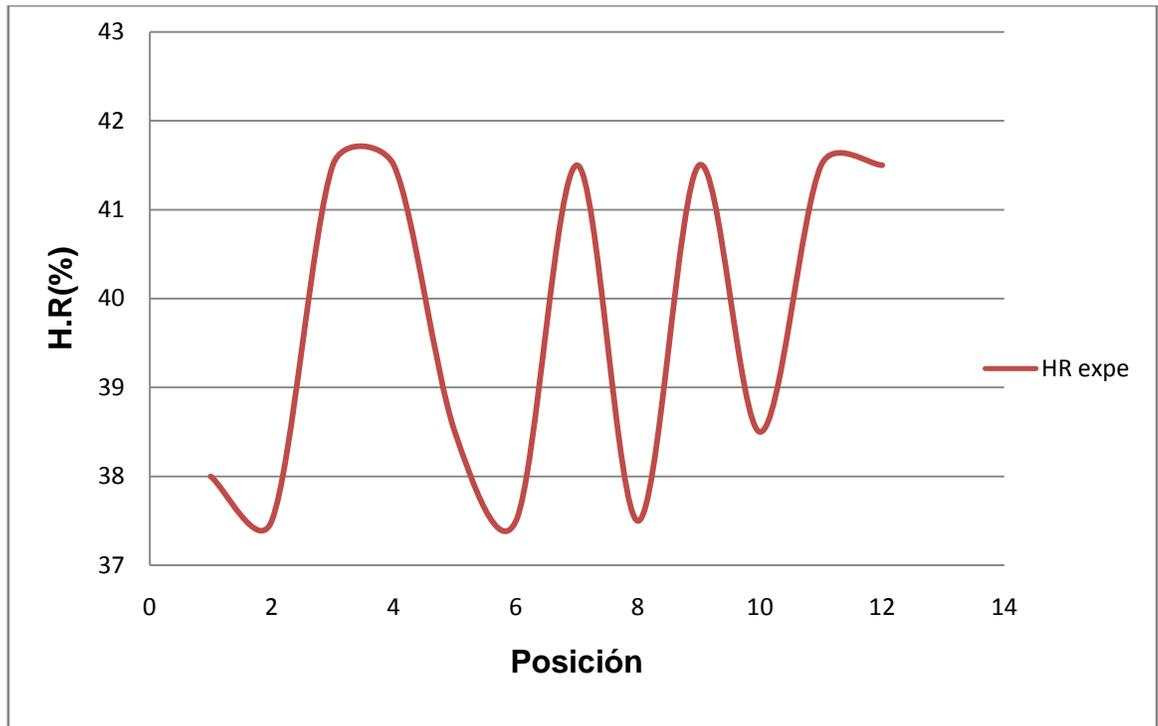


Figura 50. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical

**Tabla 26. Prueba de Tukey del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical**

Nivel	N	Media	Desv.Est.			
1	3	38.100	0.100		(-*)	
2	3	37.467	0.153		(-*)	
3	3	41.667	0.153			(-*)
4	3	41.667	0.153			(-*)
5	3	38.667	0.153		(-*)	
6	3	37.167	0.666	(-*)		
7	3	41.500	0.100			(-*)
8	3	37.500	0.100	(-*)		
9	3	41.600	0.100			(*)
10	3	38.600	0.100		(*)	
11	3	41.467	0.153			(*)

En el experimento con convertidores, estadísticamente (Tabla 26) se obtuvieron dos zonas, la humedad relativa más alta fue en la carga la parte de arriba y trasera, la pared lateral del lado izquierdo, pasillo medio de lado derecho. La zona con menos humedad relativa es a la salida y entrada del aire, la parte frontal de la carga, la pared lateral del lado derecho, pasillo medio de lado izquierdo. Esto se debe a la distribución de flujo del aire y forma de acomodar los convertidores, el vapor de agua del aire se condensa (Figura 50).

En los tres modelos, se tuvo la misma tendencia; la zona con mayor humedad relativa es a la salida del aire del evaporador, la parte de arriba y posterior de la carga. La de menor humedad la zona de la parte frontal de la carga y la entrada del aire al evaporador. La distribución de la humedad relativa está influenciada por la distribución de flujo del aire y el modelo de estibamiento pues esto define que el vapor de agua en el aire se condense o no.



En el modelo de estibamiento con *rack* (Figura 51), la zona con mayor humedad relativa está en la entrada y salida del evaporador, seguida por la zona de la pared lateral izquierda, la zona con menor humedad fue en la pared lateral derecha, arriba, posterior y frontal de la carga (Tabla 27). La humedad relativa del aire alta se debe al acomodo de las tarimas, que al impedir que el aire fluya ocasiona que el vapor de agua del aire se condense.

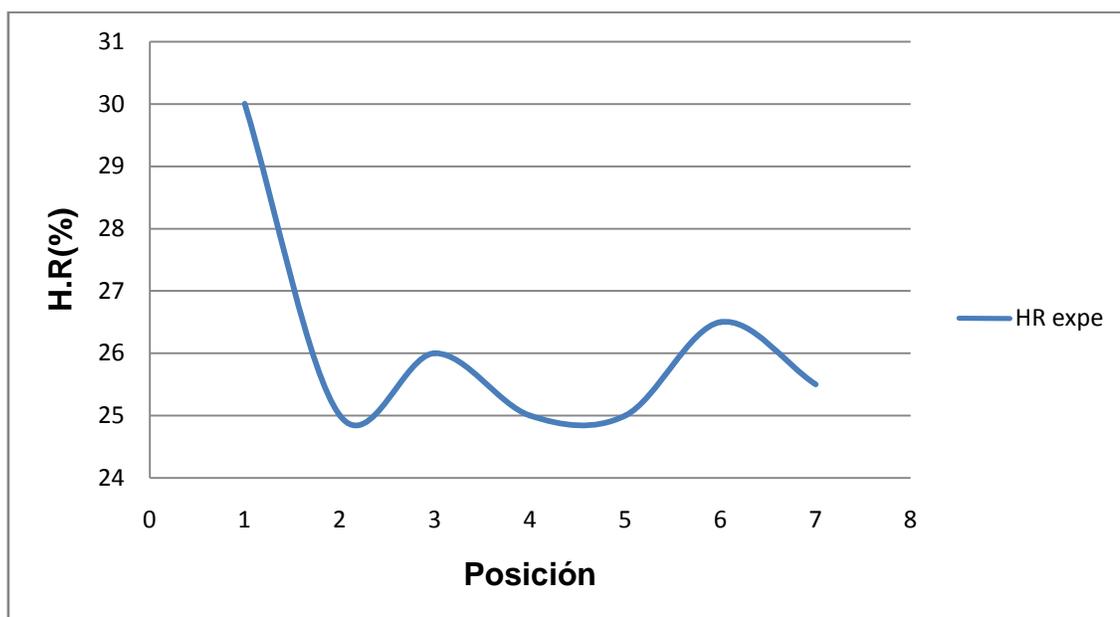


Figura 52. Perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal

Tabla 28. Prueba de *Tukey* del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal

Nivel	N	Media	Desv.Est.	-----+-----+-----+-----+-----	
1	3	30.200	0.200		(*-)
2	3	25.133	0.153	(*-)	
3	3	26.167	0.153		(*-)
4	3	25.100	0.100	(*-)	
5	3	25.100	0.100	(*-)	
6	3	26.633	0.153		(*-)
7	3	25.600	0.100	(*-)	

La humedad relativa más alta en este modelo (Figura 52), fue en la zona a la salida del evaporador, la siguiente zona es la pared lateral izquierda, frontal y



En el modelo de convertidores (Figura 53), la zona con humedad relativa alta se ubica en la pared lateral derecha. La siguiente zona estadísticamente (Tabla 29) con mayor humedad relativa se ubica en la entrada y salida del evaporador, en la parte lateral izquierda, frontal y trasera de la carga, esto se debe al acomodo de las tarimas que impiden la circulación rápida del aire y el vapor de agua de este se condense. La zona de menor humedad se ubica en la parte de arriba de la carga. En el caso de convertidores, la zona con humedad relativa alta se concentró en la salida del evaporador, pared izquierda, frontal y trasera.

El acomodo de las tarimas y distribución del flujo de aire, influye en la circulación del aire a lo largo de la cámara lo que causa que el vapor de agua del aire tienda a condensarse, así en las zonas donde la humedad relativa no es alta el aire circula sin ningún obstáculo.

En las Tablas 30 y 31 la humedad relativa todas tienen un comportamiento muy diferente en todos los eventos, además que las humedades son bajas en comparación a las encontradas en la bibliografía, puesto que en el momento de simular la carga se utilizó poliestireno expandido; al contrario de lo que sucede con el agua en estado líquido, el vapor de agua sí puede difundirse en el interior de la estructura celular del EPS, cuando entre ambos lados del material se establece un gradiente de presiones y temperaturas; por lo tanto al paso del tiempo absorbió parte de la humedad que existía en el medio, pero no influyó en la manera de distribuirse a lo largo de la cámara.

En cada distribución de flujo de aire se definieron zonas de alta, baja humedad relativa y en cada modelo las zonas eran las mismas. Esto es en consecuencia del acomodo de las tarimas y la distribución del aire, pues el aire al no circular fácilmente, su vapor de agua se condensa.

**Tabla 30. ANOVA para perfiles de humedad relativa**

Factor	S.C.	g.l.	C.M.	F	F tablas	
Modelo	169.0063141	2	84.503157	0.58146694	2.329	2.270
Distribución	92.78143744	2	46.3907187	0.31921493	2.329	2.270
Interacción	9547.82082	4	2386.95521	16.4246591	1.973	4.270
Error	39238.43429	270	145.327534			
Total	583592.25	278				

**Tabla 31. ANOVA entre combinaciones**

		RACK- VERT	RACK- TRAN	DIR- LOG	DIR- VERT	DIR- TRAN	CONV- LOG	CONV- VERT	CONV- TRAN
		M2	M3	M4	M5	M6	M7	M8	M9
<b>RACK-LOG</b>	M1	20.935	74.739	23.896	76.552	83.802	25.165	49.378	7.311
<b>RACK- VERT</b>	M2		53.804	2.961	55.616	62.867	4.229	28.443	13.625
<b>RACK- TRAN</b>	M3			50.843	1.813	9.063	49.574	25.361	67.428
<b>DIR-LOG</b>	M4				52.656	59.906	1.269	25.482	16.585
<b>DIR-VERT</b>	M5	TABLAS	1.973			7.250	51.387	27.174	69.241
<b>DIR-TRAN</b>	M6						58.637	34.424	76.491
<b>CONV-LOG</b>	M7							24.213	17.854
<b>CONV- VERT</b>	M8								42.067

### **3.1.3 Simulación de los patrones de en un almacén frigorífico**

A continuación se presenta las curvas de simulación y experimentales de los perfiles de temperatura, velocidad y humedad relativa del aire dentro del almacén frigorífico. Para la ecuación utilizada en la simulación de los perfiles de temperatura ya antes mencionada, se obtuvieron valores de amplitud y periodo (Apéndice A). El programa se anexa en un *CD* como Apéndice B.

#### **3.1.3.1 Simulación de los perfiles de temperatura**

Al realizar el análisis estadístico se determinó que no existen diferencias significativas entre los datos calculados con las ecuaciones definidas para la simulación y las experimentales. Se utilizó la serie de Fourier debido a que existe un comportamiento sinusoidal, es decir que el aire se comporta como una onda puesto que tiene un ciclo, por lo cual se usaron estas ecuaciones en la simulación.

a) Distribución tipo longitudinal.

En todos los experimentos la ecuación que describe el comportamiento de la temperatura es la misma solo cambian los valores de amplitud y periodo (Apéndice A), esto es porque la temperatura depende del trabajo del compresor; la distribución del flujo del aire y el modelo es de estibamiento influyen en el diferencial de temperaturas que existe entre cada punto del almacén.

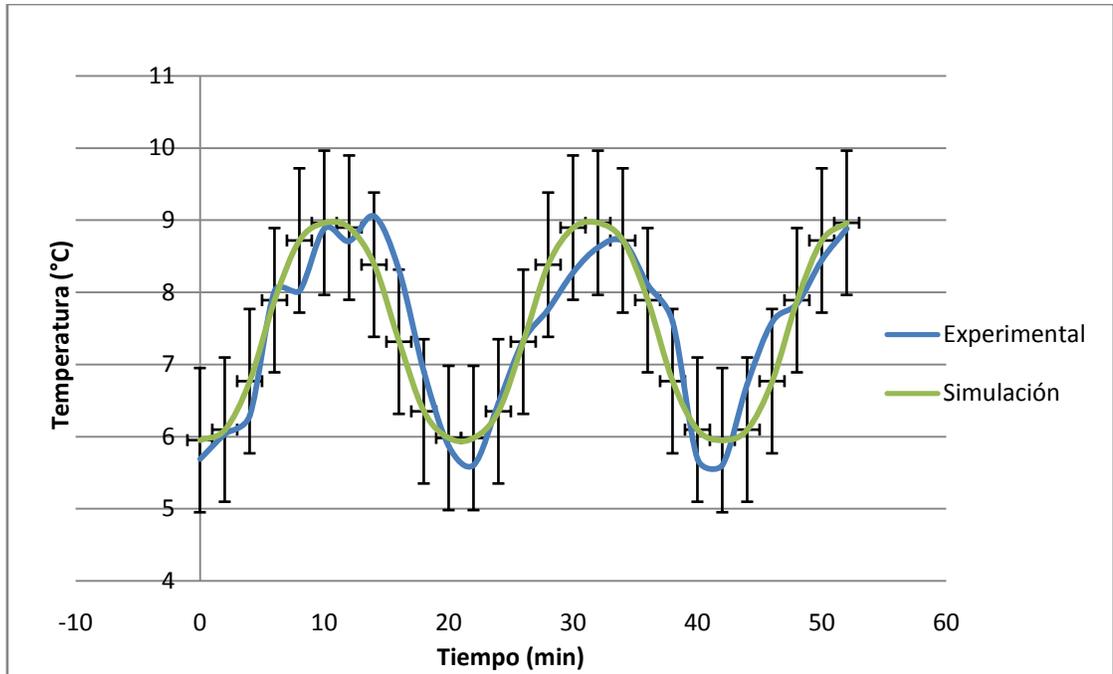


Figura 54. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo longitudinal

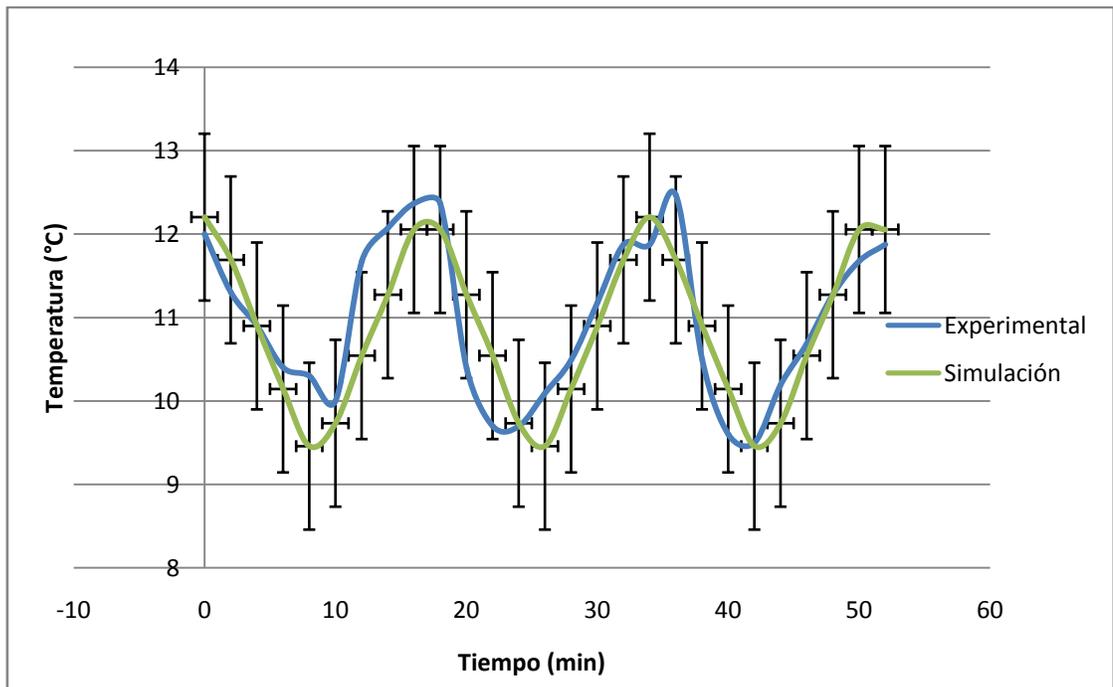


Figura 55. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal

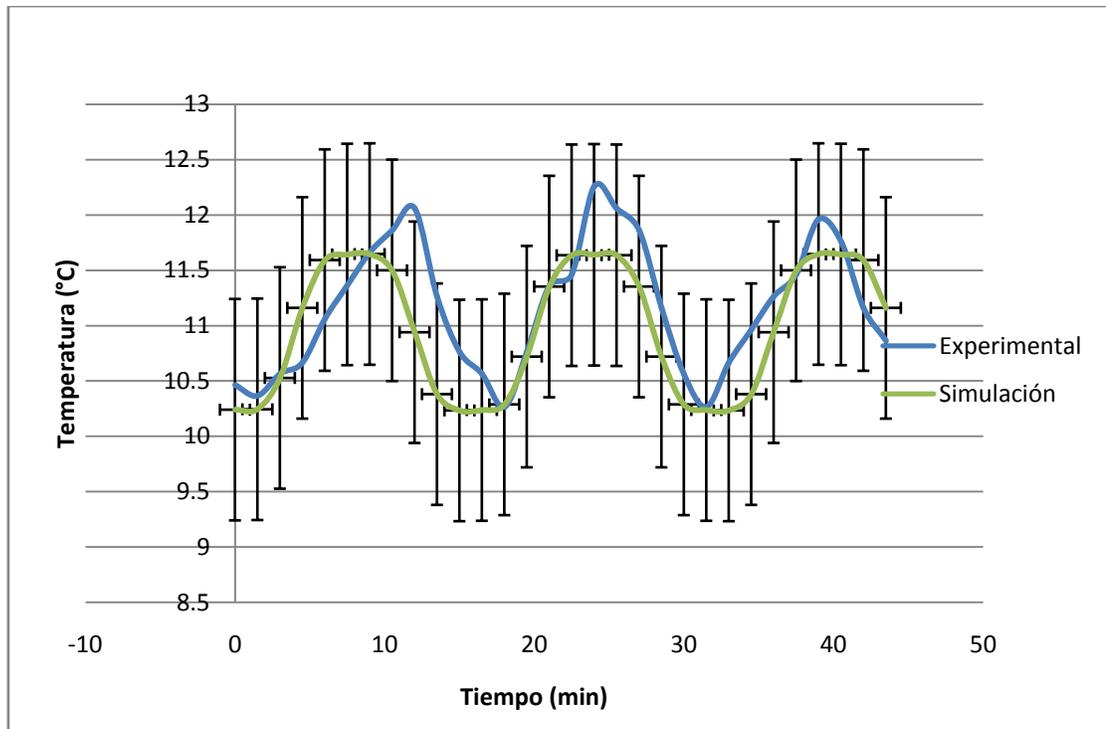


Figura 56. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal

Tabla 32. Prueba de *Tukey* de la amplitud de las ecuaciones de distribución longitudinal con los tres modelos de estibamiento.

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
Rack	3	1.46667	0.00000	*
Direc	3	1.75667	0.00000	*
Conve	3	1.83333	0.00000	*

-----+-----+-----+-----+-----  
 1.50      1.60      1.70      1.80

En los tres casos (Figuras 54, 55, 56) las curvas no rebasan las barras de error del cinco por ciento que equivale a  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Con esto se comprueba que el programa es confiable, a las condiciones experimentadas.

**Tabla 33. Prueba de Tukey de los periodos de las ecuaciones de de distribución longitudinal con los tres modelos de estibamiento**

Nivel	N	Media	Desv.Est.	ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada
rack	3	17.5917	0.0000	-----+-----+-----+-----+-----+ * -----+-----+-----+-----+-----+
dire	3	18.7750	0.0000	* -----+-----+-----+-----+-----+
conv	3	15.1250	0.0000	* -----+-----+-----+-----+-----+

16.0      17.0      18.0      19.0

En las Tablas 32 y 33, muestran las pruebas de tukey realizadas a los promedios de las amplitudes y periodos de las ecuaciones de cada punto en la cámara, el modelo de estibamiento con una amplitud menor es el *rack*, que a su vez es el que tiene el periodo más largo.

La amplitud es el resultado de la diferencia del punto más bajo de la curva al punto más alto, el periodo señala el tiempo que tarda en realizar un ciclo, por lo que se determina que al tener una distribución de flujo del aire en forma longitudinal lo más conveniente en cuanto a mayor control de temperaturas y por lo tanto de humedad es utilizar *rack*. Lo menos conveniente es el uso de convertidores ya que se tendría menor control de la temperatura.

*b) Distribución tipo vertical.*

En las siguientes figuras (57, 58, 59), muestran las curvas obtenidas de la simulación y las experimentales, estadísticamente tienen un error del cinco por ciento.

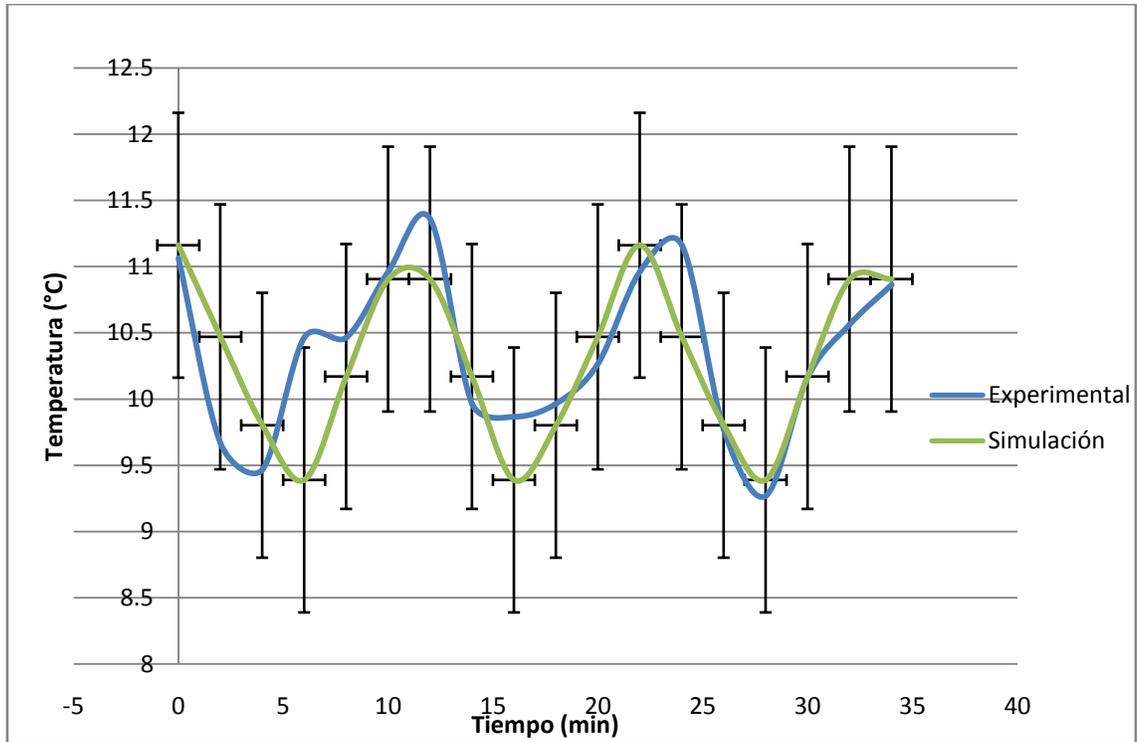


Figura 57. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo vertical

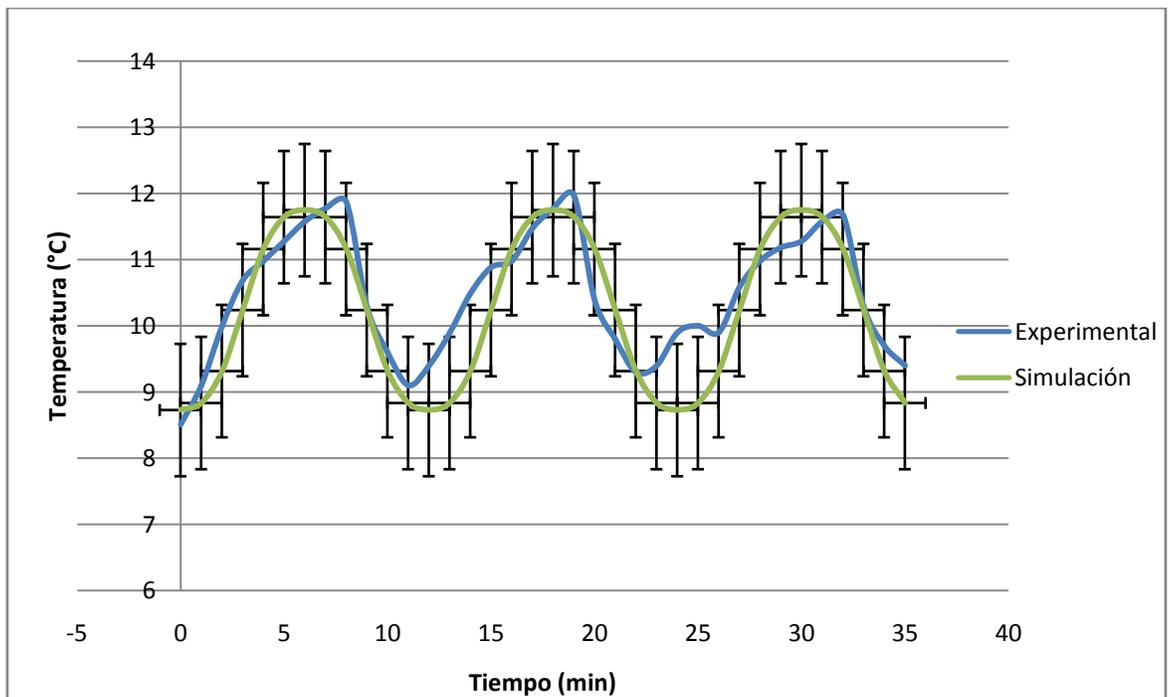


Figura 58. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical

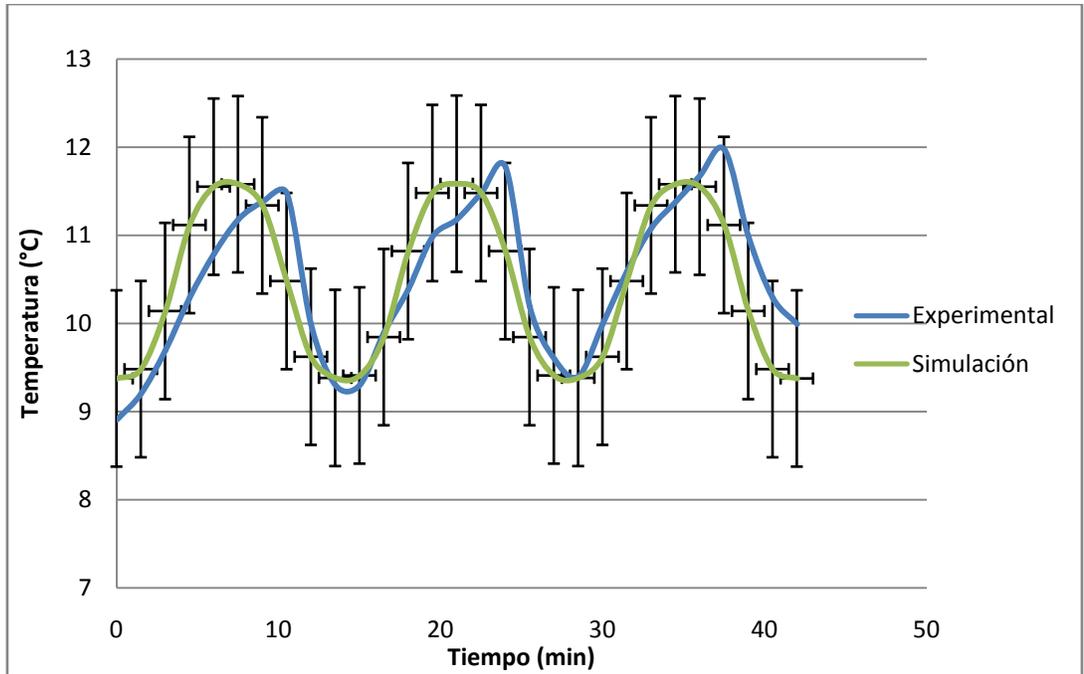


Figura 59. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical

Tabla 34. Prueba de *Tukey* de la amplitud de distribución vertical con los tres modelos de estibamiento

Nivel	N	Media	Desv.Est.
Rack	3	1.85000	0.00000
Direc	3	1.89167	0.00000
Conver	3	1.71667	0.00000

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

```

-----+-----+-----+-----+
                *
                *
*
-----+-----+-----+-----+
          1.750   1.800   1.850   1.900

```

Tabla 35. Prueba de *Tukey* de los periodos de distribución vertical con los tres modelos de estibamiento.

Nivel	N	Media	Desv.Est.
Rack	3	11.6167	0.0000
Direc	3	11.7917	0.0000
Conver	3	14.0833	0.0000

ICs de 95% individuales para la media basados en Desv.Est. agrupada

```

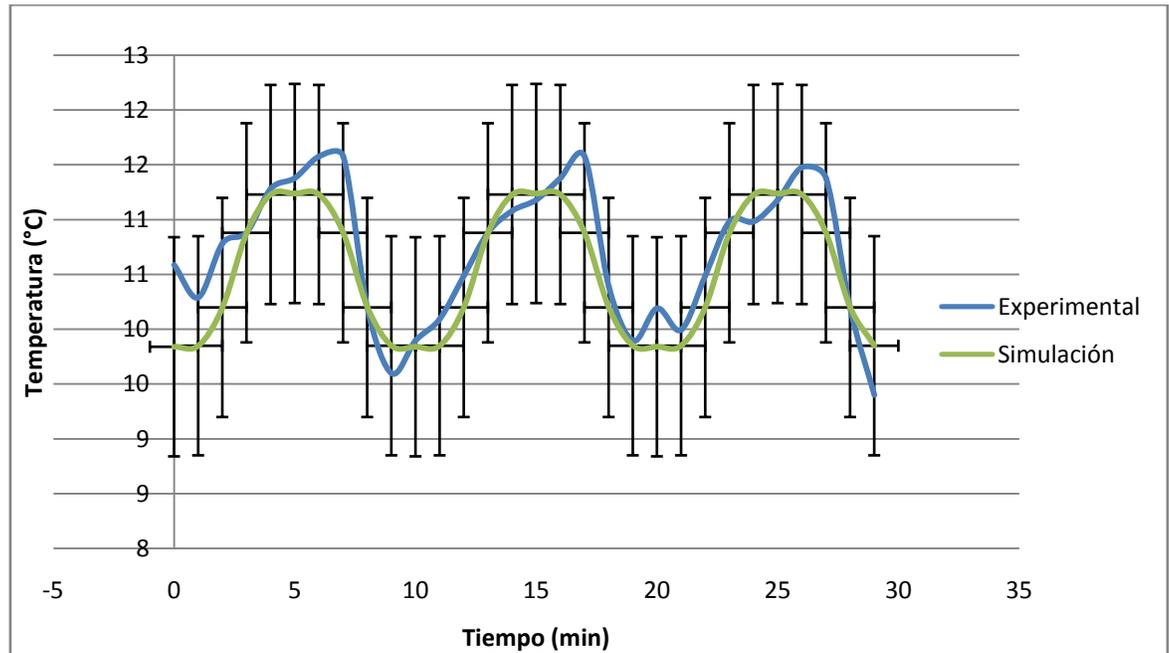
-----+-----+-----+-----+
*
*
*
-----+-----+-----+-----+
    11.90   12.60   13.30   14.00

```

En las Tablas (34 y 35) se muestran las pruebas de Tukey aplicadas a los tres modelos de estibamiento. Teniendo como resultado que en la distribución de flujo de aire vertical para el mayor control de temperatura se utilicen convertidores, al tener una amplitud menor que los demás modelos y un periodo mayor.

c) Distribución tipo transversal

En las figuras 60, 61, 62 se muestran el perfil de temperaturas simulado y experimental, al validar la simulación, existe un margen de error del 5% ( $\pm 1^\circ\text{C}$ ).



**Figura 60. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo transversal**

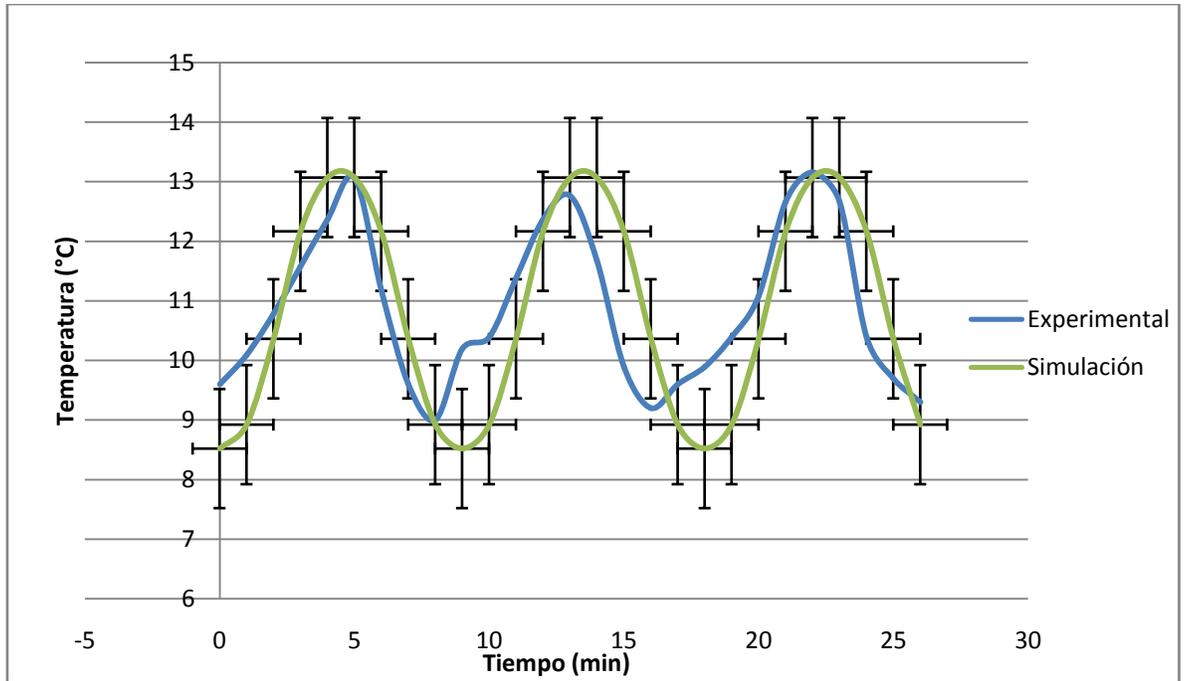


Figura 61. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal

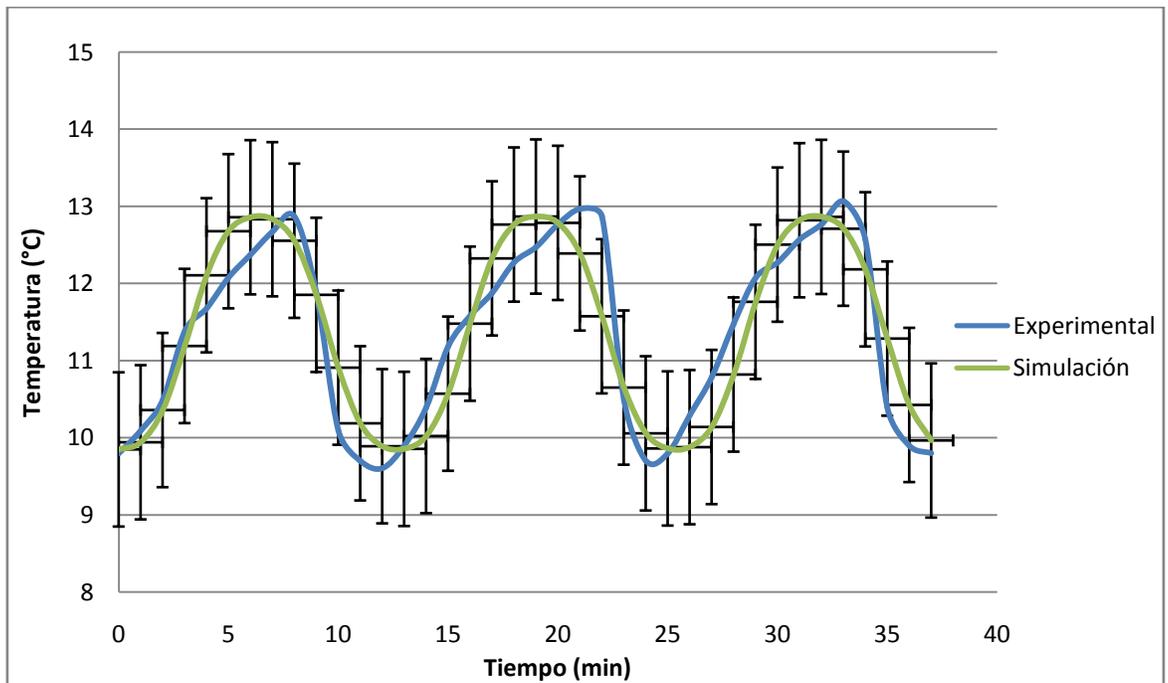
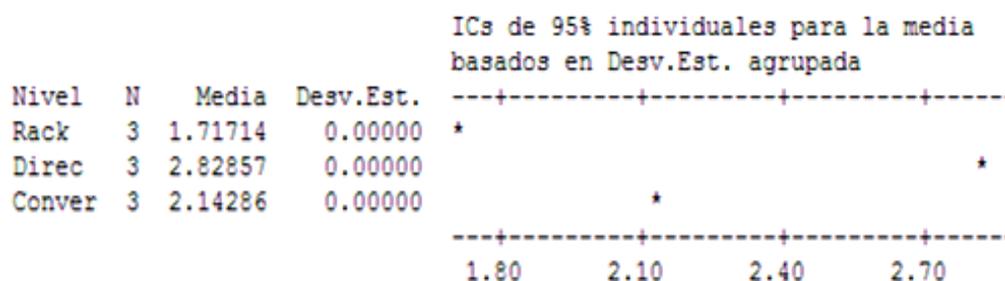


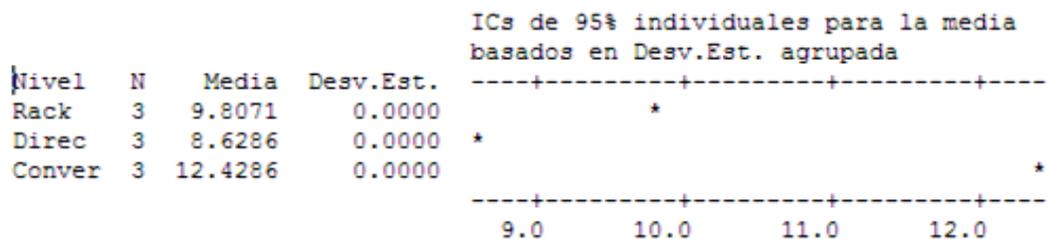
Figura 62. Simulación del perfil de temperatura del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal

En las Tablas 36 y 37 se muestran las pruebas de Tukey aplicadas a los tres modelos de estibamiento. Teniendo como resultado que en la distribución de flujo de transversal para el mayor control de temperatura se utilicen estibamiento directo, al tener una amplitud menor que los demás modelos y un periodo mayor.

**Tabla 36 . Prueba de *Tukey* de la amplitud de distribución transversal con los tres modelos de estibamiento**



**Tabla 37. Prueba de *Tukey* de los periodos de distribución transversal con los tres modelos de estibamiento.**



### 3.1.3.2 Perfiles de velocidad del aire.

a) Distribución tipo longitudinal.

En las Figuras 63, 64, 65 se muestran los perfiles de velocidad de los tres modelos de estibamiento con distribución de aire de tipo longitudinal. Al validar la simulación en los tres casos se tiene un margen de error del cinco por ciento.

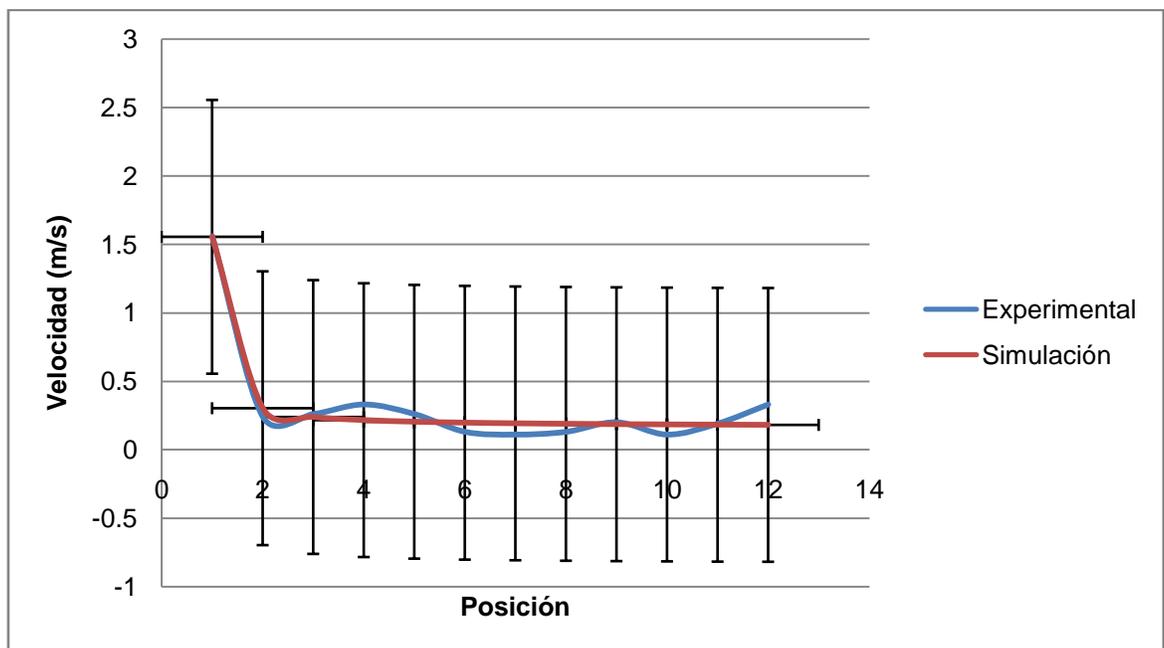


Figura 63. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo longitudinal

Ecuación de comportamiento.

$$v = \frac{0.168 * P}{-0.892 + P}$$

El modelo de estibamiento directo y convertidores, se rigen por la misma ecuación solo cambian sus valores, estibamiento con rack es diferente a los otros dos.

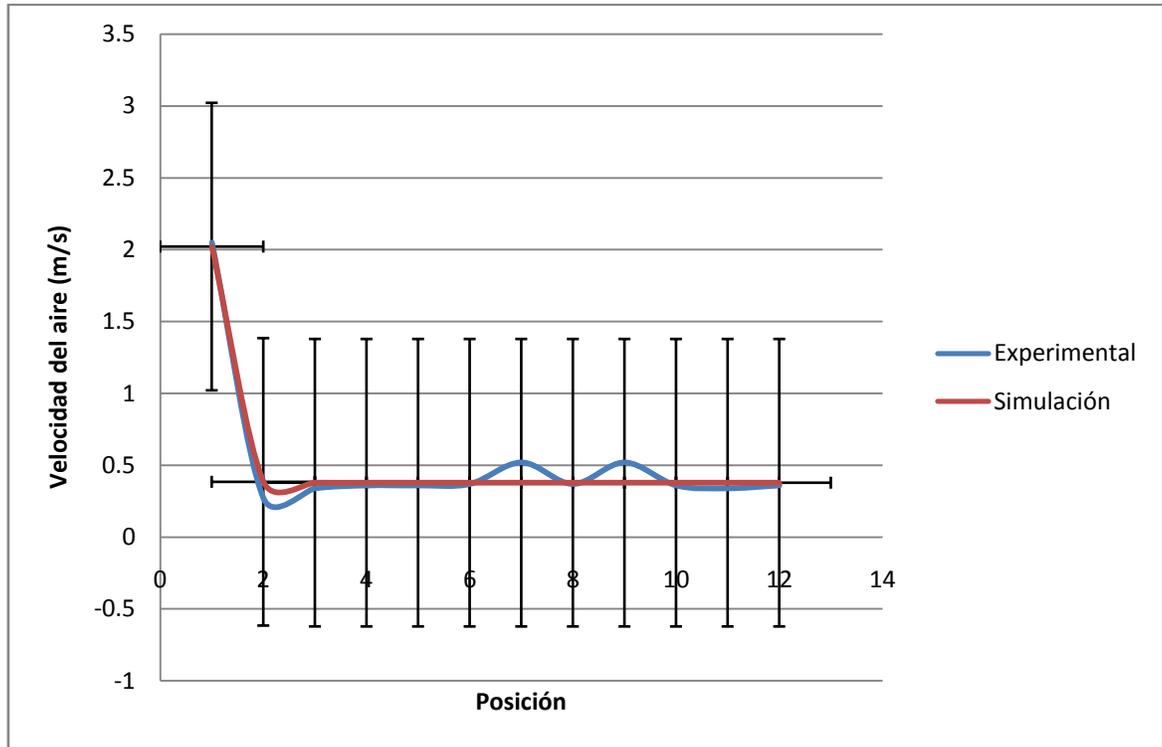


Figura 64. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal

Ecuación de comportamiento:

$$v = \frac{0.378}{1 + (-41.8)} * EXP(-3.94 * P)$$

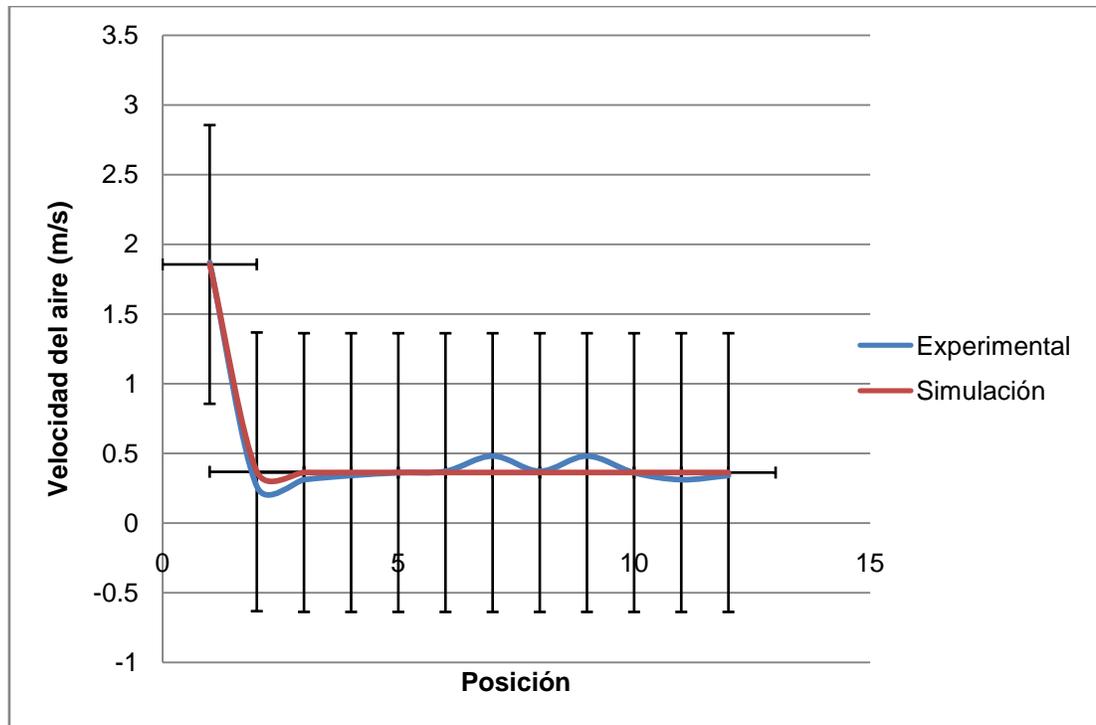


Figura 65. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal

Ecuación de comportamiento:

$$v = \frac{0.361}{1 + (-43.1)} * EXP(-3.98 * P)$$

b) Distribución tipo vertical

En los tres modelos de estibamiento (Figuras 66, 67, 68) sus ecuaciones son diferentes, se presentan las curvas experimentales y las simuladas, estadísticamente tienen un margen de error del cinco por ciento.

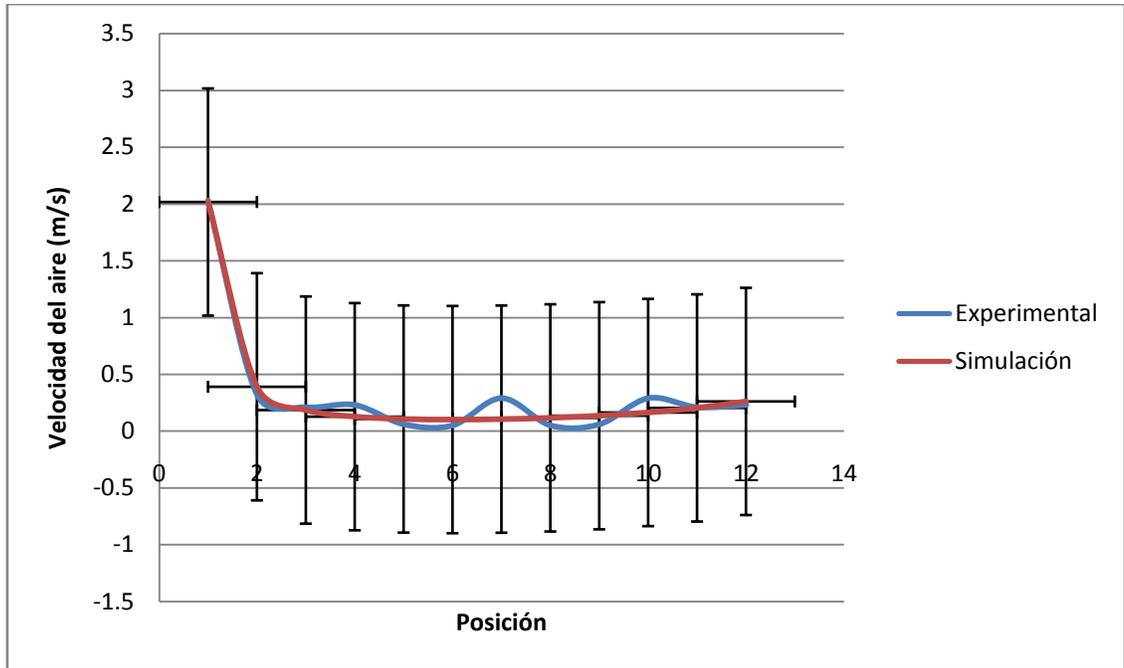


Figura 66. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo vertical

Ecuación de comportamiento:

$$v = 1.2 [1.68^P * P^{-3.12}]$$

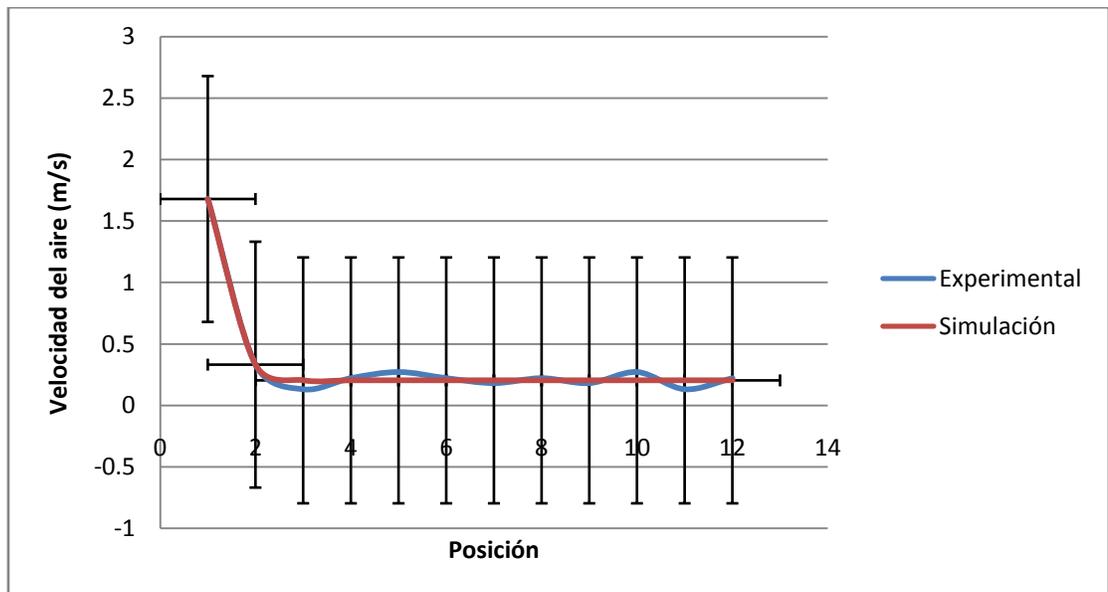


Figura 67. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical

Ecuación de comportamiento:

$$v = \frac{0.204 * 0.00265 + 1.68 * P^{-15.3}}{0.000265 + P^{-15.4}}$$

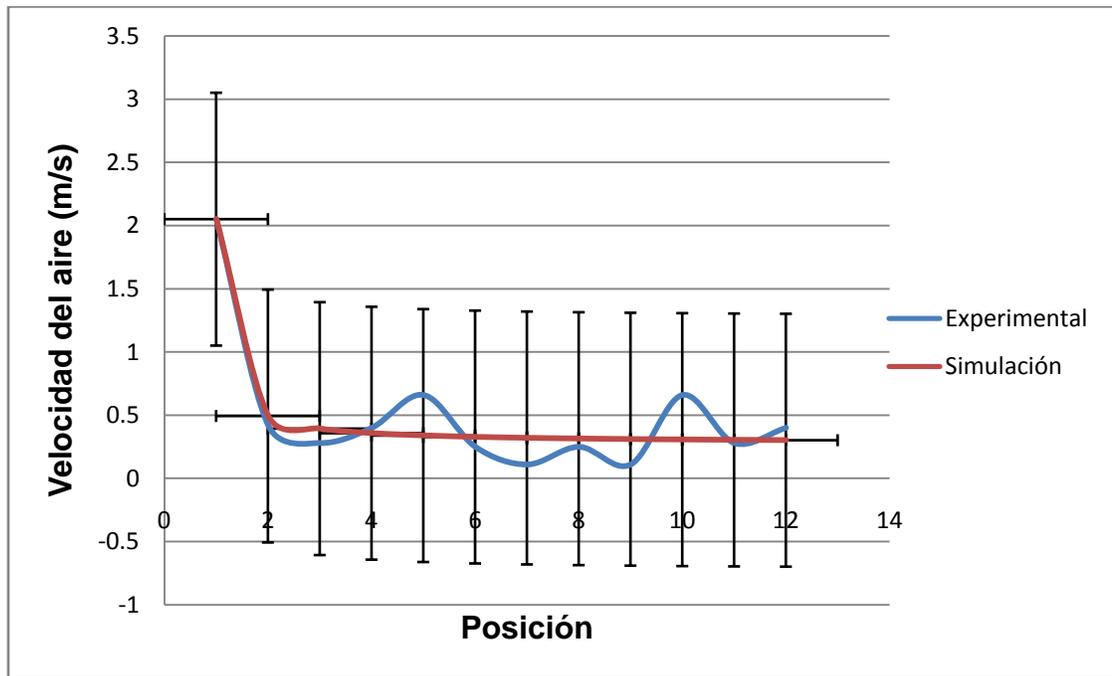


Figura 68. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical

Ecuación de comportamiento:

$$v = \frac{0.281 * P}{-0.863 + P}$$

c) Distribución tipo transversal

En los tres modelos de estibamiento (Figuras 69, 70, 71) las ecuaciones son diferentes, se presentan las curvas experimentales y las simuladas. Estadísticamente tienen una margen de error del cinco por ciento.

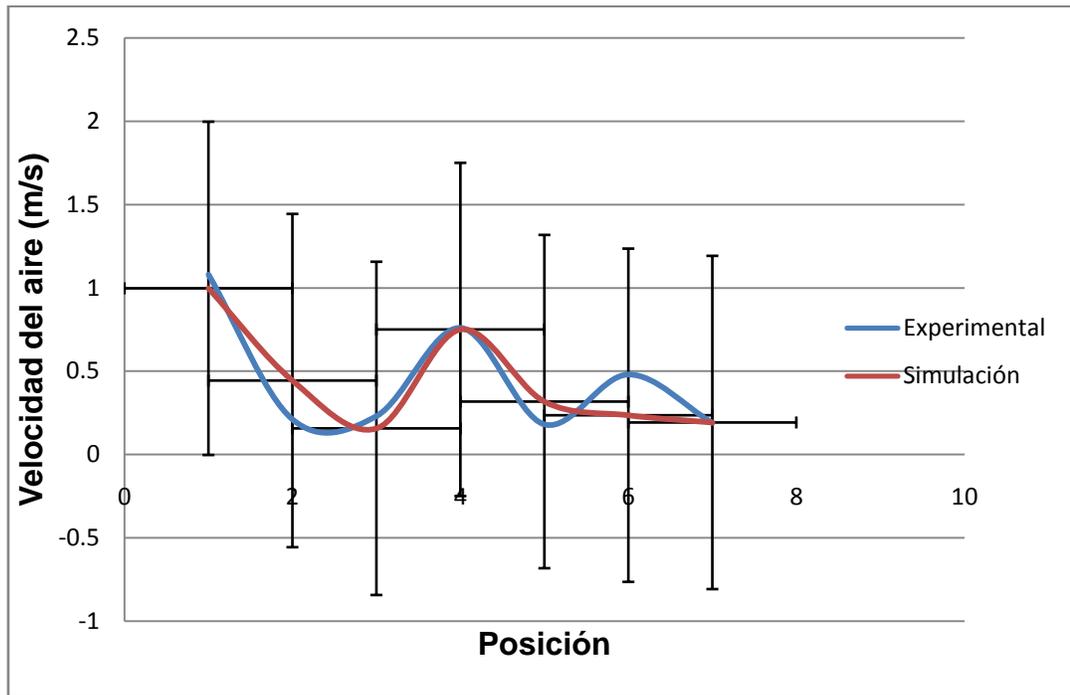


Figura 69. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo transversal

Ecuación de comportamiento:

$$v = \frac{(1.76E + 11) + (-5.63E + 10 * P)}{1 + ((1.68E + 11 * P) + (-4.52E + 10 * P^2))}$$

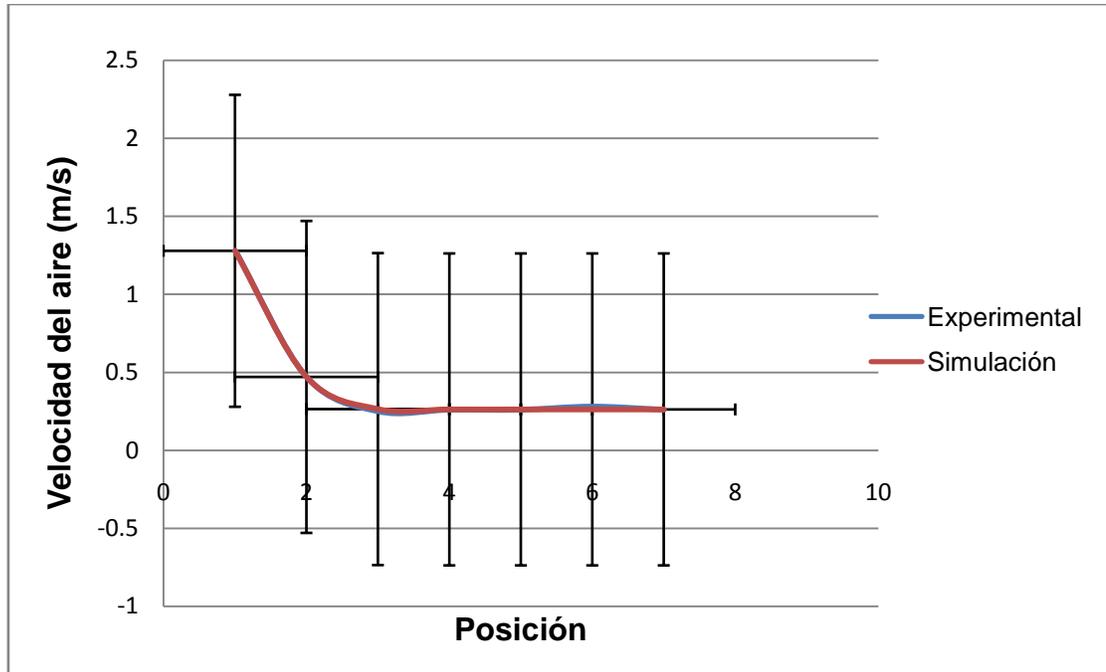


Figura 70. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal

Ecuación de comportamiento:

$$v = \frac{0.262 * 0.00109 + 1.28 * P^{-11.8}}{0.00109 + P^{-11.8}}$$

La simulación tiene un porcentaje de error del cinco por ciento, en todas las ecuaciones aplicadas, cada evento tiene diferentes ecuaciones, excepto los casos de distribución de flujo del aire longitudinal y modelo de estibamiento que sus ecuaciones solo cambian en los valores de algunos factores de la ecuación de distribución de flujo del aire en vertical y modelo de estibamiento con convertidores; también el caso de distribución de flujo del aire en vertical y modelo de estibamiento directo coincide con la ecuación de distribución de flujo del aire transversal y estibamiento directo, por último en el caso de distribución de flujo en forma longitudinal con estiba directa y distribución de flujo del aire longitudinal con modelo de estibamiento convertidores.

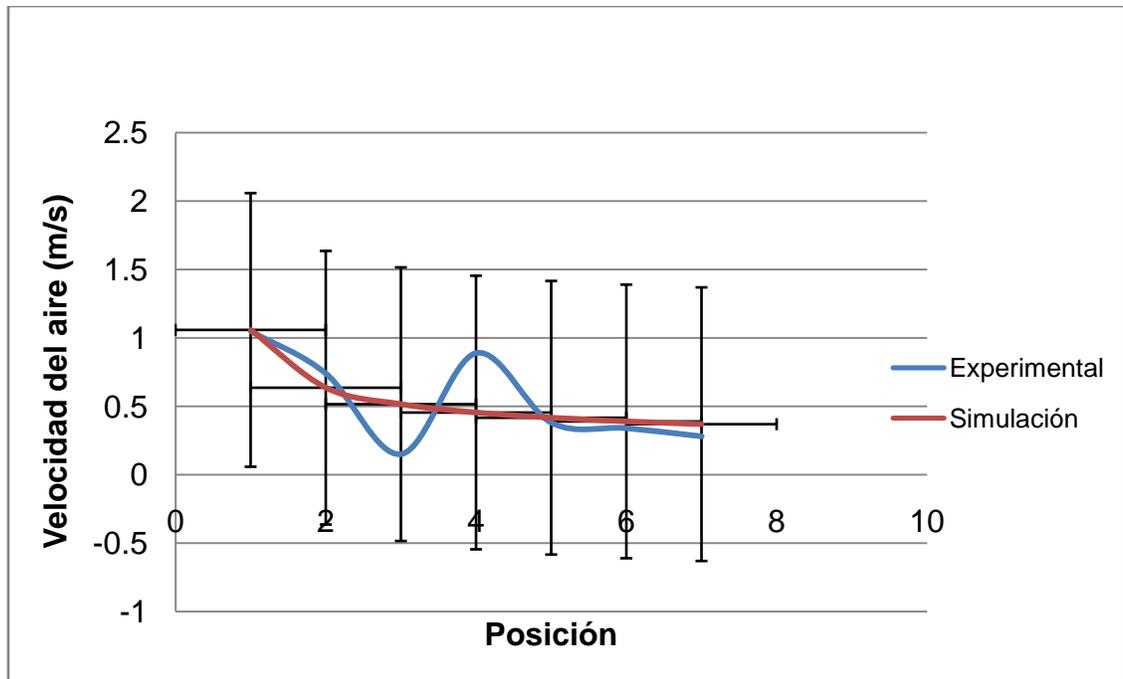


Figura 71. Simulación del perfil de velocidad del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal

Ecuación de comportamiento:

$$v = \frac{1}{0.945 + 0.906 * \ln (P)}$$

Donde:

$v$  = Velocidad del aire

$P$  = Posición

### 3.1.3.3 Perfiles de humedad relativa

#### a) Distribución tipo longitudinal

En las siguientes Figuras 72, 73, 74 se muestran las curvas de simulación y experimentales de la humedad relativa dentro de la cámara de refrigeración, la validación realizada dio como resultado que la simulación tiene un error del 5% equivalente a  $\pm 1\%$  de humedad relativa.

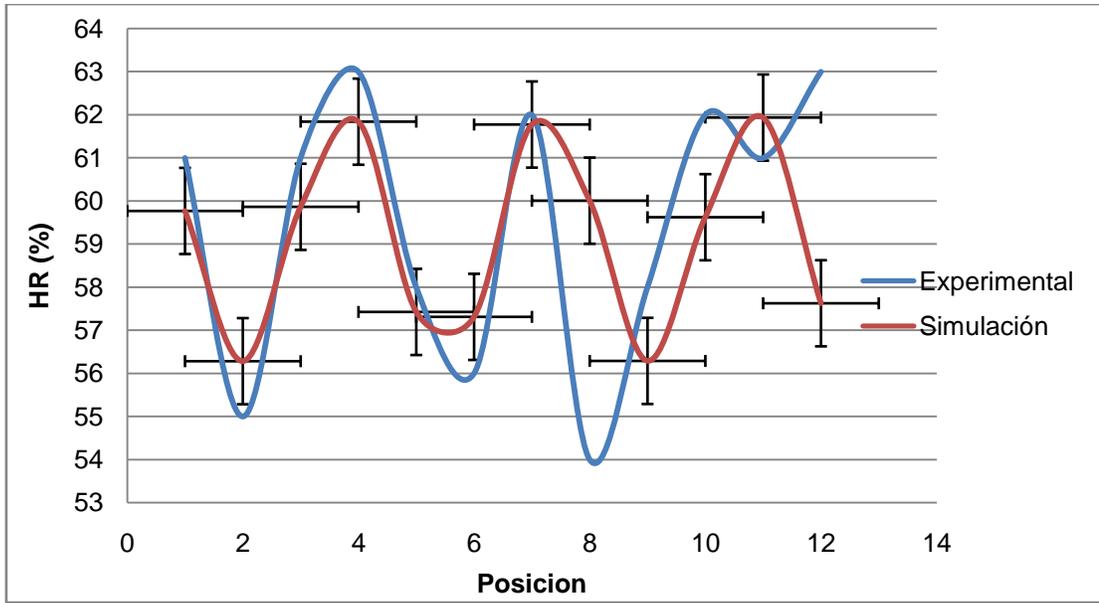


Figura 72. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con rack con distribución longitudinal

Ecuación de comportamiento:

$$HR = 59.2 + 2.92(\cos(4.5 * P + 0.408))$$

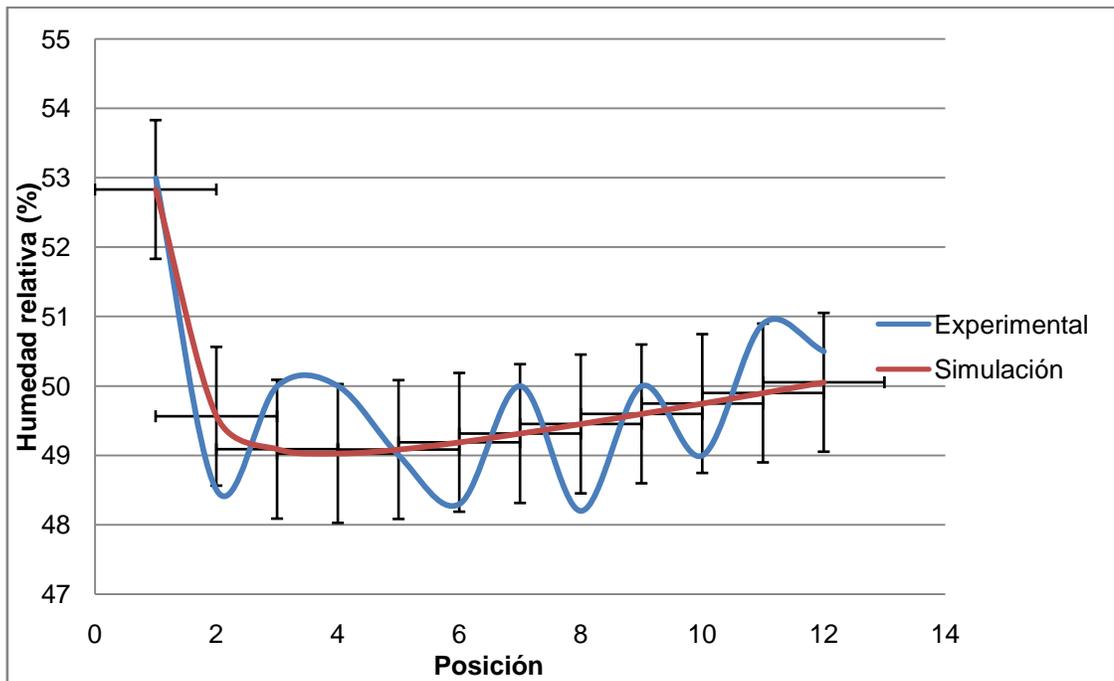


Figura 73. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo longitudinal

Ecuación de comportamiento:

$$H.R. = 48.1 + 0.16 * P + \frac{4.57}{P^2}$$

Las ecuaciones de distribución de flujo de aire y modelo de estibamiento *rack*, coincide cambiando solo el valor de los factores con la ecuación de la distribución de flujo del aire longitudinal con modelo de estibamiento convertidores.

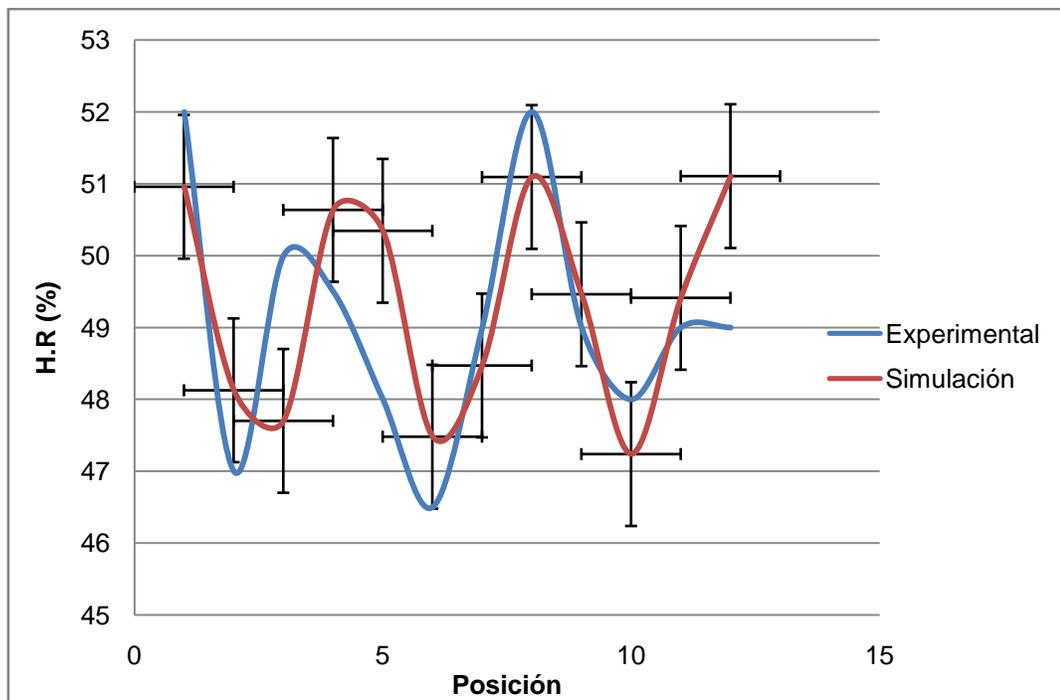


Figura 74. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo longitudinal

Ecuación de comportamiento:

$$H.R. = 49.2 + 1.96(\cos(4.59 * P + 7.52))$$

b) Distribución tipo vertical

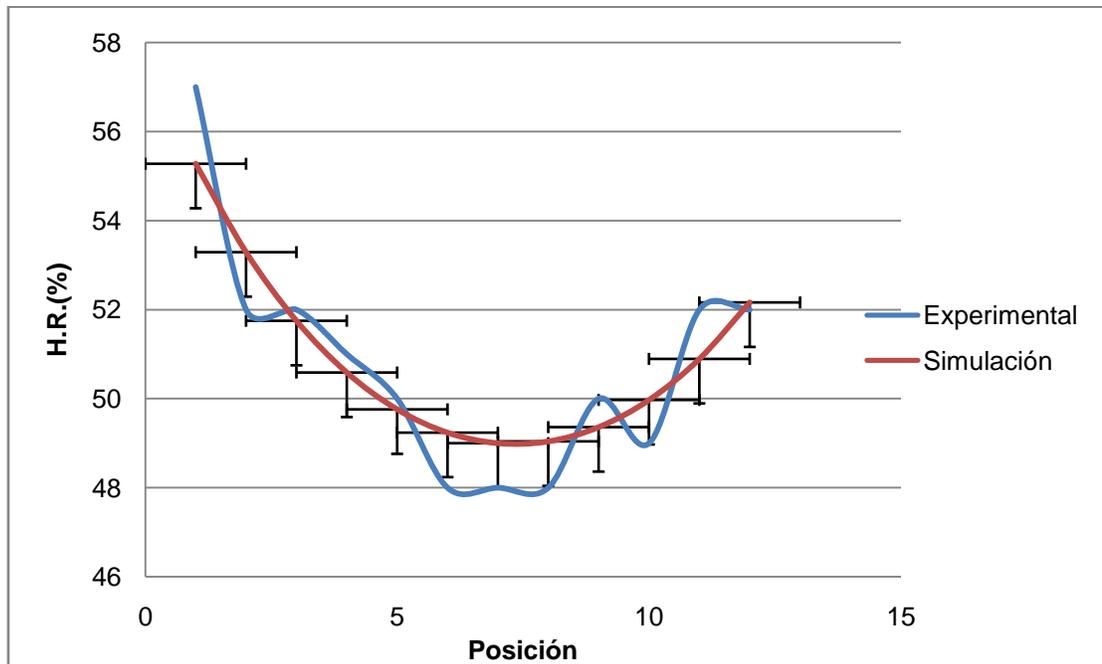


Figura 75. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con *rack* y distribución del flujo vertical

Ecuación de comportamiento:

$$H. R. = \frac{1}{0.0173} + 0.000847 * P + (-0.0000576 * P^2)$$

En las figuras 75, 76, 77 se muestran las curvas experimentales y simuladas de los perfiles de humedad relativa cuando la distribución de flujo del aire es en forma vertical, validadas con el 5% de error. En todos los casos las ecuaciones son diferentes.

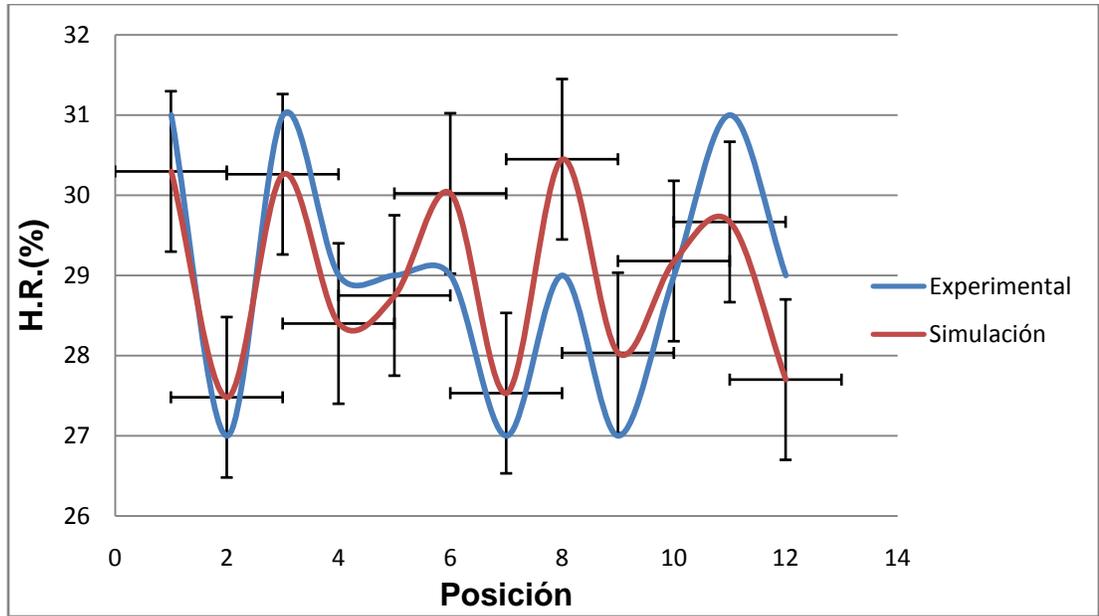


Figura 76. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo vertical

Ecuación de comportamiento:

$$H.R. = 29 + 1.52(\cos(2.57 * P - 2.02))$$

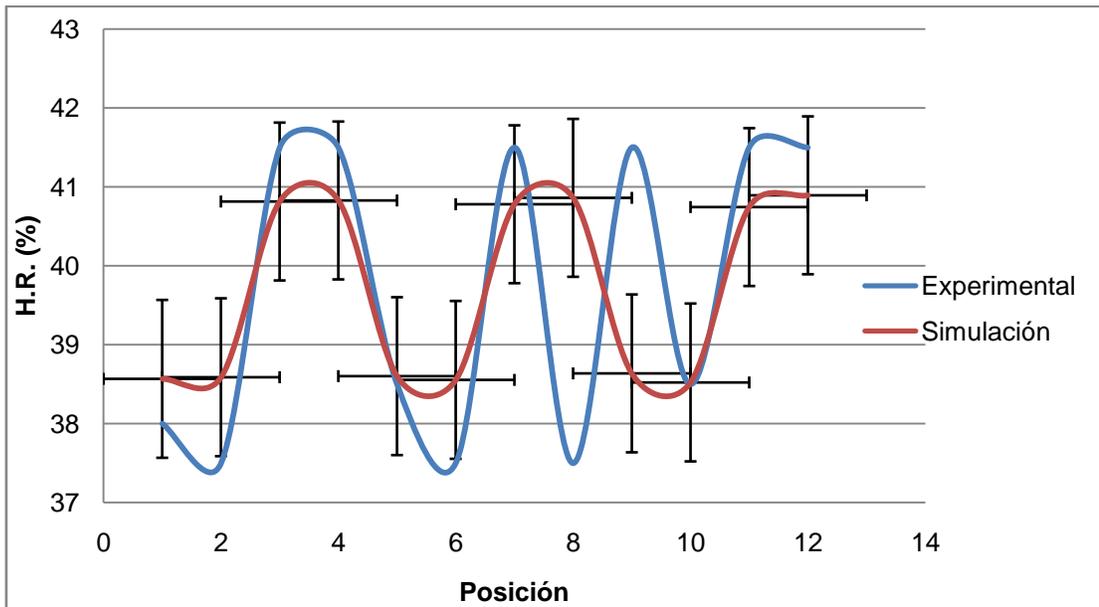


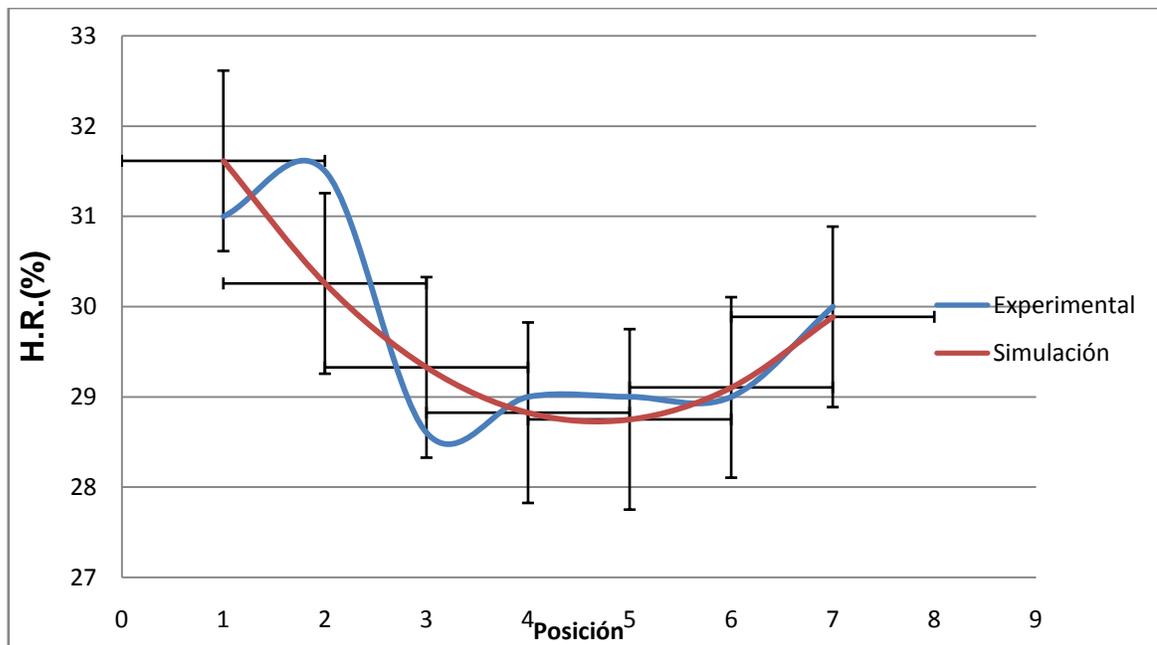
Figura 77. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo vertical

Ecuación de comportamiento:

$$H.R. = 39.7 + 1.58(\cos(4.72 * P - 0.806))$$

c) Distribución tipo transversal

En las Figuras 78, 79, 80 se muestran las curvas experimentales y las simuladas, las cuales al validarlas tienen un error del cinco por ciento. Todas las ecuaciones son diferentes en los tres casos.



**Figura 78. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con rack y distribución del flujo transversal**

Ecuación de comportamiento:

$$H.R. = 33.4 + (-2 * P) + (0.214 * P^2)$$

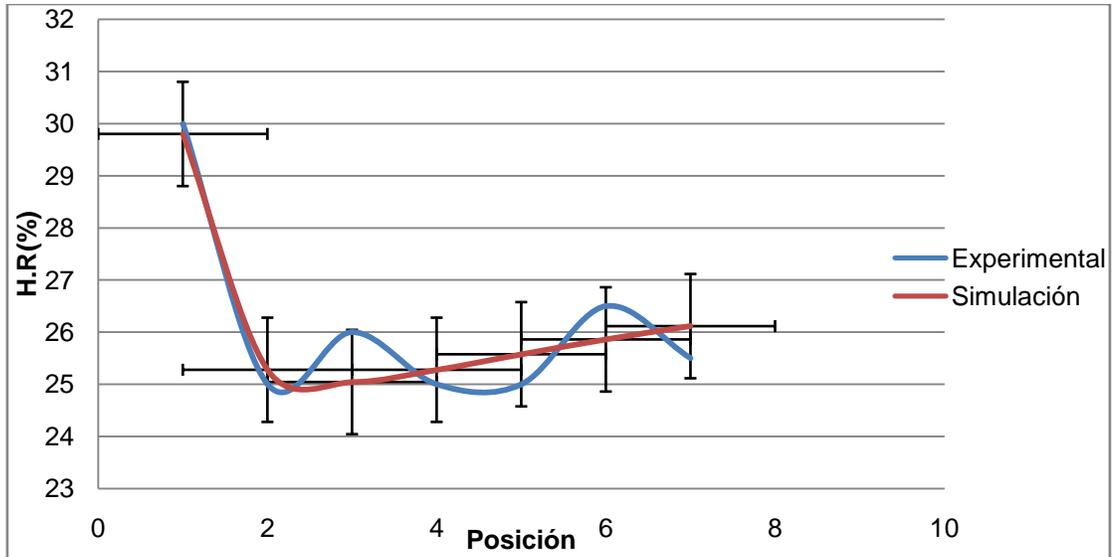


Figura 79. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento directo y distribución del flujo transversal

Ecuación de comportamiento:

$$H. R. = 29.8 * P^{-0.475/P}$$

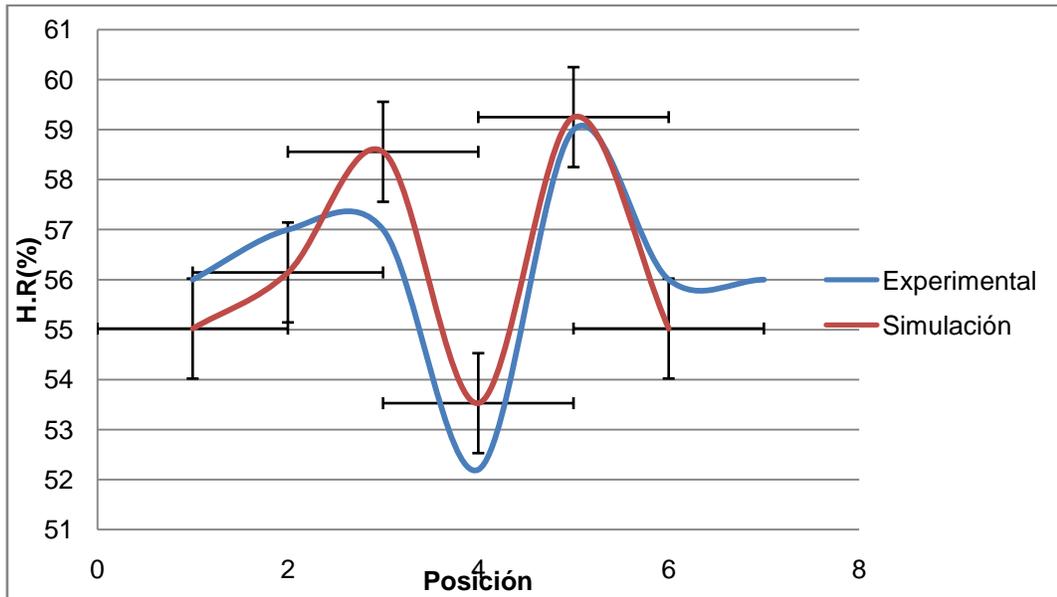


Figura 80. Simulación del perfil de humedad relativa del modelo de estibamiento con convertidor y distribución del flujo transversal

Ecuación de comportamiento:

$$H.R. = 56.5 + 3.03(\cos(3.77 * P + 0.432))$$

En los tres tipos de patrones (temperatura, velocidad, humedad relativa del aire) que se simularon con ecuaciones obtenidas por ajustes de curva las cuales se obtuvieron por medio de un programa de computadora en caso de velocidad y humedad relativa; la ecuación del patrón de temperaturas es del ajuste a las ecuaciones de las series Fourier. La simulación estadísticamente tiene un error del 5 %. Es importante mencionar que se debe utilizar en las mismas condiciones geométricas en las que se realizó esta experimentación.

## CONCLUSIONES

El propósito de la simulación fue determinar la ecuación para definir el modelo matemático con respecto al tiempo y posición, los perfiles de temperatura no se vieron afectados por la distribución del flujo de aire y el modelo de estibamiento porque se rige por el trabajo del compresor, así se obtuvo una sola ecuación que describe el comportamiento de la temperatura dentro de la cámara.

La distribución del aire y el modelo de estibamiento, afectan la diferencia de temperaturas del punto de la salida del aire del evaporador a los demás puntos. La velocidad del aire y la humedad relativa presentan variaciones conforme el aire avanza a lo largo de la cámara y para cada experimento se obtuvo una ecuación diferente.

La combinación de los dos factores (modelo de estiba y distribución de flujo del aire) controlan el diferencial de temperatura, siendo la distribución de flujo del aire en forma longitudinal con el modelo de estibamiento con *rack*, donde existe la menor diferencia de temperaturas en comparación de las demás combinaciones.

En la distribución del aire en forma vertical la menor diferencial de temperaturas es con el modelo de convertidores.

Si se requiere distribuir el flujo del aire en forma transversal, la diferencial de temperaturas menor es con el modelo de estibamiento directo.

Las ecuaciones que se utilizaron para la simulación, son confiables con el 5% de error, para ser aplicadas en eventos, manteniendo la relación de escala geométrica.

La simulación proporciona una buena base para evaluar el acondicionamiento de un almacén frigorífico, sin la necesidad experimentar en instalaciones reales.

## RECOMENDACIONES

Debido a la variación de la humedad relativa (generalmente por debajo de lo recomendado), se recomienda construir la estiba con un material menos higroscópico.

Con el propósito de verificar que no existe estratificación del aire a nivel de piso, sería importante tomar en cuenta el comportamiento de la temperatura y velocidad del aire a ese nivel.

En estudios de modelación, para evitar errores de medición, se requiere de instrumentos de medición de menor tamaño, de alta sensibilidad en la respuesta y de fácil manejo manual.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- Alarcón, J. (1998). *Tratamiento práctico de refrigeración automática* (12ª Ed.). España: Marcombo.
- ASHRAE (Ed.). (2002 a). *Handbook fundamental*. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- ASHRAE (Ed.). (2002 b). *Handbook refrigeration*. USA: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
- Banco Nacional de Comercio Exterior (Ed.). (2010). *Guía de básica del exportador* (12ªEd.). México: Bancomext.
- Bhathia, R. (2005). *Fourier series*. EUA: The Mathematical Association of America.
- Carboneras, C. (2003). *Manutención y almacenaje: Diseño, gestión y control*. México: UPV.
- Carnicer, E. (2001). *Ventilación industrial cálculo y aplicaciones* (4ª Ed.). España: Parafino.
- Clive, D. (1990 a). *Cold and chilled storage*. EUA: Blackie.
- Clive, D. (1990 b). *Cold storage technology*. EUA: Blackie.
- Crown. (2009). *Manual: Catálogo de productos*. México: Crow.
- Dincer, G. (1997). *Heat transfer in food cooling applications* (2ª Ed.). USA: Taylor& Francis.
- Dossat, R. (1998). *Principios de refrigeración*. México: Continental.
- Duran, S. (1983). *Frigoconservación de la fruta*. España: Aedos.
- García, J. (1999). *Aprenda Visual Basic 6.0 como si estuviera en primero*. España: Universidad de Navarra.

- Greene, W. (1992). *Compresores selección, uso y mantenimiento*. México: Mc Graw-Hill.
- Havrella R. (1988). *Fundamentos de calefacción, ventilación y acondicionamiento de aire*. México: Mc Graw-Hill.
- Herrero, A. (1992). *Conservación de frutos: Manual técnico*. España: Mundi-Prensa.
- Instituto Internacional del Frío. (2002). *Guía del transporte frigorífico*. España: Mundi Prensa.
- Malagón, R. (1997). *Elaboración de un programa de computación para el análisis de perfiles de temperatura, velocidad del aire y humedad relativa en sistemas de almacenamiento en frío*. UNAM, tesis Licenciatura en Ingeniería en Alimentos, FES-Cuautitlán, UNAM, México.
- Mc Quiston, F. (2003). *Calefacción, ventilación y aire acondicionado*. México: Limusa.
- Mecalux. (2009). *Manual de paletización dinámica*. México: Mecalux.
- Melagarejo, P. (2000). *Cámaras frigoríficas y túneles de enfriamiento rápido*. España: Mapa-Mundi.
- Miranda, A. (2002). *Métodos numéricos aplicados a la transmisión de calor*. España: CEAC.
- Mitoubikieta T., Moureh J., Flick D. (2006). Airflow patterns in an enclosure loaded with slotted pallets. *International Journal of Refrigeration*. 29:899-910.
- Moureh J., Flick D. (2004). Airflow pattern and temperature distribution in a typical refrigerated truck configuration loaded with pallets. *International Journal of Refrigeration*. 27:464-474.
- Momatt. (2009). *Manual: Motacargas*. México: Momatt.

- Mustafa, T., Ferruh E., Burak T. (2009). Computational modeling of airflow patterns and heat transfer prediction through stacked layers products in a vented box during cooling. *International Journal of Refrigeration*, 32 295-306.
- Plank, R. (2005). *El empleo del frío en la industria de la alimentación* (2ª Ed.). España: Reverté
- Sánchez, T. (2001). *Ingeniería del frío: teoría y práctica*. España: Mundi-Prensa.
- Schafer. (2006). *Manual: Productos y soluciones para almacenes y empresas*. México: Shafer.
- Tijsskens, L. (2004). *Food process modelling* (2ª Ed.). USA: CRC Press.
- Velázquez, J. (1996). *Manejo interno de productos alimenticios en sistemas de almacenamiento en frío*. UNAM, tesis Licenciatura en Ingeniería en Alimentos FES-Cuautitlán, UNAM, México.
- Welti J., Vergara F., Bermúdez D. (2004). Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advences. *Journal of Food Engineering*. 67:113-128.

## APÉNDICE A.

### VALORES DE LAS TEMPERATURAS DEL MEDIO, PERIODO, AMPLITUD UTILIZADAS PARA SIMULACIÓN DE LOS PERFILES DE TEMPERATURA.

*Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en el rack con flujo longitudinal*

Posición	$T$ (°C)	$p$	$A$
1	7.5	21	-2
2	10	17	1.6
3	9.8	17.3	1.8
4	10	17.4	1.2
5	10.4	17	0.8
6	10.4	17.3	1
7	10.3	17.2	1.5
8	10.4	17.1	1.6
9	10.3	17	1.8
10	10.1	17.3	1.8
11	10.2	18.5	1
12	9.8	17	1.5

*Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en directo con flujo longitudinal*

Posición	$T$ (°C)	$p$	$A$
1	7.5	21.5	-3
2	10.8	17	1.58
3	10.8	17.2	1.5
4	10.6	17.3	1.5
5	10.8	17.6	1.6
6	10.8	17.3	1.3
7	10.7	17.1	1.3
8	10.5	22	-2
9	10.5	21.5	-2
10	10.5	21.5	-2
11	10.7	18	1.8
12	10.2	17.3	1.5

*Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en convertidor con flujo longitudinal*

<b>Posición</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p</b>	<b>A</b>
1	7	14.5	-2.7
2	10.86	15	-2
3	10.86	15	-2
4	10.86	15	-2
5	10.86	15	-2
6	10.5	15	-1.5
7	10.3	15	-1.5
8	10	15	-1.8
9	10	15	-2
10	9.8	15	-2
11	10.9	16	-1
12	9.5	16	-1.5

*Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en rack con flujo vertical*

<b>Posición</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p</b>	<b>A</b>
1	6.5	13.5	-3.5
2	9.8	11	2.3
3	10.2	10.8	2
4	10.2	10	2
5	10.5	11.3	1.8
6	10.5	11.5	1.8
7	10.5	11.5	1.8
8	10.8	11.3	1
9	10.8	11.5	1.8
10	11	12	1.2
11	10.2	11	1
12	10	14	-2

*Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en directo con flujo vertical*

<b>Posición</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p</b>	<b>A</b>
1	8	11	-2
2	10.2	12	-2
3	10.2	12	-2
4	10.2	11.8	-2
5	10.2	12	-2
6	10.2	12	-2
7	10.3	11.9	-1.9
8	10.3	11.6	1
9	10.8	11.5	-1.8
10	10.2	11.7	-2
11	10.2	12	-2
12	10	12	-2

*Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en convertidor con flujo vertical*

<b>Posición</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p</b>	<b>A</b>
1	8.2	14	-2
2	10.5	14	-1.5
3	10.5	14	-1.5
4	10.5	14	-2
5	10	14	-2
6	10.3	14	-2
7	10	14	-2
8	10.5	14	-2
9	10.3	14	-1.5
10	10.5	14	-1.5
11	11	15	-1
12	10	14	-1.6

*Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en rack con flujo transversal*

<b>Posición</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p</b>	<b>A</b>
1	7.8	9.5	-2.2
2	10.5	10	-1
3	10.5	10	-1.57
4	10.4	9.75	-1.95
5	10.5	9.7	-1.9
6	10.3	9.7	-1.9
7	10.8	10	-1.5

Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en directo con flujo transversal

<b>Posición</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p</b>	<b>A</b>
1	7	8.5	-3.5
2	10.8	9	-3
3	10.8	8.5	-3
4	10.8	8.5	-3
5	11.5	8.4	-2.8
6	11	8.5	-2
7	10.8	9	-2.5

Valores de temperatura del medio, periodo, amplitud en convertidor con flujo transversal

<b>Posición</b>	<b>T (°C)</b>	<b>p</b>	<b>A</b>
1	7.5	12	-3
2	10.86	12.7	-2
3	10.86	12.6	-2
4	10.86	12.3	-2
5	10.86	12.3	-2
6	10.86	12.4	-2
7	10.86	12.7	-2

## APÉNDICE B.

### SECUENCIA PARA CREAR EL PROGRAMA DE SIMULACIÓN DE LOS PATRONES DEL FLUJO DE AIRE.

Abrir un formulario el cual se llama *form 1* , en el *grid* insertar dos tablas usando el control de MSFlexGrid. Además de dos *label*, dos *textbox*, tres *commandbutton*. En el código siguiente se muestra como debe ser escrito y se obtengan todas las características necesarias.

En el *command 1* se usara "continuar", el programa cuando éste pregunte la temperatura de la cámara, *label 1* preguntara el tiempo total en que trabajará la cámara y el intervalo de tiempo en que se requieren los datos preguntara *label 2*

```
Private Sub Command1_Click()  
Temperatura(0) = Val(Text1.Text)  
Label1.Caption = "Tiempo"  
Label2.Visible = True  
Label2.Caption = "Intervalo"  
Text1.Text = ""  
Text2.Visible = True  
Text2.Text = ""  
Command2.Visible = True  
Command2.Caption = "Siguiete"  
Command1.Visible = False  
i = 1  
j = 0  
End Sub
```

El *command 2*, es el paso para los cálculos , de terminará el número de datos.

```
Private Sub Command2_Click()  
Tiempo(j) = Val(Text1.Text)  
Intervalo(j) = Val(Text2.Text)  
datos = Tiempo(j) / Intervalo(j)
```

Para la tabla uno, se escribió el código de manera que presentara en cada columna la temperatura de cada posición y en la segunda columna el tiempo.

```
MF1.Rows = datos + 1
MF1.Col = 1
MF1.Row = i
MF1.Text = 0
MF1.Col = 2
MF1.Text = Temperatura(j)
Text1.Text = ""
Text2.Text = ""
Label1.Visible = False
Label2.Visible = False
Text1.Visible = False
Text2.Visible = False
Command2.Visible = False
Command3.Visible = True
For k = 2 To 13
MF1.Row = 1
MF1.Col = k
El nombre de cada posición se escribió de la siguiente manera para cada una.
MF1.Text = Temperatura(0)
termo1(0) = Temperatura(0)
termo2(0) = Temperatura(0)
Next k
i = i + 1
j = j + 1
End Sub
```

El *command 3*, es en donde se hacen todos los cálculos, se escribió de la siguiente manera para cada posición, se introdujeron las ecuaciones que describen el comportamiento de la temperatura, humedad relativa y velocidad del aire dentro del almacén piloto. En el programa se escribieron en el código todas las ecuaciones para cada uno de los modelos y distribución de flujo de aire, aquí se da un ejemplo de un solo caso.



```

HR1(i) = (59.2) + (2.92 * Cos(4.5 * i + 0.408)) 'calculo de HR rack longitudinal
MF2.Row = i
MF2.Text = HR1(i)
Next i
Next j
minHR1 = HR1(1)
maxHR1 = HR1(1)
For i = 1 To 12
  If minHR1 >= HR1(i) Then
    minHR1 = HR1(i)
  End If
  If maxHR1 <= HR1(i) Then
    maxHR1 = HR1(i)
  End If
Next i

```

Para que el programa muestre todos los perfiles se escribe lo siguiente:

```

Load Form2
Form2.Show

```

Así para cada form que se dibuje.

La presentación de cada perfil de temperatura, velocidad y humedad relativa, se realiza abriendo tres *form* para cada modelo con su distribución de aire.

El primer *form* es para la temperatura, se insertan tres *label* donde aparecerán el nombre de Perfil de temperaturas, del modelo y distribución de aire correspondiente; en el eje Y, temperatura y el eje X el tiempo. Se escribe en el código lo siguiente, para que aparezca la gráfica como se desea:

```

Private Sub Form_Load()
Form2.ScaleWidth = 8
Form2.ScaleHeight = 8
Line (1.5, 1)-(1.5, 6.9), vbMagenta
Line (1.5, 6.9)-(7.4, 6.9), vbGreen

```

```
dy = 5.9
Label3.Top = 7.6
Label2.Left = 0.5
Label2.Top = 1
Label3.Left = 5.5
Label1.Top = 0
Label1.Left = 5.5
For i = 0 To (datos - 1) / 10
    Line (1.4, 1 + (dy / ((datos - 1) / 10)) * i)-(1.6, 1 + (dy / ((datos - 1) / 10)) * i), vbBlue
Next i
For i = 1 To datos - 1
    Circle (1.5 + (dy / (datos - 1)) * i, 5 - dy2 * (termo1 (i) - min)), 0.03, vbRed
```