

LS
28°



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLAN

CONDICIONES DE OPERACION EN LA
PASTEURIZACION HTST DE HUEVO
ENTERO LIQUIDO.

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO EN ALIMENTOS

P R E S E N T A :

LEON MUNGUA, JUAN

ASESOR DE TESIS:

I.B.Q. J. JAIME FLORES MINUTTI



CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX., 1993.

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



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 está 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.

INDÍCE TEMÁTICO

I. RESUMEN.	1
II. INTRODUCCION.	3
III. GENERALIDADES.	5
3.1. Huevo.	6
3.1.1. Produccion de huevo.	6
3.1.2. Contaminacion del huevo.	7
3.1.3. Salmonela y salmonelosis.	7
3.1.4. Bioquímica del huevo.	9
3.1.5. Industrialización del huevo.	12
3.1.6. Pasteurización del huevo.	13
3.2. Transferencia de calor.	17
3.2.1. Mecanismos de transferencia de calor.	19
3.2.2. Transferencia de calor por convección.	21
3.2.3. Numeros adimensionales para los cálculos de convección.	23
3.2.4. Correlaciones empíricas de convección forzada en placas.	24
3.2.5. Intercambiadores de calor.	25
3.2.6. Diferencia media logarítmica de temperatura.	29
3.2.7. Transferencia de calor en fluidos no newtonianos.	31
3.2.8. Tiempos medios de residencia.	32
IV. OBJETIVOS.	37
V. DESARROLLO METODOLÓGICO.	39
5.1. Preparación de la muestra.	40
5.2. Diseño experimental.	41
5.2.1. Efecto del pH y la dilución con agua en la termoestabilidad del huevo entero líquido.	41
5.2.2. Transferencia de calor a través de un intercambiador de placas en un fluido no newtoniano.	43
VI. ANALISIS Y DISCUSION DE RESULTADOS.	46
6.1. Efecto del pH y la dilución con agua en la termoestabilidad del huevo entero líquido.	47
6.2. Transferencia de calor a través de un intercambiador de placas en un fluido no newtoniano.	51
VII. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	63
VIII. BIBLIOGRAFIA.	67
ANEXO 1. DETERMINACION EXPERIMENTAL DE LAS PROPIEDADES FISICAS DEL HUEVO ENTERO LIQUIDO.	75
ANEXO 2. CARACTERISTICAS DEL PASTEURIZADOR ALFA-LAVAL P-20.	83
ANEXO 3. DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION Y TIEMPOS MEDIOS DE RESIDENCIA.	86

INDICE DE FIGURAS

3.1.	Curva de destrucción térmica de salmonela.	8
3.2.	Las partes del huevo.	9
3.3.	Temperatura de pasteurización recomendada para huevo entero a varios niveles de pH.	12
3.4.	Reacciones de estabilización de huevo.	16
3.5.	Convección forzada sobre una superficie plana.	22
3.6.	Perfil de temperatura en un intercambiador de calor.	26
3.7.	Intercambiador de placas.	27
3.8.	Funcionamiento de un intercambiador.	28
3.9.	Determinación de LMTD.	30
3.10.	Factores de corrección (F) para LMTD en un intercambiador de placas.	31
3.11.	Curva E de distribución de tiempo de residencia o RTD.	34
3.12.	Señal de respuesta en una curva F.	35
3.13.	Señal de respuesta en una curva C.	36
5.1.	Obtención de huevo entero líquido estabilizado.	40
5.2.	Combinaciones del tratamiento experimental del efecto del pH y la dilución con agua en la termoestabilidad del huevo entero líquido.	43
5.3.	Combinaciones del tratamiento experimental de la transferencia de calor a través de un intercambiador de placas en un fluido no newtoniano.	45
6.1.	Secuencia de cálculo para la obtención de coeficientes de transferencia de calor y ecuación empírica que describe su proceso.	52
A.2.	Diagrama del arreglo de flujo en el intercambiador.	85

INDICE DE TABLAS

3.1.	Composición de huevo fresco (por 100 g).	10
3.2.	Productos a base de huevo.	14
3.3.	Requerimientos USDA para pasteurización de productos de huevo.	17
6.1.	Tiempos de coagulación de huevo entero líquido (en segundos) tratado a diferentes temperaturas, pH y dilución.	47
6.2.	ANDEVA de t a diferentes temperaturas, pH y dilución.	48
6.3.	Temperaturas y flujos volumétricos a un flujo de alimentación de 47.5 ml/s.	53
6.4.	Temperaturas y flujos volumétricos a un flujo de alimentación de 42.5 ml/s.	53

6.5.	Temperaturas y flujos volumetricos a un flujo de alimentación de 37.5 ml/s.	53
6.6.	Coefficientes globales de transferencia de calor ($\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}$) a diferentes flujos volumetricos de alimentación (A) y de agua de calentamiento (B) en varias etapas (C).	57
6.7.	ANDEVA de U a diferentes flujos volumetricos de alimentación (A) y de agua de calentamiento (B) en varias etapas (C).	58
6.8.	Coefficientes de película de huevo entero líquido ($\text{cal}/\text{cm}^2 \text{ s } ^\circ\text{C}$) a diferentes flujos volumetricos de alimentación (A) y de agua de calentamiento (B) en varias etapas (C).	60
6.9.	Números adimensionales a diferentes flujos volumetricos de alimentación (A) y temperaturas medias (B).	61

INDICE DE GRAFICAS

6.1.	Tiempos de destrucción térmica de huevo entero líquido sin diluir, a diferentes valores de pH.	49
6.2.	Tiempos de destrucción térmica de huevo entero líquido diluido con 20% de agua, a diferentes valores de pH.	50
6.3.	Comportamiento tipo del coeficiente global de transferencia de calor (U) a diferentes flujos de alimentación.	60-a
6.4.	Comportamiento tipo del coeficiente global de transferencia de calor (U) a diferentes temperaturas.	60-b
6.5.	Coefficiente de película de huevo entero líquido a diferentes temperaturas.	60-c
7.1.	Condiciones de operación en la pasteurización de huevo entero líquido en un intercambiador alfa-laval P-20.	65
A.1.	Valores de k' a diferentes temperaturas.	82
A.3.	Tiempos medios de residencia de huevo entero líquido en la etapa de mantenimiento de un intercambiador alfa-laval P-20, a diferentes flujos de alimentación.	92

I. RESUMEN.

El objetivo de este trabajo es establecer las condiciones de flujo de alimentación y temperatura de proceso en un intercambiador de placas Alfa-laval P-20, durante la pasteurización de huevo entero líquido; así como el acondicionamiento del mismo, que evite la coagulación de la ovoalbúmina. Además se hace el análisis de la transferencia de calor que se verifica en esta operación en un fluido que se comporta de acuerdo a la ley de la potencia dentro del intervalo de temperaturas de tratamiento, a través de la obtención de la ecuación empírica que describe este fenómeno.

En el desarrollo experimental se encontró que tanto la dilución, como el aumento del pH aumentan la termoestabilidad del huevo entero líquido, siendo este último el que causa un efecto con mayor influencia. El tiempo medio de residencia (en segundos) se logró evaluar mediante la ecuación de la recta, $t = 1.03047v - 2.0024$ (siendo v = flujo volumétrico, en ml/s); la distribución de los tiempos de residencia no variaron significativamente con respecto al flujo de alimentación, siendo su valor medio de 1.9937 s^2 . La ecuación que describe el proceso de transferencia de calor en el huevo entero líquido a través de un intercambiador de calor de placas Alfa-laval mod P-20 es $Nu = 52.36 Re_{gen}^{0.1978} Pr^{-0.7622}$.

II. INTRODUCCION.

Este trabajo pretende mejorar el aprovechamiento y comercialización de los recursos que produce el Centro de Producción Agropecuaria, de la Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, específicamente el huevo.

Cuando las gallinas ponedoras entran en su etapa de mayor producción y durante las épocas de calor (*pelecha*), el cascarón de sus huevos presenta una gran fragilidad y llega a romperse, ocasionando que se contamine; este producto ya no puede ser comercializado, debido a su alto contenido microbiano y es desechado.

En el año de 1987, alumnos del Laboratorio Experimental Multidisciplinario IV, de la carrera de Ingeniero en Alimentos; pretendieron darle utilidad a este huevo de desecho, secándolo por aspersion, pero debido a las temperaturas que se emplean en el proceso y pese al bajo contenido de humedad, se obtenía un huevo en polvo con alto contenido bacteriano. En el año de 1988, alumnos del mismo laboratorio, proponen el estudio del comportamiento térmico de un fluido no newtoniano en un intercambiador de calor de placas (pasteurizador). Todo esto, además de que el huevo es un fluido no newtoniano, da origen a este trabajo que propone aprovechar este huevo de desecho, mediante su pasteurización, ya sea para su comercialización como huevo entero líquido pasteurizado o como un paso intermedio en el proceso de secado del mismo.

III. GENERALIDADES.

3.1. Huevo.

El huevo es importante como alimento y como ingrediente de alimentos. Es uno de los alimentos más nutritivos que consumimos y puede prepararse en muchas formas por sí mismo. Es también uno de los principales ingredientes en los platillos y es parte esencial de muchos productos horneados, dulces y otros alimentos. El huevo se aplica en muchas formas para dar lugar a productos alimenticios en que se utiliza por ciertas características. Esponja, aglutina, espesa, emulsifica, ablanda, retiene la humedad, agrega sabor y color y mejora el valor nutritivo (67 y 72).

3.1.1. Producción de huevo.

En México, la industria del huevo se dedica en exclusiva a la producción de huevo fresco de gallina. Esto se debe al alto rendimiento, la gran adaptabilidad de las gallinas a casi cualquier clima y la gran demanda que existe de este producto, para el año de 1990 fue estimado en 61.1 Kg por persona anuales. Aún cuando existe una producción de 53'800,000 toneladas anuales, el desperdicio generado es muy grande y llega a ser de hasta un 12%, en ocasiones por no tener un sistema de comercialización adecuado para el producto fresco y en otras debido a las condiciones mismas de la producción de huevo (80 y 80).

Las gallinas ponedoras, como todas las aves, sufren un fenómeno natural, la *relecha*; durante la cual ponen huevos muy frágiles, debido a un bajo contenido de calcio, ocasionado por la muda o caída de las plumas que las preparan para volver a empezar otro ciclo de postura; esto ocurre principalmente durante las épocas de mayor calor, como a finales del verano y principios del otoño. En la mayoría de las veces estos productos son tirados a la basura, ya que su comercialización como producto fresco es delicada y peligrosa, porque sufre una contaminación por *Salmonella* contenida en las heces fecales de la gallina (80 y 106).

3.1.2. Contaminación del huevo.

Fue en 1939, durante la segunda guerra mundial, que se descubrió por vez primera la contaminación de *Salmonella* en huevos enteros en polvo (46).

Las aves representan el principal reservorio de *Salmonella*. Se ha podido comprobar que la intensidad de infección por *Salmonella* en gallinas depende del grado de contaminación de los piensos y de los factores ambientales. Las cáscaras de huevo pueden contaminarse al mantener contacto con las heces en la cloaca, ponadero o batería; los huevos quebrados, especialmente con derrame de contenido, son muy peligrosos y pueden contener *Salmonella*. En huevos enteros, en ocasiones los gérmenes logran penetrar el cascarón bajo determinadas condiciones de humedad y temperatura, de aquí que la contaminación por manipulación en huevos procesados cobre una alta importancia (73, 84 y 85).

3.1.3. Salmonela y salmonelosis.

Existen más de 1,300 tipos específicos de *Salmonella* y 50 de ellos existen comunmente; las *Salmonellas* son bacterias aerobias, no esporuladas, siendo las más comunes en el huevo los serotipos *pollorum*, *gallinarum* y *paratyphi B*, los cuales ocasionan salmonelosis y tifoidea (46).

La salmonelosis es una infección que afecta el tracto gastrointestinal y es más grave en niños y ancianos, aunque puede producir casos graves, a veces llega a la muerte, en individuos de todas las edades. Los síntomas suelen aparecer de 12 a 24 horas después de consumir el alimento contaminado e incluyen náuseas, vómitos, diarreas, a veces tan intensa que ocasiona una gran deshidratación, cólicos abdominales, escalofríos, debilidad y fiebre muy elevada. El período de incubación de esta enfermedad es, por lo regular, de 6 a 18 horas. Y su evolución puede variar desde algunos días hasta varias semanas (62, 83 y 105).

La *Salmonella* no es el único microorganismo que se encuentra presente en el huevo, este también puede contener coliformes,

proteus, pseudomonas, cocos grampositivos, levaduras, mohos, algunos estreptococos y micrococcos; sin embargo, se hace referencia únicamente a la salmonela debido a que es el microorganismo, de los presentes en el huevo, con más alta resistencia térmica; es decir, si se garantiza la destrucción de salmonela, se está garantizando la destrucción del resto de los microorganismos ^(41 y 46).

Se sabe que la salmonela es destruida con tratamiento térmico, pero existe el riesgo de provocar la coagulación de la albúmina si no se controlan las condiciones de calentamiento. El procesamiento del huevo por sí mismo, como el secado, destruye el 90% de salmonela; sin embargo, es necesario asegurar su destrucción con una pasteurización antes del secado, para poder comercializarlo como huevo líquido entero pasteurizado libre de *Salmonella* o como un intermedio en la obtención de huevo en polvo libre de salmonela ^(48 y 66).

El valor *z* de la curva de destrucción térmica para la salmonela es de 4.0 a 5.0°C. A 56°C se requieren 40 minutos de tratamiento y sólo 2.5 minutos a 64.4°C (Fig. 3.1.).

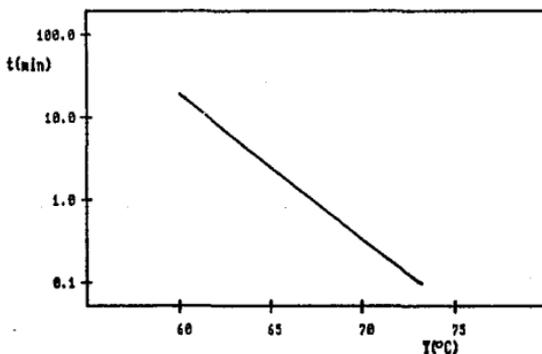


FIG. 3.1 CURVA DE DESTRUCCION TERMICA DE SALMONELA
(Stumbo, 1978. Thermobacteriology in food processing).

3.1.4. Bioquímica del huevo.

El huevo y sus partes componentes son materiales muy especiales (Fig. 3.2.). La tabla 3.1. proporciona la composición de las partes básicas y la mezcla de ellas: clara, yema y huevo entero. El huevo entero es en realidad la mezcla de la clara y la yema en proporciones naturales. hay 60 partes en peso de clara líquida por cada 40 partes en peso de yema líquida ⁽⁶⁷⁾.

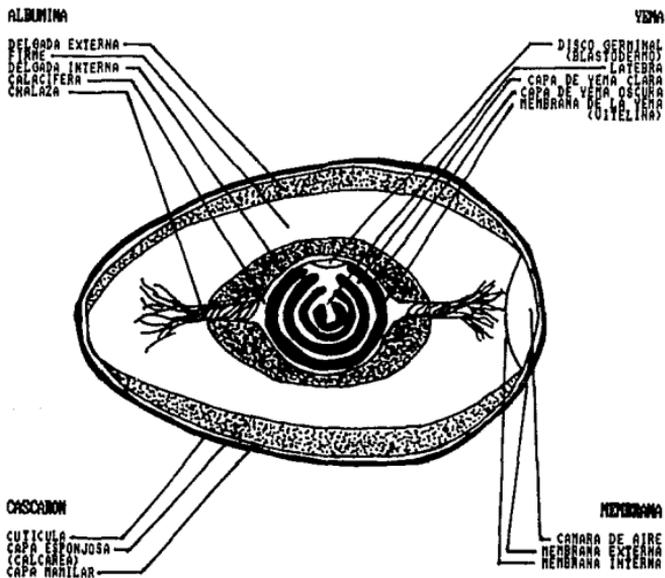


FIG. 3.2. LAS PARTES DEL HUEVO

(Stadelman, 1973, Egg Science and technology).

El huevo es un excelente aportador de proteínas de alta calidad. De hecho, es usado como estándar para medir la calidad proteica de

otros alimentos. La relación de eficiencia proteica es de 3.2, comparada con el maíz entero de 1.4 y de la leche deshidratada de 2.7 (14).

TABLA 3.1. COMPOSICION DE HUEVO FRESCO (POR 100 g).

	Entero (100 g)	Clara (64 g)	Yema (36 g)
Proteínas	12.8	10.6	16.6
Carbohidratos	1.0	0.9	1.0
Lípidos	11.8	-	32.6
Saturados	4.2	-	11.7
Monosaturados	5.4	-	15.1
Polinsaturados	1.7	-	4.5
Colesterol	0.5	-	1.3
Minerales	0.8	0.6	1.1
Calcio (mg)	58.5	0.6	132.4
Cloro (mg)	130.3	17.3	112.1
Cobre (mg)	22.0	2.0	13.0
Iodo (mg)	72.0	0.0	167.0
Hierro (mg)	2.0	0.1	0.3
Magnesio (mg)	12.4	12.4	12.4
Manganeso (mg)	21.0	1.0	1.1
Fósforo (mg)	237.9	14.0	180.0
Potasio (mg)	130.0	147.0	130.0
Sodio (mg)	130.0	130.0	130.0
Sulfuro (mg)	10.0	0.4	10.0
Zinc (mg)	1.3	0.1	3.7
Agua	73.6	87.8	48.6
Sólidos	26.4	11.2	53.0
Calorías/100 g	183.0	56.2	401.7
Vitaminas			
B-12 (µg)	1.2	0.1	3.2
Biotina (µg)	0.2	0.1	0.2
Ca. folico (µg)	20.0	1.0	40.0
Inositol (µg)	20.0	1.0	20.0
Niacina (µg)	89.0	95.0	89.0
Pa. panto. (µg)	1.2	0.1	1.2
Riboflavina (µg)	3.7	0.1	4.3
Tioflavina (µg)	89.0	25.0	89.0
Tiamina (µg)	0.0	3.0	25.0

(Cotterill et al, 1977. A nutrient re-evaluation of shell eggs. FAO, 1976. Contenido en aminoácidos de los alimentos y datos biológicos sobre las proteínas. Karmas et al, 1987. Nutritional evaluation of food processing)

Los lípidos se concentran en la yema. El huevo tiene un alto contenido de ácidos grasos insaturados, 62 % son ácidos grasos insaturados con 15 % de poliinsaturados. El ácido linolénico forma el 87 % de los ácidos poliinsaturados. La relación de insaturados y saturados es de 2:1. Esto ha suscitado una controversia, ya que por años se ha considerado al huevo un aportador importante de colesterol en la dieta⁽⁵³⁾.

El huevo contiene todas las vitaminas necesarias en la dieta, a excepción de la vitamina C.

Las proteínas del huevo están formadas en su mayoría por ovoalbúmina (54%), conalbúmina (13%), ovomucoide (11%), lisozima (3.5%), ovomucina (1%) y otras. El punto isoelectrico de la principal proteína, la ovoalbúmina es de 4.6. La conalbúmina es muy termolábil e insolubiliza a temperaturas de 58°C, cuando el pH se encuentra entre 6 y 7. En su conjunto el huevo presenta un pH aproximado a 7 al cual todas sus proteínas son muy termoestables; además presenta una actividad de agua de 0.97 en estado natural. La pasteurización de la clara a 53°C incrementa el tiempo de batido, destruye la salmonela y no modifica de manera significativa el volumen del pan. Al pasteurizar el huevo entero entre 60 y 63°C, no hay cambios importantes en sus propiedades físicas y funcionales. Para garantizar la termoestabilidad del huevo es posible adicionar hexametáfosfato de sodio y alterar el pH del huevo hasta 9 (Fig. 3.3.). El punto de congelación del huevo con cáscara es de - 2.2°C; de la yema, - 0.7°C; y de la clara, - 0.5°C. El calor específico (C_p) del huevo entero es de 0.8356 Kcal/Kg°C y la conductividad térmica (k), 0.4627 W/m°C.^(6, 28, 32, 36, 38, 37, 38, 68, 76 y 90)

La combinación de las diferentes proteínas que conforman al huevo determinan su temperatura de coagulación. La adición de azúcar y la dilución de las proteínas del huevo, con leche por ejemplo, aumenta la temperatura de coagulación. La desnaturalización o coagulación de la proteína de huevo se ve reflejada en la firmeza, transparencia y opacidad del mismo^(12, 22, 29, 35, 48, 88, 107 y 113).

Los usos que encuentran las proteínas del huevo es la formación de espumas, aunque se ve inhibida por la presencia de lípidos en la yema; las proteínas de la yema son usadas como emulsionante, debido a su alto contenido de lecitina. Y encuentran aplicación en la

elaboración de flanes batidos, rellenos, budines, tartas o "pays", salsas, mayonesas, aderezos, crema batida, huevos revueltos, omelets, etc. (44, 52, 62, 72 y 104).

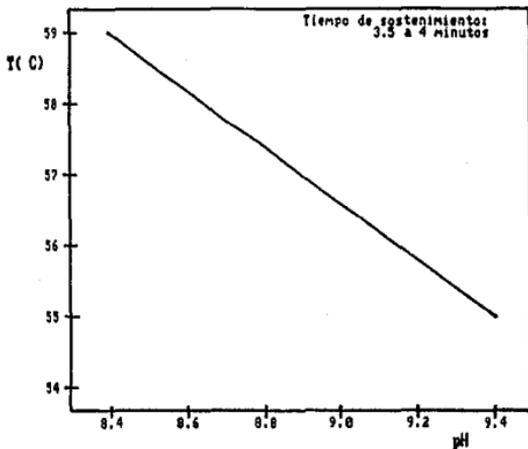


FIG. 3.3. TEMPERATURA DE PASTEURIZACIÓN RECOMENDADA PARA HUEVO ENTERO A VARIOS NIVELES DE PH (97). (Stadelman, 1975, Egg Science and technology).

El comportamiento reológico del huevo entero líquido, es el de un fluido pseudoplástico, en tratamientos térmicos por abajo de los 75°C y a temperaturas más elevadas, se comporta como un fluido plástico de Bingham (35 y 36).

3.1.5. Industrialización del huevo.

La industria del huevo en el mundo occidental, se dedica casi en exclusiva a la explotación del huevo de gallina; este a su vez es

destinado en su totalidad para el consumo humano.

El principal productor de huevo de gallina a nivel mundial son los Estados Unidos de Norteamérica, nuestro país se encuentra entre los primeros 10 productores (97).

Los huevos con cascarrón se recogen a mano o en bandas automáticas, estando las gallinas en jaulas de alambre individuales. Una vez recolectados, los cascarrones se rocían con una capa delgada de aceite mineral inodoro para evitar que el cascarrón pierda dióxido de carbono. Después se empaican en cajas de 360 piezas, se enfrían y se mantienen a 12°C y a 70% HR hasta que son recogidos en camiones refrigerados, para su clasificación, lavado, gradación y empaque en la planta de procesamiento central.

En la planta de procesamiento, los huevos se retiran de las cajas usando un elevador al vacío, después se colocan sobre una banda transportadora que los hace girar, esta banda los transporta a través de un baño detergente, desinfectante, lavado con agua, a un enjuague con agua caliente y finalmente a través de un secador de aire; en este punto, en algunas plantas se rocían otra vez con aceite; después ya lavados, todavía en rotación, se hacen pasar sobre una lámpara de luz ultravioleta donde se retiran las piezas estrelladas o defectuosas, finalmente se transfieren en forma automática a otra línea transportadora donde se clasifican de acuerdo al tamaño y se empaican automáticamente en cartones sellados con una docena y se conservan refrigerados para su distribución.

Algunos huevos se rompen en una máquina automática que separa las yemas y las claras congelándolas para uso futuro mientras que otros se deshidratan en secadores por aspersión. Los lotes procesados por estos métodos pueden obtenerse como huevos enteros o yemas y claras o con diferentes proporciones de yema y otros aditivos como sal, azúcar u otros ingredientes que mejoran sus propiedades funcionales dependiendo del uso a que se destine. En la tabla 3.2. se presentan los tres tipos básicos de productos a base de huevo (20, 72 y 97).

3.1.6. Pasteurización del huevo.

La pasteurización se define como el proceso para eliminar

microorganismos vegetativos en un comestible mediante su calentamiento a temperaturas bien controladas durante períodos específicos de tiempo. En el caso del huevo, el microorganismo a destruir es la salmonela y la temperatura debe ser la adecuada para destruirla y evitar la coagulación de la albúmina.

La pasteurización de productos de huevo se encuentra reglamentada, tanto en los E.U.A. como en nuestro país, desde el año de 1965; aún cuando, desde 1930 ya se practicaba a nivel industrial la pasteurización de huevo entero líquido⁽⁹⁷⁾.

TABLA 3.2 PRODUCTOS A BASE DE HUEVO.

Productos secos
Clara de huevo Sólidos secos de clara de huevo Albumina en hojuelas Clara de huevo instantánea Huevo entero y yema Sólidos de huevo entero Sólidos de huevo entero estabilizados (libres de glucosa) Sólidos de yema de huevo estabilizados (libres de glucosa) Sólidos de huevo entero no aglutinables Sólidos de yema de huevo no aglutinables Mezclas de huevo entero y yema con carbohidratos Con azúcar Con miel de maíz
Productos congelados
Clara de huevo Huevo entero Huevo entero con yema adicionada Yema de huevo Huevo entero con miel de maíz Yema de huevo con azúcar Huevo entero con sal
Productos líquidos
Clara de huevo Yema de huevo Huevo entero

(Stadelman, 1979, Egg Science and technology).

En sus inicios, la pasteurización de huevo se realizaba en pasteurizadores tipo batch; a últimas fechas se viene realizando en pasteurizadores continuos y con el advenimiento de los intercambiadores de placas se realiza con el sistema HTST (High Temperature-Short time); además se pretende en un futuro no muy lejano, realizar la pasteurización de huevo en sistemas UHT (Ultra-High Temperature).

La pasteurización de huevo puede usarse como un paso intermedio en la fabricación de huevo en polvo o como el proceso final del huevo entero líquido pasteurizado (28, 52 y 97).

La fabricación de huevo entero líquido pasteurizado sigue los procesos que se enumeran a continuación:

Descascarado. Los huevos con cáscara se cambian de las cajas de embalaje a recipientes limpios, en los que se les quita la cáscara a mano o en máquina y la parte líquida se descarga en un tanque colector (80).

Emulsionamiento y filtración. La pulpa del huevo entero se bombea del tanque colector, pasando por unos coladores de malla 80 para eliminar la chalaza y evitar problemas en el flujo. La acción de bombeo da por resultado el emulsionamiento de la clara con la yema (66).

Estabilización. Conocida también como extracción de la glucosa; esto se hace para evitar la reacción de Maillard, para alargar la vida media, evitar pérdida de solubilidad y cambios en el sabor, olor y color.

A la pulpa se le añade un complejo enzimático de glucosa-oxidasa-catalasa (Somex fabrica este complejo y lo denomina comercialmente DSS-O), el cual convierte la glucosa a ácido glucónico con la fijación de oxígeno, en la práctica se emplea la adición de peróxido de hidrógeno al 35% para favorecer la reacción de descomposición en agua y oxígeno necesario para la conversión a Ácido glucónico (Fig. 3.4.).

El producto es estable y la concentración final de glucosa libre no es mayor del 0.1% en base seca. La remoción de azúcar es una reacción de primer orden y se lleva a cabo por un exceso de oxígeno. Cualquier peróxido sobrante queda descompuesto por acción de la catalasa. El tiempo de estabilización esta fijado

por el nivel inicial y el final de glucosa y es inversamente proporcional a la concentración de enzima. La temperatura de operación del complejo enzimático es de 10 a 30°C. Este tratamiento asegura la eliminación de la pequeña cantidad de glucosa que se encuentra presente en el huevo (6 y 8).



FIG. 3.4. REACCIONES DE ESTABILIZACION DE HUEVO
(Jamieson, 1975, Manejo de los alimentos).

Pasteurización. El primer objetivo es reducir el daño potencial debido a los microorganismos patógenos y retener las propiedades físicas y funcionales del huevo en su estado original. Al calentar los huevos para pasteurización, se intenta utilizar la temperatura más alta posible, sin alterar las propiedades delicadas y sensibles que hacen del huevo elemento tan útil. Existe un límite relativamente bajo en relación a la temperatura a la cual se pueden calentar los huevos. En la tabla 3.3. se presentan los requerimientos U.S.D.A. de temperatura y tiempo de retención para la pasteurización de diferentes productos de huevo. Luego el producto se enfría hasta 5 ó 6°C y se almacena en refrigeración, entre - 1.7 y 0.6°C, a una humedad relativa de 85 a 90% y llega a tener una vida de anaquel de poco más de 9 meses.

Existen varios productos de huevo, todos los cuales son diferentes en su sensibilidad al calor y en la facilidad con que las bacterias los atacan. Comercialmente se utilizan tres métodos de proceso básicos, los cuales, por sí solos o en combinación, son utilizados para pasteurizar los productos del huevo. Estos métodos son:

- a) Calentamiento del huevo líquido,

- b) Calentamiento del producto seco de huevo y
 c) Exposición del huevo líquido al peróxido de hidrógeno.

Se han estudiado otros métodos, pero no se utilizan comercialmente. Algunos de éstos son el tratamiento de los productos secos de huevo con époxiidos tales como el óxido de propileno y radiación del producto líquido o seco con luz ultravioleta o con radiación ionizante. Todos estos métodos se han encontrado efectivos, pero no han recibido permiso de las agencias federales de los E.U.A.. En nuestro país no se ha legislado sobre el uso de radiaciones ionizantes, y actualmente el Instituto Nacional de Investigaciones Nucleares realiza estudios para la aplicación de radiaciones ionizantes en la preservación de alimentos (8, 28, 67, 75 y 97).

TABLA 3.3. REQUERIMIENTOS USDA PARA PASTEURIZACION DE PRODUCTOS DE HUEVO

Producto líquido de huevo	Requerimientos de temperatura mínima (°C)	Requerimientos de retención mínima	
		Partícula más rápida (min)	Partícula promedio (min)
Albumina (sin uso de productos químicos)	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Huevo entero	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Mezclas de huevo entero (menos de 2% de ingredientes adicionales)	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Huevo entero fortificado o mezclado (24 a 38% de sólidos de huevo, 2 a 12% de ingredientes adicionales)	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Huevo entero salado (2% o más de sal adicionada)	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Huevo entero con azúcar (2 a 12% de azúcar adicionada)	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Wema simple	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Wema con azúcar (2% o más de azúcar adicionada)	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5
Wema con sal (2 a 12% de sal adicionada)	62.8-63.3	1.5-1.7	3.0-3.5

Prueba para determinar la adecuada pasteurización. En la pasteurización de productos alimenticios es conveniente tener una prueba sencilla y rápida que verifique la eficiencia del proceso de pasteurización. Cunningham y Lineweaver (1965), así como Ball y Cotterill (1971), han realizado estudios de la actividad de las enzimas fosfatasa, α -amilasa y catalasa, como posibles indicadores de una mala pasteurización de los productos de huevo y han llegado a la conclusión de que la fosfatasa no puede ser usada como prueba de la pasteurización de productos de huevo; a diferencia de la α -amilasa y la catalasa que se inactivan a temperaturas semejantes a las que se inactiva la *Salmonella*.

En la prueba de detección de α -amilasa, el huevo pasteurizado se mezcla con una solución de almidón al 10% y se incuba a 30°C por 30 minutos, a continuación se desproteíniza con ácido tricloroacético al 5%, se filtra y al filtrado se añade una solución de yodo. Si el huevo fue pasteurizado correctamente, no contiene amilasa y por lo tanto aparecera el color azul del complejo almidón-yodo. De lo contrario, si la α -amilasa no fue inactivada, esta desdoblará el almidón durante la incubación y al añadir la solución de yodo, no aparecera el color azul (62, 70, 71 y 81).

Cuando se lleva a cabo debidamente la pasteurización, puede dar muerte al 99.7% de los microorganismos contenidos en el huevo, que incluye salmonela, coliformes, proteus, pseudomonas cocos grampositivos, levaduras y mohos. Sólo sobrevivirán organismos aerobios y anaerobios formadores de esporas, determinados tipos de estreptococos y algunos micrococos (604).

En los E.U.A., desde 1966, la reglamentación de la U.S.D.A. y la F.D.A. han requerido la pasteurización de los productos de huevo. La U.S.D.A. ha especificado las condiciones a las cuales debe de pasteurizarse el huevo, mientras que la F.D.A. ha mantenido la posición de que deben pasteurizarse por un método que verifique que los productos den una reacción negativa de *Salmonella*. En México desde el año de 1968, la Secretaría de Salubridad y Asistencia y la Secretaría de Comercio, a través de la Dirección General de Normas ha regulado los requerimientos sanitarios de los productos de huevo y establece que dichos

productos deben presentar una reacción negativa de salmonela coliformes, proteus y pseudomonas; además de aceptar una cuenta bacteriana máxima (mesófilos) de 1,000 colonias por gramo en productos líquidos y de 500 colonias por gramo en productos en polvo; según la norma oficial para huevo entero deshidratado o en polvo NDM-S-330-S-1979 '72 y '80'.

3.2. Transferencia de calor.

La transferencia de energía en forma de calor es muy común en muchos procesos químicos y alimenticios. La transferencia de calor suele ir acompañada de otras operaciones unitarias, tales como el secado, pasteurización, esterilización, evaporación, refrigeración y congelación de alimentos. La transferencia de calor se verifica debido a la fuerza impulsora de una diferencia de temperaturas, el calor fluye de la región de alta temperatura a la de temperatura más baja.

3.2.1. Mecanismos de transferencia de calor.

La transferencia de calor puede verificarse por medio de uno o más de los tres mecanismos de transferencia:

a) Conducción. Se verifica mediante la transferencia de energía de movimiento entre moléculas adyacentes. Las moléculas con mayor temperatura que tienen más energía y movimientos, se encargan de impartir energía a moléculas colindantes que están en niveles energéticos más bajos. Este mecanismo está presente en sólidos, líquidos y gases en los que exista un gradiente de temperaturas. La transferencia de calor por conducción obedece a la ley de Fourier para la conducción de calor en fluidos y sólidos:

$$q_x = -k A \Delta T / \Delta x$$

donde q_x es la velocidad de transferencia de calor en la dirección x,

en Kcal/s; A es el área de la sección transversal normal a la dirección del flujo de calor, en m^2 ; T es la temperatura, en $^{\circ}C$; x es la distancia, en m y k es la conductividad térmica, en Kcal/s $^{\circ}C$ m. El signo negativo es debido a que la energía fluye en la dirección en que la temperatura decrece o hacia abajo en el gradiente de temperatura.

b) Convección. Es el mecanismo de transferencia de calor entre partes relativamente calientes y frías de un fluido por medio de su mezcla. Si esta mezcla es natural, y debida al movimiento que origina la diferencia de densidad del fluido por la diferencia de temperatura, se denomina convección natural. Si la mezcla es originada por acciones mecánicas, como agitadores, bombas, ventiladores, etc., en este caso se denomina convección forzada. Además, con frecuencia involucra también el intercambio de energía entre una superficie sólida y un fluido. La transferencia de calor por convección está regulada por la ley de Newton:

$$q = h A (T_w - T_f)$$

donde q es la velocidad de transferencia de calor, en Kcal/s; A es el área de flujo de calor, en m^2 ; T_w es la temperatura de la superficie del sólido, en $^{\circ}C$; T_f es la temperatura promedio o general del fluido, en $^{\circ}C$ y h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, en Kcal/s $^{\circ}C$ m^2 .

c) Radiación. La radiación es la transferencia de energía a través del espacio por medio de ondas electromagnéticas; por lo tanto, difiere de la conducción y la convección en cuanto a que no requiere de un medio físico para la transferencia. La transferencia radiante de calor se rige por las mismas leyes que dictan el comportamiento de la transferencia de luz. Los sólidos y los líquidos tienden a absorber la radiación que está siendo transferida a través de ellos, por lo que la radiación adquiere su principal importancia en la transferencia a través del espacio o de gases. La ley de Stefan-Boltzmann rige este mecanismo de transferencia de calor:

$$E = \epsilon \sigma T^4$$

donde E es energía radiante del flujo emisor o potencia emisiva de la superficie, en Kcal/s m^2 ; ϵ es la emisividad de la superficie, adimensional; σ es la constante de Stefan-Boltzmann = 1.3549×10^{-11} Kcal/ $m^2 \cdot C^4$ y T es la temperatura de la superficie, en $^{\circ}C$.

3.2.2. Transferencia de calor por convección.

La convección describe el proceso por el cual un fluido se mueve en una comunicación termal con una superficie sólida o líquida y recibe o libera energía por medio de conducción o radiación, y entonces deja la superficie. El movimiento del fluido es necesario para que se efectúe el fenómeno de convección. Si ese movimiento es ocasionado por algún mecanismo externo como un agitador o una bomba, la situación se conoce como convección forzada. Si el movimiento es causado por diferencias de temperatura local y efectos de flotación, la situación es conocida como convección libre.

Para poder observar mejor los mecanismos básicos que se citan, se puede recurrir al concepto de capas límites. En la Fig. 3.5. se presentan los movimientos de un fluido que se desliza sobre una superficie plana en un caso de convección forzada. La velocidad puede cambiar desde cero en la superficie a V_{α} en las condiciones de corriente libre y la temperatura puede cambiar desde T_s en la superficie hasta T_{α} en la corriente libre. La región próxima a la placa en donde cambia la velocidad se denomina capa límite hidrodinámica; usualmente el espesor de ésta (que es muy pequeño) queda determinado por la coordenada y en donde la velocidad del fluido alcanza el 99% de la velocidad de corriente libre, este concepto fue introducido por Prandtl y básicamente divide al campo de flujo en dos regiones: una capa muy delgada en donde las fuerzas viscosas de corte son significativas y una región exterior a esta capa en donde los efectos viscosos son prácticamente despreciables. De manera análoga la región en donde cambia la temperatura en el fluido está confinada a una región cercana a la superficie de la placa y se define como capa límite térmica.

El intercambio de energía entre el fluido y la superficie se

efectúa por conducción en la interfase o de acuerdo a la ley de Fourier. Sin embargo, es extremadamente difícil medir

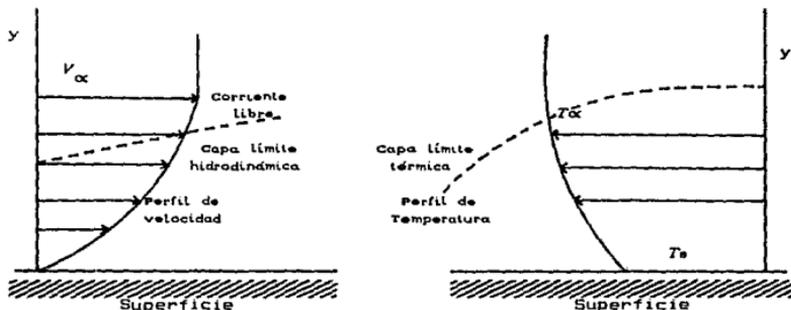


FIG. 3.5. CONVECCION FORZADA SOBRE UNA SUPERFICIE PLANA
(Bally, 1990. Fundamentos de la Ingeniería de Alimentos).

experimentalmente el gradiente de temperatura del fluido en la superficie. En consecuencia, por lo general se expresa el flujo de calor de acuerdo a la ley de Newton:

$$q = h A (T_w - T_f)$$

El tipo de flujo, ya sea laminar o turbulento, del fluido individual, ejerce un efecto considerable sobre el coeficiente de transferencia de calor h , al que se le conoce como coeficiente de película, debido a que la mayor parte de la resistencia a la transferencia de calor se encuentra en la película delgada cercana a la pared.

El coeficiente de transferencia de calor se llama algunas veces coeficiente de película, de conductancia unitaria pelicular o coeficiente pelicular de convección (10, 38 y 64).

3.2.3. Números adimensionales para los cálculos de convección.

Las correlaciones empíricas para el coeficiente de transferencia de calor con frecuencia se expresa en términos de números adimensionales.

Nusselt. Al número de Nusselt se le conoce como el coeficiente adimensional de transferencia de calor y es la relación que lo define es:

$$Nu = h L/k$$

donde h es el coeficiente convectivo de transferencia de calor, L es longitud característica como diámetro de un tubo o longitud de la superficie plana y k es la conductividad térmica del fluido.

Reynolds. Se define el número de Reynolds como la relación entre las fuerzas cinéticas y las viscosas que actúan sobre un fluido; las fuerzas cinéticas tienden a mantener el flujo en su dirección original y las viscosas tienden a retardar el movimiento y la relación que lo representa es:

$$Re = \rho V L/\mu$$

donde ρ es la densidad del fluido, V es la velocidad media del fluido, L es longitud característica como diámetro de un tubo o longitud de la superficie plana y μ es la viscosidad del fluido.

Prandtl. El número de Prandtl es la relación componente cortante de la difusividad de impetu (μ/ρ), a la difusividad de calor ($k/\rho C_p$) y correlaciona físicamente el espesor relativo de la capa hidrodinámica con el de la capa límite térmica; y se puede interpretar físicamente como la relación de la capacidad del fluido para almacenar energía a la capacidad para transmitirla o conducirla. Y se representa como:

$$Pr = C_p \mu/k$$

donde C_p es el calor específico a presión constante, μ es la viscosidad del fluido y k es la conductividad térmica del fluido.

Grashof. El número de Grashof, representa la relación entre las fuerzas ascensionales y las fuerzas viscosas en una situación de convección libre, juega un papel en las condiciones de convección libre similar al del número de Reynolds en las situaciones de convección forzada. Cuando las fuerzas ascensionales son grandes, el flujo se hace turbulento. Cuando las fuerzas viscosas son grandes, el flujo se cambia a laminar.

$$Gr = g \beta (T_s - T_\alpha) \rho^2 L^2 / \mu^2$$

donde g es la aceleración debida a la gravedad, β es el coeficiente volumétrico de expansión que tiene unidades de $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ó $^{\circ}\text{F}^{-1}$, ρ es la densidad de la masa, μ es la viscosidad del fluido, T_s es la temperatura de la superficie, T_α es la temperatura de corriente libre o temperatura ambiente y L es longitud característica como diámetro de un tubo o longitud de la superficie plana (10, 30 y 38).

3.2.4. Correlaciones empíricas de convección forzada en placas.

La mayoría de las correlaciones para predecir el valor del coeficiente de película h son semiempíricas y la determinación de dicho valor constituye la mayor dificultad en los cálculos de transferencia de calor, la cual depende de las propiedades físicas del fluido, densidad y viscosidad; del tipo y velocidad del flujo, velocidad, nivel de turbulencia y posición en la superficie; de la diferencia de temperaturas y de la geometría de la superficie.

El coeficiente de transferencia de calor en la convección forzada depende marcadamente del número de Reynolds asociado con el flujo del fluido sobre una superficie. La forma de la correlación depende de si el flujo es laminar o turbulento y de la geometría de la superficie.

Para el flujo que pasa por una superficie plana, la capa límite por lo regular sufre una transición desde el flujo laminar hasta el turbulento en un número de Reynolds aproximadamente de 5×10^5 . Se

supone por lo general que para números de Reynolds menores de este valor el flujo es laminar y que para números mayores de 500 000 el flujo es turbulento.

Para el flujo de capa límite laminar en una placa plana isotérmica, los números medio y local de Nusselt están dados por:

$$\begin{aligned}Nu_x &= 0.664 Re_x^{1/2} Pr^{1/3} \\Nu_L &= 0.332 Re_L^{1/2} Pr^{1/3}\end{aligned}$$

respectivamente, usando la temperatura de la película para la evaluación de la propiedad. Estas ecuaciones son válidas para fluidos con números de Prandtl en el intervalo de $0.6 < Pr < 50$.

Para la capa límite turbulenta en una placa plana, se puede expresar el coeficiente de transferencia de calor en una capa límite turbulenta en forma adimensional como sigue:

$$\begin{aligned}Nu_x &= 0.0360 Re_x^{4/5} Pr^{1/3} \\Nu_L &= 0.0288 Re_L^{4/5} Pr^{1/3}\end{aligned}$$

Sin embargo, la turbulencia puede empezar con un número de Reynolds inferior a 5×10^5 , si la placa es rugosa (10, 80, 88 y 112).

3.2.5. Intercambiadores de calor.

Cualquier aparato que transfiere calor desde un fluido hacia otros separados por una pared sólida es un intercambiador de calor. La transferencia de calor se efectúa por convección desde el fluido caliente a la placa, a través de la placa por conducción y luego por convección al fluido frío. En el intercambiador de calor, si los fluidos tanto el caliente como el frío fluyen en la misma dirección, el flujo es paralelo. Si los fluidos caliente y frío fluyen en direcciones opuestas hay un flujo a contracorriente. En la figura 3.6. se indican los perfiles de temperatura, tanto del flujo paralelo como del flujo a contracorriente en un intercambiador de calor. Los tipos de intercambiadores de calor que existen son los de doble tubo,

tubos y coraza, placas lisas, placas corrugadas o acanaladas. La velocidad de transferencia en un intercambiador de calor se expresa usualmente como:

$$Q = U A F \Delta T$$

donde Q es la velocidad de transferencia de calor, en Kcal/hr; U es el coeficiente de transferencia global de calor, en Kcal/hr $m^2 \cdot ^\circ C$; A es el área de transferencia de calor efectiva, en m^2 ; F es el factor de corrección que depende del tipo de intercambiador y de las temperaturas del fluido, adimensional y ΔT es la diferencia de temperatura, en $^\circ C$.

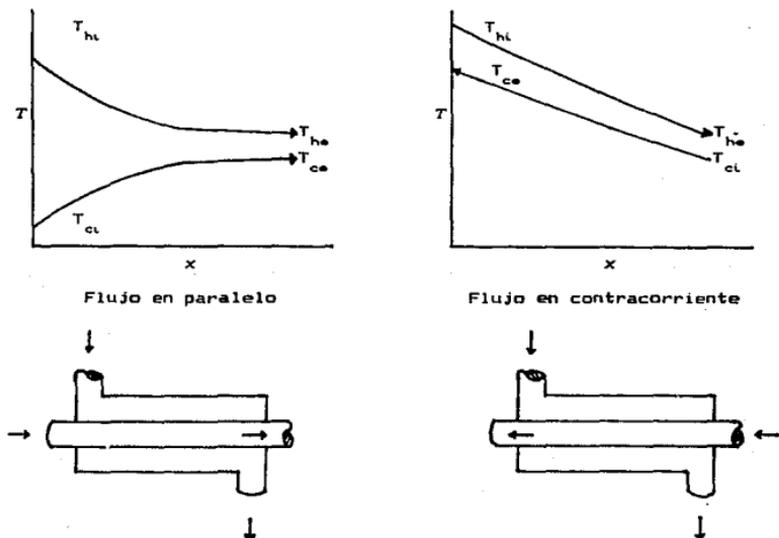


FIG. 3.6. PERFIL DE TEMPERATURA EN UN INTERCAMBIADOR DE CALOR (Batty, 1990, Fundamentos de la Ingeniería de Alimentos).

Los intercambiadores de calor de placas consisten en placas estándares (fig. 3.7.), que sirven como superficies de transferencia de calor y un armazón para su apoyo; estas placas se encuentran colocadas una frente a otra, formando un paquete y comprimidas por varios tornillos para soportar la presión interior; el principio de diseño es muy similar al de los filtros de prensa de placa y armazón. Presentan la ventaja de proporcionar una superficie de intercambio grande, la caída de presión es alta y resulta imposible que haya fugas de fluidos; además de ser muy accesible para la limpieza ya que los grupos de placas están montados de forma que se puedan sacar fácilmente.

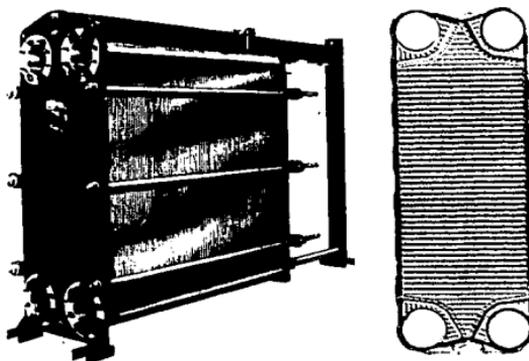


FIG. 3.7. INTERCAMBIADOR DE PLACAS
(Baqueo, 1963, Equipos
química y alimentaria).

para la industria

Las placas estándares de transferencia de calor (normalmente de acero inoxidable de los tipos 304 y 316, pero también de titanio, níquel, metal monel, Incoloy 825, Hastelloy C, bronce al fósforo y cuproníquel), comprimidas en una pieza simple de material de 0.1270 a 0.3175 cm, tienen estrías para recibir empaques de caucho o neopreno, que asegura la hermeticidad y la separación necesaria entre placa y

placa. El diseño corrugado de las placas les da rigidez, aumenta la superficie de intercambio, fomenta la turbulencia de los fluidos y asegura la distribución completa del flujo. Los miembros de soporte y armazón existen en acero inoxidable recubierto o en acero dulce con recubrimiento de esmalte. Las placas se pueden reemplazar con facilidad. El área se puede ajustar mediante la adición o la eliminación de placas. Una vez formado el paquete de placas, la disposición de los orificios dirige el paso de los fluidos, uno por las separaciones pares y el otro por las impares (fig. 3.8.).

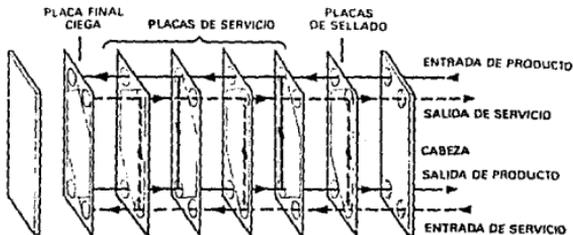


FIG. 3.8. FUNCIONAMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR

Maquero, 1968. Equipos para la industria química y alimentaria.

Se pueden usar intercambiadores de calor de placa para servicios múltiples; es decir, pueden pasar varios fluidos diferentes por las distintas partes del intercambiador. Los fluidos viscosos, de hasta 30 000 cp, dan coeficientes de transferencia relativamente altos, puesto que muchos intercambiadores de calor del tipo de placa aseguran un flujo turbulento con números de Reynolds de sólo 150.

Las limitaciones de diseño incluyen $2.07 \times 10^6 \text{ N/m}^2$ (300 psi) como presión máxima, una temperatura máxima de 149°C (300°F) y en suspensiones de sólidos y líquidos, las partículas tienen que ser de un diámetro de 0.0508 cm (0.02 in) menor que la distancia entre las placas.

Los intercambiadores de placas que se usan en la industria de los alimentos, constan generalmente de las siguientes secciones de intercambio de calor:

- a) Precalentamiento, por recuperación del calor del fluido ya tratado.
- b) Calentamiento, por medio de agua caliente.
- c) Mantenimiento, sosteniendo la temperatura durante un tiempo determinado por medio de agua caliente.
- d) Preenfriamiento, por medio del fluido de entrada.
- e) Enfriamiento, por circulación de agua fría a 10°C.
- f) Refrigeración, por circulación de agua helada a 0°C.

La posibilidad de aumentar la capacidad del intercambiador o alguna de sus otras características es sencillo con el aumento o disminución de placas instaladas, así como la variación de su disposición (9, 10, 20, 28, 61 y 79).

3.2.6. Diferencia media logarítmica de temperatura.

Es usual que la diferencia entre las temperaturas de los fluidos caliente y frío a través de la pared del intercambiador de calor no es la misma en cualquier sitio del intercambiador y aún para una resistencia térmica constante, el flujo de calor por unidad de área es diferente a lo largo del intercambiador; por consecuencia, es necesario que se establezca un procedimiento para determinar una diferencia apropiada de temperatura, ΔT , para usarla en los cálculos de transferencia de calor. En un intercambiador de calor, un fluido caliente que circula por un lado de la pared de la placa y que se enfria de T_1 a T_2 por medio de un fluido frío que fluye por el otro lado de la placa y que se calienta de T_2 a T_1 , como lo muestra la figura 3.9; el valor de ΔT varía con la distancia, es decir, cambia a medida que el área A pasa de cero en la entrada a A en la salida del intercambiador.

La diferencia media logarítmica de temperatura o *LMTD* (por sus siglas en inglés log mean temperature difference), se define como la diferencia de temperatura en uno de los extremos del intercambiador menos la diferencia de temperatura en el otro extremo del

intercambiador, dividida entre el logaritmo natural de la relación entre estas dos diferencias de temperatura:

$$\Delta T = LMTD = \Delta T_2 - \Delta T_1 / \ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)$$

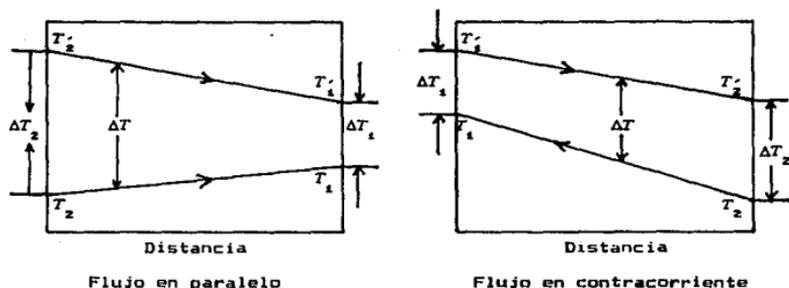


FIG. 3.9. DETERMINACION DE LMTD

(Geankoplis, 1969, Procesos de transporte y operaciones unitarias).

La relación de *LMTD* puede emplearse cuando la temperatura en uno de los fluidos es constante a través de todo el intercambiador, como en el caso de un condensador o un evaporador.

La expresión de *LMTD* es válida para un intercambiador de calor de doble tubo con flujo a contracorriente o en paralelo. En intercambiadores de calor más complejos como los del tipo de coraza y tubo con varios pasos de tubos, del tipo de flujo transversal o de placas, la derivación matemática de una expresión para la diferencia promedio de temperaturas, ΔT , es bastante difícil. Por lo que es común modificar el de *LMTD* mediante un factor de corrección, el cual está determinado por la geometría del sistema y el arreglo del paso del flujo:

$$\Delta T = F (LMTD)$$

donde ΔT es la diferencia promedio de temperaturas en esa geometría

de intercambiador de calor, F es un factor de corrección, debido al número de pasadas del flujo y de la configuración del equipo y $LMTD$ es la diferencia media logarítmica de temperatura. El valor de F es el mismo tanto para el flujo paralelo como en contracorriente y se calcula gráficamente de acuerdo con la figura 3.10.; en donde el numerador de la relación define al número de pasos de flujo de uno de los fluidos y el denominador al número de pasos de flujo del otro fluido (10, 38 y 64).

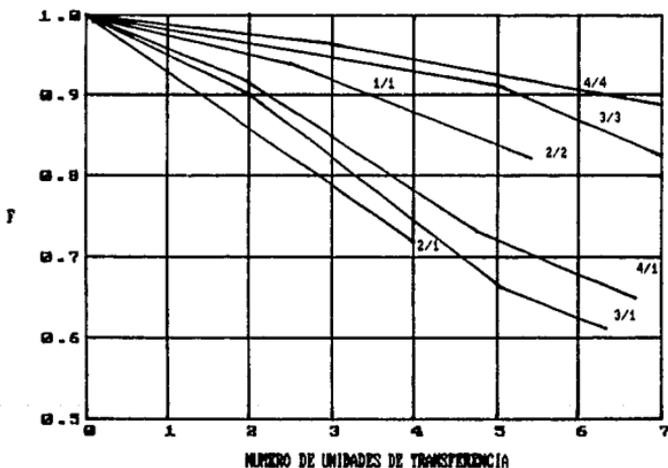


FIG. 3.10. FACTORES DE CORRECCION (F) PARA LMTD EN UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS (Perry, 1992, Manual del Ingeniero Químico).

3.2.7. Transferencia de calor en fluidos no newtonianos.

La mayoría de los estudios de transferencia de calor en fluidos

se han realizado con fluidos newtonianos o suponiendo un comportamiento newtoniano. Sin embargo, en la industria de procesamiento de alimentos, muchos de los fluidos que se manejan presentan comportamiento no newtoniano. Para poder diseñar equipo para estos fluidos o predecir su comportamiento en un intercambiador de calor, es necesario conocer las constantes reológicas, K' y n' , o medirlas experimentalmente. La mayor parte de los fluidos no newtonianos son pseudoplásticos y pueden representarse por la ley de la potencia. Las propiedades físicas que se necesitan conocer para determinar los coeficientes de transferencia de calor son la densidad (ρ), la capacidad calorífica (C_p) y la conductividad térmica (k). Skelland (1969) ha determinado que el valor de la constante reológica n' no varía de manera apreciable en un amplio intervalo de temperaturas; sin embargo, la constante reológica K' sí lo hace. Una gráfica de $\log K'$ en función de $1/T_{abs}$ ó T , casi siempre puede representarse en forma aproximada como una línea recta; además una gráfica de la viscosidad en función de $1/T$ para fluidos no newtonianos es también una línea recta, de acuerdo con la ley de Arrhenius ⁽³⁰⁾.

3.2.8. Tiempos medios de residencia.

El comportamiento real de los equipos nunca se ajusta exactamente a las situaciones en las que todas las partículas de un fluido reciben exactamente el mismo tiempo de tratamiento; en muchos casos se aproxima tanto a estas condiciones que se puede asumir este comportamiento ideal sin incurrir en un error significativo. En otros casos las desviaciones pueden ser muy grandes y originarse por desviaciones del flujo, por recirculación del fluido, o por formación de zonas estancadas o muertas en el equipo. En los equipos de proceso tales como intercambiadores de calor, columnas de relleno y reactores deben evitarse esas desviaciones, que siempre originan una disminución en la eficacia de la instalación.

En el tema de distribución de tiempos medios de residencia es importante conocer algunos conceptos:

Tiempo de contacto. Es la relación entre el volumen del reactor y el flujo volumétrico total de alimentación:

$$\tau = V/Q$$

donde τ es el tiempo de contacto, en s; V es el volumen del reactor, en lt y Q es el flujo volumétrico alimentado, en lt/s. El valor de tiempo de contacto corresponde al tiempo necesario para procesar un volumen de alimentación igual al volumen del equipo.

Velocidad espacial. Es la inversa del tiempo de contacto:

$$SV = 1/\tau = Q/V$$

donde SV es la velocidad espacial, en s^{-1} . El valor se refiere al número de volúmenes de equipo que pueden procesarse de alimentación en la unidad de tiempo.

Tiempo de residencia. Es el tiempo real que un elemento de fluido tarda en atravesar un volumen de reactor dV :

$$d\tau' = dV/Q$$

Si no hay cambio en la temperatura, presión o número de moles, el tiempo de residencia es igual al tiempo de contacto y se obtiene un flujo tapón.

Distribución del tiempo de residencia. Conocido como *RTD* (por sus siglas en inglés residence time distribution). Las distintas fracciones de un fluido al seguir diferentes caminos a lo largo de un reactor tardan tiempos diferentes en pasar a través de este. La distribución de estos tiempos en la corriente del fluido que sale del equipo se denomina distribución de la edad a la salida E , o distribución del tiempo de residencia *RTD* del fluido y se le denomina curva E a la representación gráfica de esta en función del tiempo.

Para facilitar su comprensión suele representarse la *RTD* de tal manera que el área bajo la curva sea la unidad (fig. 3.11.); es

decir, se normaliza estadísticamente la distribución:

$$\int E dt = 1$$

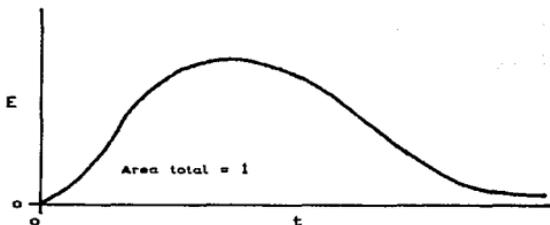


FIG. 3.11. CURVA E DE DISTRIBUCION DEL TIEMPO DE RESIDENCIA O RTD (Levenspiel, 1986, Ingeniería de las reacciones químicas).

La determinación experimental de la curva E se hace a través técnicas de estímulo-respuesta; mediante una perturbación o estímulo, representada por la inyección de un trazador en el fluido que entra al equipo, y observando la respuesta al estímulo, a través de la representación del trazador a la salida del equipo con respecto al tiempo. Puede emplearse como trazador cualquier sustancia que se pueda detectar y que no perturbe el tipo de flujo en el equipo y cualquier tipo de señal de entrada: al azar, periódica, en escalón o en impulso. Pese a que se puede obtener la misma información sobre el sistema, los dos últimos tipos de señal resultan ser los más sencillos en su tratamiento.

Curva F. Cuando la corriente de fluido que entra a un reactor no contiene trazador alguno y se le impone una señal trazadora en escalón, de C_0 en la corriente de fluido que entra al reactor, se denomina curva F a la curva representativa de la concentración del trazador a la salida del recipiente (midiendo esta concentración a la salida en función de su concentración a la entrada, C/C_0) frente al

tiempo (fig. 3.12.).

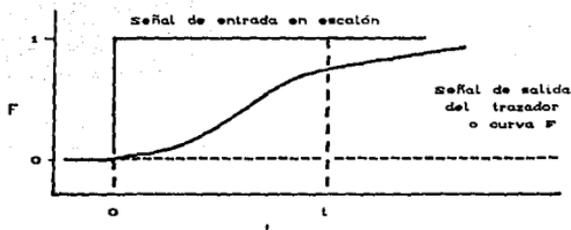


FIG. 3.12. SEÑAL DE RESPUESTA EN UNA CURVA F
(Levenspiel, 1966, Ingeniería de las reacciones químicas).

Curva C. Cuando la corriente de fluido que entra al recipiente no contiene trazador y se le impone una señal en impulso idealizada de trazador (señal trazadora que se inyecta de modo virtualmente instantáneo), se le denomina curva C a la respuesta normalizada del trazador en la corriente de salida frente al tiempo (fig. 3.13.); en consecuencia, la curva C da directamente la distribución de edades a la salida. Los conceptos matemáticos que se emplean para la interpretación de la respuesta de trazadores es el cálculo de la media o centroide de la distribución normal, que para la curva C está dada por la expresión:

$$t = \int t C dt / \int C dt$$

en caso de que la curva de distribución este constituida por valores discretos del tiempo:

$$t \cong \sum t_i C_i \Delta t_i / \sum C_i \Delta t_i$$

siguiendo el orden de importancia, sigue la amplitud de la distribución que se mide por la varianza, σ^2 , definida como:

$$\sigma^2 = \int (t - \bar{t})^2 C dt / \int C dt = [\int t^2 C dt / \int C dt] - \bar{t}^2$$

y que en valores discretos toma la forma:

$$\sigma^2 \cong \sum (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i / \sum C_i \Delta t_i = [\sum t_i^2 C_i \Delta t_i / \sum C_i \Delta t_i] - \bar{t}^2$$

La variancia representa el cuadrado de la amplitud de la distribución y sus dimensiones son (tiempo)². Es muy útil para comparar curvas experimentales con una curva de una familia de curvas teóricas (5, 13 y 60).

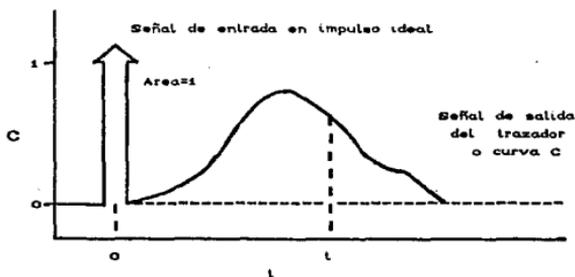


FIG. 3.13. SEÑAL DE RESPUESTA EN UNA CURVA C (60),
(Levenspiel, 1966, Ingeniería de las reacciones
químicas).

IV. OBJETIVOS.

Objetivo general:

Establecer las condiciones de operación y acondicionamiento en la pasteurización HTST de huevo entero líquido.

Objetivos particulares:

1. Establecer el acondicionamiento adecuado en el huevo entero líquido que resista un tratamiento térmico similar al de la destrucción de la *Salmonella*.
2. Analizar la transferencia de calor en un fluido no newtoniano a través de un intercambiador de placas, por medio del desarrollo de una ecuación empírica que describa el fenómeno.
3. Determinar los valores de flujo volumétrico y temperatura de tratamiento que garanticen la destrucción de *Salmonella* en huevo entero líquido y que no afecte de manera significativa la estructura de la ovoalbúmina.

V. DESARROLLO METODOLOGICO.

5.1. Preparación de la muestra.

En la figura 5.1. se presenta el diagrama de bloques de la preparación de muestra de huevo entero líquido estabilizado.

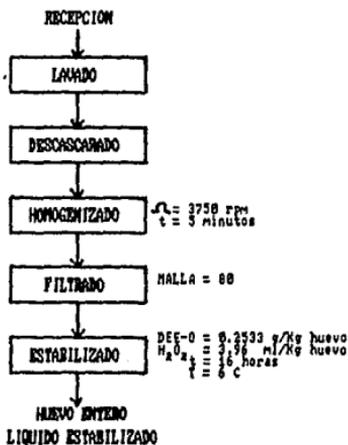


FIG. 5.1. OBTENCION DE HUEVO ENTERO LIQUIDO ESTABILIZADO (Stadelman, 1972, Egg science and technology).

Recepción. Se usó huevo blanco de granja, calidad México 1, que es el que se produce en mayor escala en nuestro país; además de ser el huevo que se comercializa para consumo popular.

Lavado. En esta operación se eliminó el polvo y la suciedad que pudieran contener los cascarones y se efectuó únicamente con agua.

Descascarado. El cascarón de los huevos se rompió de forma manual, separando las fracciones líquidas de los restos de cascarón.

Homogenizado. Esta operación se realizó en la nave 2000 de L.E.M con un agitador de propelas *J-line*, modelo 104, marca *Falboys Engin. Corp.* de 750/7500 rpm. La velocidad empleada fué de 3750 rpm.

Filtrado. El huevo entero homogenizado se filtro por gravedad a través de un tamiz de malla 80.

Estabilizado. De acuerdo con la información que proporciona *Traves* (Enzymes from Miles), para la utilización del complejo enzimático *D&S-0* (glucosa-oxidasa-catalasa), la concentración que se empleo de enzima *D&S-0* fué de 0.2533 g/Kg huevo y de peróxido de hidrógeno de 35 volúmenes de 3.96 ml/Kg huevo. Dejando reposar durante 16 horas el huevo así tratado a 6°C, para permitir la actividad del complejo enzimático. Y así obtener huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.

5.2. Diseño experimental.

5.2.1. Efecto del pH y la dilución con agua en la termoestabilidad del huevo entero líquido.

Actividad:

Determinar los valores de pH y de dilución con agua que proporcionen una mayor termoestabilidad al huevo entero líquido.

Hipótesis:

''La estabilidad del huevo entero líquido, se verá reducida por el aumento en la temperatura de tratamiento e incrementada por el aumento del pH y la dilución con agua.''

Determinación de variables:

1. Variables independientes:

- A) Temperatura de tratamiento. T [°] °C
- B) pH del huevo entero líquido.
- C) Dilución con agua.

2. Variable dependiente:

- Estabilidad de las proteínas del huevo entero líquido.

3. Variable de respuesta:

- Tiempo en el que existe un cambio de viscosidad. t [°] s

4. Factores a controlar:

- Relación en la muestra de clara/yema = 65.8/34.2.

- Tamaño de la muestra = 0.5 ml.
- Temperatura inicial de la muestra = 6°C.
- Velocidad de deformación ($\dot{\gamma}$) = 1 500 s⁻¹.

5. Niveles de variación:

- Variable A = 3
- Variable B = 3
- Variable C = 2

6. Intervalo de variación:

- Variable A = 50 a 70°C.
- Variable B = 5.5 a 7.5.
- Variable C = 0 a 20%.

Método estadístico: Análisis de varianza factorial.

Materiales y equipo:

Baño termostático Brookfield EX-200.

Huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.

Viscosímetro Brookfield de cono y plato RV con geometría CP40.

Desarrollo:

1. Se prepararon tres lotes de muestras, a los cuales se sometió a un ajuste de pH.
2. A cada uno de los lotes se les dividió en dos y a una de las fracciones de cada lote se le diluyó con 20% de agua.
3. Se ajustó la temperatura de tratamiento en el baño termostático y se hizo circular el agua por la cápsula del viscosímetro de cono y plato.
4. Se ingresaron las instrucciones de toma de lectura cada segundo a 200 rpm ($\dot{\gamma} = 1\ 500\ \text{s}^{-1}$), en el modo *non-geometric* del programa *Proguloc*, en el computador personal que controla el viscosímetro de cono y plato.
5. Se depositó 0.5 ml de muestra en la cápsula del viscosímetro de cono y plato e inmediatamente se colocó en la columna de medición, para dar inicio simultáneamente al programa *Proguloc*.
6. Al finalizar la ejecución del programa, se solicitó al mismo el registro de los datos de viscosidad (μ) contra tiempo (t).

7. Se repitió el procedimiento desde el punto 3. para las diferentes temperaturas de tratamiento, haciéndose por triplicado para poder validar estadísticamente los resultados. Las combinaciones que resultaron del tratamiento experimental se presentan en la figura 5.2., donde A = temperatura de tratamiento, B = pH del huevo entero líquido y C = dilución con agua.

8. Los datos que originó el tratamiento experimental se anotaron en la tabla 6.1.

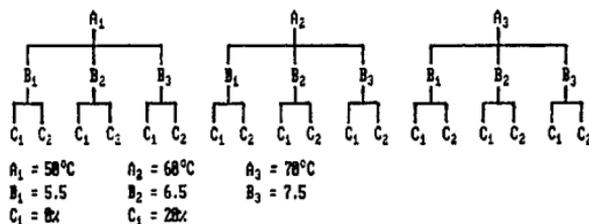


FIG. 5.2. COMBINACIONES DEL TRATAMIENTO EXPERIMENTAL DEL EFECTO DEL PH Y LA DILUCION CON AGUA EN LA TERMOESTABILIDAD DEL HUEVO ENTERO LIQUIDO.

5.2.2. Transferencia de calor a través de un intercambiador de placas en un fluido no newtoniano.

Actividad:

Desarrollar una ecuación empírica que describa la transferencia de calor a través de un intercambiador de placas en un fluido no newtoniano.

Hipótesis:

''El coeficiente global de transferencia de calor, incrementa su valor de manera no lineal, al aumentar el flujos volumétricos de alimentación, debido al comportamiento reológico del huevo''.

Determinación de variables:

1. Variables independientes:

A) Flujo volumétrico de alimentación. Q_A [=] lt/hr

B) Flujo volumétrico de agua de calentamiento. Q_c [=] lt/hr

2. Variable dependiente:

- Coeficiente global de transferencia de calor.

U [=] Kcal/hrm²°C

3. Variable de respuesta:

- Temperaturas intermedias del proceso. t_c [=] °C

4. Factores a controlar:

- Relación en la muestra de clara/yema = 65.8/34.2.

- Tiempo de estabilización de regimen = 10 min.

5. Niveles de variación:

- Variable A = 3

- Variable B = 3

6. Intervalos de variación:

- Variable A = 135 a 171 lt/hr.

- Variable B = 300 a 400 lt/hr.

Materiales y equipos:

Huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.

Intercambiador de calor de placas (pasteurizador) Alfa-laval modelo P-20.

Desarrollo:

1. Se colocaron 10 lt de la muestra en el tanque de retención a la entrada del pasteurizador.

2. Se abrieron las válvulas de líneas de servicio del equipo y se evaluó el flujo volumétrico de cada uno de los servicios.

3. Se reguló el flujo volumétrico de agua de calentamiento a una temperatura de 45°C.

4. Se reguló el flujo volumétrico de alimentación a la salida del equipo y se hizo circular el huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.

5. Después de diez minutos de circulación del fluido a través del pasteurizador, para estabilización del flujo; se inició la toma de lectura de las temperaturas registradas por los termómetros del

equipos.

6. El procedimiento se repitió desde el punto 3, para cada una de las combinaciones de flujos volumétricos, haciéndose por triplicado para dar una mayor validez estadística. Las combinaciones resultantes del tratamiento experimental se presentan en la figura 5.3., donde A = flujo volumétrico de alimentación y B = flujo volumétrico de agua de calentamiento.

B. Los datos que origino el tratamiento experimental se anotaron en la tabla 6.4.

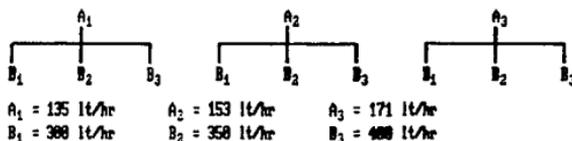


FIG. 5.3. COMBINACIONES DEL TRATAMIENTO EXPERIMENTAL DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR A TRAVES DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS EN UN FLUIDO NO NEWTONIANO.

**VI. ANALISIS Y DISCUSION
DE RESULTADOS.**

6.1. Efecto del pH y la dilución con agua en la termoestabilidad del huevo entero líquido.

Los resultados que arroja el tratamiento térmico del huevo entero líquido a diferentes valores de pH y dilución, se presentan en la tabla 6.1.; a dichos datos se les aplicó un análisis de varianza para un experimento trifactorial (3x3x2) y los resultados de dicho análisis se presenta en la tabla 6.2.

TABLA 6.1 TIEMPOS DE COAGULACIÓN DE HUEVO ENTERO LÍQUIDO (EN SEGUNDOS) TRATADO A DIFERENTES TEMPERATURAS, PH Y DILUCION.

Temperatura (°C)	pH	Dilución (%)	Repeticiones		
			1	2	3
50	5.5	0	68	67	67
		20	84	86	84
	6.5	0	100	101	100
		20	105	105	107
	7.5	0	111	113	113
		20	116	117	115
60	5.5	0	28	29	30
		20	34	36	35
	6.5	0	57	57	55
		20	62	63	61
	7.5	0	64	66	66
		20	68	68	69
70	5.5	0	2	2	2
		20	3	4	3
	6.5	0	7	8	7
		20	10	9	10
	7.5	0	12	11	11
		20	15	16	16

De los factores temperatura, pH y dilución, numéricamente, el que presenta una mayor influencia en la desnaturalización de la ovoalbúmina es la temperatura, seguida del pH y la dilución, en ese orden, presentándose en todos los casos diferencias altamente significativas.

TABLA 6.2. ANDEVA DE T A DIFERENTES TEMPERATURAS PH Y DILUCION.

Fuente de variación	SC	gl	CM	RV	NS $\alpha=0.01$	NS $\alpha=0.05$
Temperatura	72098	2	36049	36049	as	as
pH	7464	2	3732	3732	as	as
Dilución	400	1	400	400	as	as
Temperatura-pH	1529	4	382	382	as	as
Temperatura-dilución	86	2	43	43	as	as
pH-dilución	54	2	27	27	as	as
Temperatura-pH-dilución	128	4	32	32	as	as
Error	23	32	1			
Total	81782	53				

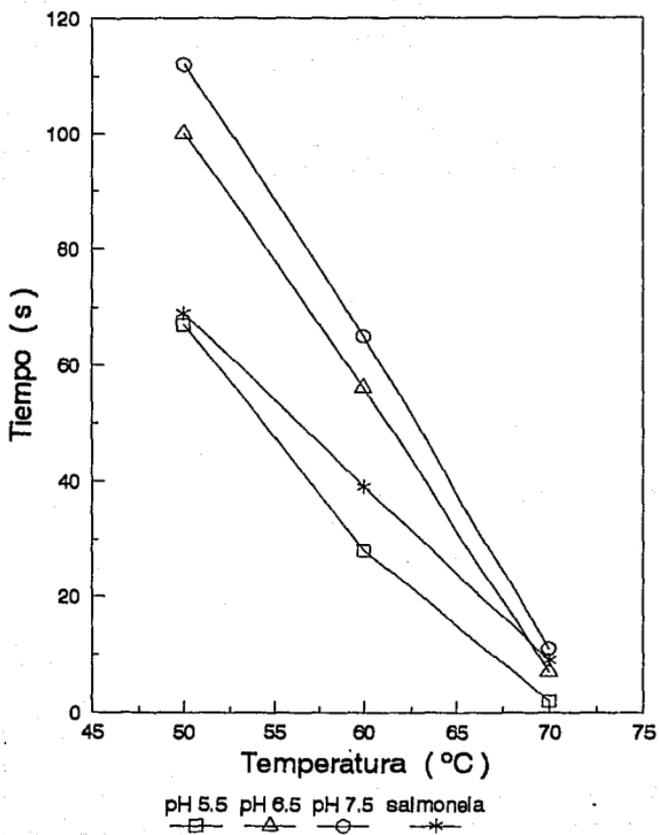
as = altamente significativo. ss = sin significancia.

En el efecto combinado de los factores, el que ejerce una mayor influencia es, por su valor numérico, el tratamiento de temperatura-pH, siguiendo en orden los tratamientos temperatura-dilución y pH-dilución. Finalmente en el tratamiento combinado de temperatura-pH-dilución, se observa una marcada influencia en la inestabilidad de la ovoalbúmina. En todos los casos se presentaron diferencias altamente significativas.

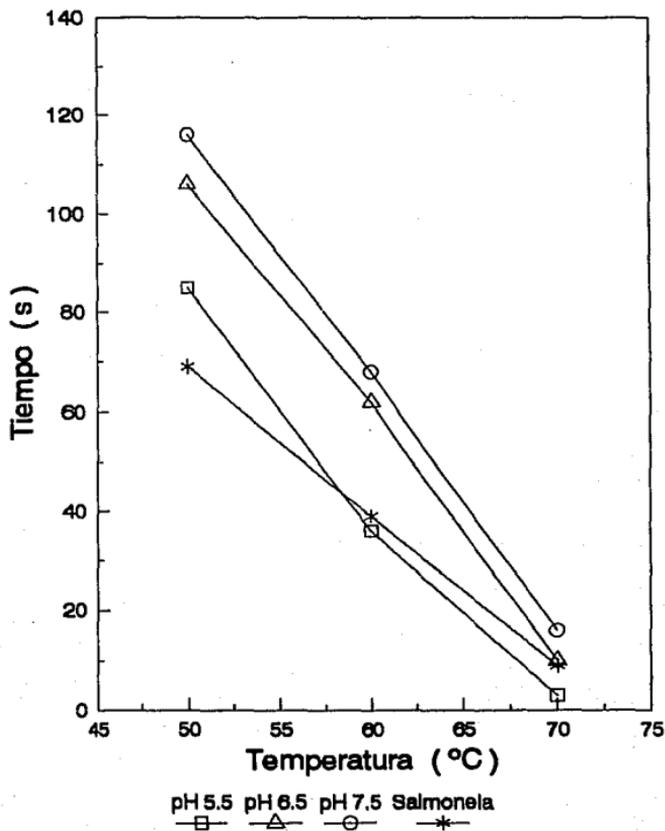
De acuerdo con el análisis estadístico obtenido, se elaboró las gráficas 6.1. y 6.2. que representan el tiempo al cual el huevo entero líquido sufre un cambio en su estructura con respecto a la temperatura, a diferentes valores de pH y dilución. En dichas gráficas se puede observar que a medida que se incrementa la temperatura, el tiempo necesario para desestabilizar a la ovoalbúmina disminuye; así mismo, cuando el valor de pH disminuye, origina un decremento en los tiempos de destrucción térmica y cuando se presenta dilución en el huevo entero líquido, existe un ligero incremento en el tiempo necesario para la destrucción térmica de la ovoalbúmina.

Esto se basa en que la temperatura, de acuerdo con la ley de Arrhenius, incrementa notablemente la velocidad de reacción de la desnaturalización de la ovoalbúmina, manifestándose como un incremento en la viscosidad aparente. La disminución de pH, ocasiona que la ovoalbúmina se acerque a su punto isoeléctrico y por lo tanto facilita su termodestrucción, mientras que el aumento de dicho valor

GRAF. 6.1. TIEMPOS DE DESTRUCCION TERMICA DE HUEVO ENTERO LIQUIDO SIN DILUIR, A DIFERENTES VALORES DE PH.



GRAF. 62. TIEMPOS DE DESTRUCCION TERMICA DE HUEVO ENTERO LIQUIDO DILUIDO CON 20% DE AGUA, A DIFERENTES VALORES DE PH.



estabiliza la estructura de la ovoalbúmina y dificulta su desnaturalización; sin embargo se ocasiona un cambio de coloración en la misma.

La adición de agua ocasiona una mayor estabilidad, debido a que la energía es también absorbida por la fracción acuosa, dificultando la desnaturalización de la ovoalbúmina.

6.2. Transferencia de calor a través de un intercambiador de placas en un fluido no newtoniano.

En la figura 6.1. se presenta la secuencia de cálculo para la obtención de los coeficientes de transferencia de calor. A continuación se describe dicha secuencia de cálculo:

1. Temperaturas de lectura. Además de las temperaturas que registran los termómetros del pasteurizador, se hizo necesario la toma de otros datos, quedando como sigue:

- a) Temperatura del huevo entero líquido a la entrada del equipo [=] °C.
- b) Temperatura del huevo entero líquido a la salida de la etapa de mantenimiento [=] °C.
- c) Temperatura del agua caliente al entrar al equipo [=] °C.
- d) Temperatura del huevo entero líquido a la salida del equipo [=] °C.
- e) Temperatura del agua fría a la entrada del equipo [=] °C.
- f) Temperatura del agua helada a la entrada del equipo [=] °C.
- g) Temperatura del agua helada a la salida del equipo [=] °C.
- h) Flujo volumétrico del agua de calentamiento [=] ml/s.
- i) Flujo volumétrico del huevo entero líquido [=] ml/s.
- j) Flujo volumétrico del agua fría [=] ml/s.
- k) Flujo volumétrico del agua helada [=] ml/s.

De acuerdo al arreglo anterior se muestran los datos obtenidos de la experimentación en las tablas 6.3., 6.4. y 6.5.

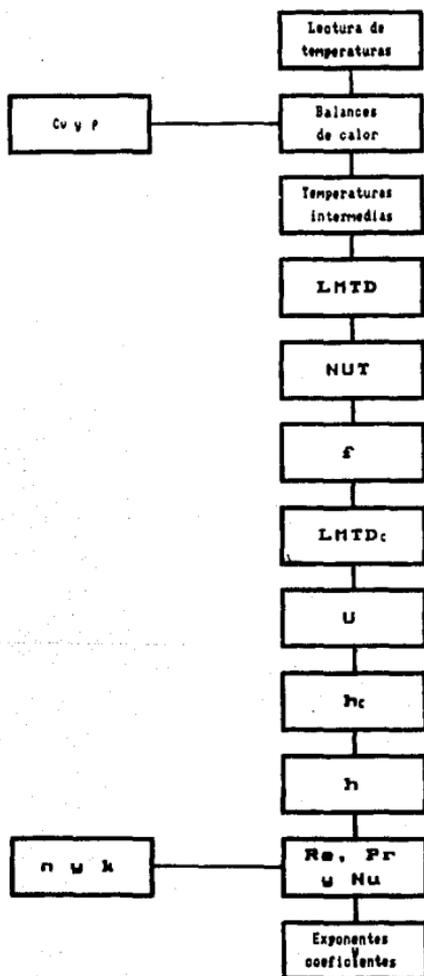


FIG. 6.1 SECUENCIA DE CALCULO PARA LA OBTENCION DE COEFICIENTES DE TRANSFERENCIA DE CALOR Y ECUACION EMPIRICA QUE DESCRIBE SU PROCESO.

TABLA 6.3. TEMPERATURAS Y FLUJOS VOLUMETRICOS A UN FLUJO DE ALIMENTACION DE 47.5 ML/S.

M	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1	12	40	45	12	14	1	5	111.1	47.5	238.6	189.0
2	13	40	45	11	15	1	5	97.2	47.5	238.6	189.0
3	13	40	45	10	14	1	6	83.3	47.5	238.6	189.0
4	12	40	45	11	13	1	5	111.1	47.5	238.6	189.0
5	12	40	45	10	15	1	6	97.2	47.5	238.6	189.0
6	12	40	45	10	15	1	6	83.3	47.5	238.6	189.0
7	12	40	45	10	15	1	6	111.1	47.5	238.6	189.0
8	12	40	45	10	15	1	6	97.2	47.5	238.6	189.0
9	12	40	45	11	14	1	6	83.3	47.5	238.6	189.0

TABLA 6.4. TEMPERATURAS Y FLUJOS VOLUMETRICOS A UN FLUJO DE ALIMENTACION DE 42.5 ML/S.

M	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1	12	40	45	11	10	1	7	111.1	42.5	238.6	189.0
2	13	40	45	12	11	1	6	97.2	42.5	238.6	189.0
3	13	40	45	11	11	1	6	83.3	42.5	238.6	189.0
4	11	41	45	10	10	1	6	111.1	42.5	238.6	189.0
5	12	41	45	11	11	1	6	97.2	42.5	238.6	189.0
6	12	40	45	11	11	1	6	83.3	42.5	238.6	189.0
7	12	41	45	11	11	1	6	111.1	42.5	238.6	189.0
8	12	41	45	11	11	1	6	97.2	42.5	238.6	189.0
9	12	40	45	11	11	1	6	83.3	42.5	238.6	189.0

TABLA 6.5. TEMPERATURAS Y FLUJOS VOLUMETRICOS A UN FLUJO DE ALIMENTACION DE 37.5 ML/S.

M	a	b	c	d	e	f	g	h	i	j	k
1	12	40	45	11	10	1	6	111.1	37.5	238.6	189.0
2	12	40	45	11	10	1	6	97.2	37.5	238.6	189.0
3	13	40	45	11	10	1	6	83.3	37.5	238.6	189.0
4	13	40	45	11	11	1	6	111.1	37.5	238.6	189.0
5	12	40	45	10	10	1	6	97.2	37.5	238.6	189.0
6	11	40	45	10	10	1	6	83.3	37.5	238.6	189.0
7	12	40	45	10	11	1	6	111.1	37.5	238.6	189.0
8	12	40	45	10	11	1	6	97.2	37.5	238.6	189.0
9	12	40	45	11	10	1	6	83.3	37.5	238.6	189.0

2. ρ y ρ . Estos valores se determinaron experimentalmente, detallándose su desarrollo en el anexo 1. Los valores obtenidos de estas propiedades termofísicas se enlistan a continuación:

$$C_p = 0.8144 \text{ cal/ml}\cdot\text{C}$$

$$\rho = 1.0329 \text{ g/ml}$$

3. Balances de calor y temperaturas intermedias. Se establecieron los balances de calor que se llevan a cabo en el equipo, para poder conocer las temperaturas intermedias del proceso:

- Nomenclatura.

a = Temperatura del huevo entero líquido a la entrada del equipo [=] °C.

b = Temperatura del huevo entero líquido a la salida de la etapa de mantenimiento [=] °C.

c = Temperatura del agua caliente al entrar al equipo [=] °C.

d = Temperatura del huevo entero líquido a la salida del equipo [=] °C.

e = Temperatura del agua fría a la entrada del equipo [=] °C.

f = Temperatura del agua helada a la entrada del equipo [=] °C.

g = Temperatura del agua helada a la salida del equipo [=] °C.

α = Flujo volumétrico del agua caliente x C_v del agua caliente [=] cal/s·C.

β = Flujo volumétrico del huevo entero líquido x C_v del huevo entero líquido [=] cal/s·C.

γ = Flujo volumétrico del agua fría x C_v del agua fría [=] cal/s·C.

δ = Flujo volumétrico del agua helada x C_v del agua helada [=] cal/s·C.

R = Etapa de retención.

C = Etapa de calentamiento.

D = Etapa de precalentamiento.

P = Etapa de preenfriamiento.

E = Etapa de enfriamiento.

A = Temperatura de entrada del fluido caliente a la etapa.

A_s = Temperatura de salida del fluido caliente de la etapa.

A' = Temperatura de entrada del fluido frío a la etapa.

A'_s = Temperatura de salida del fluido frío de la etapa.

- Balances de calor.

Etapa de calentamiento

$$\alpha(C_s - C) = -\beta(C'_s - C') \quad (1)$$

Etapa de preenfriamiento

$$\beta(P_s - P) = -\gamma(P'_s - P') \quad (2)$$

Etapa de enfriamiento

$$\beta(E_s - E) = -\delta(E'_s - E') \quad (3)$$

Etapa de precalentamiento

$$(D_s - D) = -(D'_s - D) \quad (4)$$

Calor cedido al huevo entero líquido

$$\beta D_s - \alpha C_s = \beta D' + 2\beta E_s - \alpha C \quad (5)$$

Considerando que la temperatura de salida de una etapa es igual a la temperatura de entrada de la siguiente, se tiene:

$$a = D' \quad C' = ?$$

$$b = C'_s = R' = R'_s = D \quad C_s = ?$$

$$c = C = R = R_s \quad D_s = ?$$

$$d = E_s \quad E = ?$$

$$e = P' \quad P'_s = ?$$

$$f = E'$$

$$g = E'_s$$

$$E = P_s$$

$$P = D_s$$

Sustituyendo las equivalencias y despejando las incógnitas de las ecuaciones (1), (2), (3), (4) y (5); se obtiene un sistema de cinco ecuaciones con cinco incógnitas:

$$\beta C' - \alpha C_s - \beta C'_s + \alpha C = 0 \quad (6)$$

$$\beta E - \beta D_s + \gamma P' - \alpha - \gamma P = 0 \quad (7)$$

$$\delta E' - \alpha - \beta E - \delta E' + \beta E_s = 0 \quad (8)$$

$$D_s + C' - C' - \alpha - D' = 0 \quad (9)$$

$$\beta D_s - \alpha C_s - \beta D' - 2\beta E_s + \alpha C = 0 \quad (10)$$

Resolviendo este sistema de ecuaciones por el método de Gauss-Jordan, se obtiene:

$$D_s = E_s + D'$$

$$E = (\delta E' - \alpha - \delta E' + \beta E_s) / \beta$$

$$P' = (\beta D' + \delta E' + \gamma P' - \delta E' - \alpha) / \gamma$$

$$C' = C' - E_s$$

$$C_s = (\alpha C - \beta E_s) / \alpha$$

4. LMTD. Una vez que se conocieron las temperaturas de cada una de las etapas, se procedió al cálculo de la diferencia media logarítmica de temperatura (LMTD), de acuerdo a la relación:

$$LMTD = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2 / \Delta T_1)}$$

5. NUT. El número de unidades de transferencia (NUT) se calculó de acuerdo a la relación:

$$NUT = \frac{\Delta T_{\text{huevo}}}{LMTD}$$

6. f. El factor de corrección debido al tipo de intercambiador, la geometría y el arreglo del paso del flujo (1/1 en las etapas de calentamiento, preenfriamiento y enfriamiento), se determinó gráficamente de acuerdo con la fig. 3.10. Las características del equipo, así como el arreglo del paso del flujo se muestra en el anexo 2.

7. LMTD_c. El cálculo de esta se realizó multiplicando el valor de la LMTD por el factor de corrección f.

$$LMTD_c = LMTD(f)$$

8. U. El coeficiente global de transferencia de calor se calculó en base la igualdad:

$$U = Q / (A) LMTD_c$$

Donde:

U = Coeficiente global de transferencia de calor
[=] cal/cm² s °C

T = Valor deciso por el fluido caliente [=] cal/s

A = Area de transferencia de calor [=] cm²

LMTD_c = LMTD corregida [=] °C

Los datos obtenidos se presentan en la tabla 6.6. y su analisis estadistico en la tabla 6.7.

TABLA 6.6. COEFICIENTES GLOBALES DE TRANSFERENCIA DE CALOR (CAL/CM²S°C) A DIFERENTES FLUJOS VOLUMETRICOS DE ALIMENTACION (A) Y DE AGUA DE CALENTAMIENTO (B) EN VARIAS ETAPAS (C).

A (ml/s)	B (ml/s)	Etapa	Repeticiones			
			1	2	3	
47.5	111.1	C	0.0298	0.0284	0.0266	
		P	0.0081	0.0068	0.0104	
	57.2	E	0.0175	0.0189	0.0207	
		C	0.0289	0.0271	0.0271	
	83.3	P	0.0079	0.0108	0.0108	
		E	0.0187	0.0231	0.0231	
42.5	111.1	C	0.0281	0.0281	0.0299	
		P	0.0101	0.0108	0.0121	
	97.2	E	0.0231	0.0231	0.0217	
		C	0.0247	0.0268	0.0285	
	83.3	P	0.0138	0.0119	0.0105	
		E	0.0228	0.0218	0.0206	
	37.5	111.1	C	0.0267	0.0267	0.0304
			P	0.0092	0.0105	0.0105
		E	0.0194	0.0206	0.0206	
37.5	111.1	C	0.0263	0.0263	0.0263	
		P	0.0096	0.0105	0.0105	
	97.2	E	0.0206	0.0206	0.0206	
		C	0.0214	0.0214	0.0201	
	83.3	P	0.0105	0.0101	0.0115	
		E	0.0193	0.0193	0.0204	
	37.5	111.1	C	0.0205	0.0205	0.0218
			P	0.0105	0.0110	0.0115
		E	0.0193	0.0204	0.0204	
37.5	83.3	C	0.0233	0.0299	0.0223	
		P	0.0097	0.0119	0.0105	
	E	0.0193	0.0204	0.0193		

TABLA 6.7. ANDEVA DE U A DIFERENTES FLUJOS DE ALIMENTACION (A) Y DE AGUA DE CALENTAMIENTO (B) EN VARIAS ETAPAS (C).

Fuente de variación	SC	gl	CM	RV	NS $\alpha=0.01$	NS $\alpha=0.05$
A	0.00007	2	0.000035	18.9	as	as
B	0.00001	2	0.000005	2.7	ss	ss
C	0.00209	2	0.001045	564.3	as	as
A-B	0.00003	4	0.000015	8.1	as	as
A-C	0.00134	4	0.000335	180.9	as	as
B-C	0.00123	4	0.000308	166.3	as	as
A-B-C	0.00467	8	0.000584	315.3	as	as
Error	0.00010	54	0.000002			
Total	0.00954	80				

as = altamente significativo. ss = sin significancia.

En la evaluación del coeficiente global de transferencia de calor (U), se encuentra estadísticamente que la mayor influencia es debida a las diferentes etapas del intercambiador por las que atraviesa el fluido; seguida del efecto causado por el flujo de alimentación; mientras que para el efecto del flujo de agua de calentamiento no se aprecia ningún efecto significativo.

La combinación de los efectos nos indica que el tratamiento debido al flujo de alimentación-flujo de agua de calentamiento, presenta diferencias significativas; en tanto que los tratamientos flujo de alimentación-etapas y flujo de agua de calentamiento-etapas, presentan diferencias altamente significativas. Además de que el efecto combinado de los tres factores influye de manera altamente significativa.

En la gráfica 6.3., se puede apreciar que el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor (U), con respecto al flujo de alimentación es semejante a una parábola y que aumenta conforme se incrementa el flujo volumétrico de alimentación. Esto se explica por el incremento que sufre el número de Reynolds, debido al aumento del flujo de alimentación, ocasionando una mayor turbulencia en el fluido y por tanto origina una mayor transferencia de calor.

En la gráfica 6.4. se presenta el comportamiento del coeficiente global de transferencia de calor (U) con respecto a la temperatura, la cual representa la temperatura media de cada etapa. Se observa un

comportamiento no esperado, pero se puede explicar debido a que no es la temperatura la principal determinante en el coeficiente global, sino los gradientes de temperaturas que se originan en dichas etapas, además de los distintos números de Reynolds que originan los flujos de los servicios. Esta misma situación se ve reflejada al obtener los valores del coeficiente convectivo del huevo entero líquido, como se verá más adelante.

9. h. Se calculó el coeficiente de película del agua en base a la relación que propone Bounapane (1963):

$$h = 0.2536 (K/D_e) (Re^{0.65}) (Pr^{0.4})$$

donde:

- h = Coeficiente de película [=] cal/cm² s °C
- K = Conductividad térmica [=] cal/s cm °C
- D_e = Diámetro equivalente = 2b [=] cm
- b = Espaciamento entre placas = 0.3048 cm
- Re = Número de Reynolds = $4vp/nD_e\mu$
- v = Flujo volumétrico [=] ml/s
- ρ = Densidad [=] g/ml
- μ = Viscosidad [=] g/cm s
- Pr = Número de Prandtl = $Cp\mu/K$
- Cp = Calor específico [=] cal/g °C

10. Una vez que se obtuvo el valor de h, se procedió al cálculo del coeficiente de película del huevo entero líquido (h₁) de la siguiente manera:

$$h_1 = 1 / [(1/U) - (\Delta x/K) - (1/h)]$$

donde:

- h₁ = Coeficiente de película del huevo [=] cal/cm² s °C
- Δx = Espesor de la placa = 0.05 cm
- K = Conductividad de la placa = 0.03896 cal/s cm °C

Los datos obtenidos a partir de los valores medios del coeficiente global de transferencia de calor (U) se presentan en la tabla 6.8., cabe mencionar que las etapas son sustituidas por la media de sus temperaturas; siendo 4°C, para la etapa de enfriamiento; 13°C, para la etapa de preenfriamiento y 43°C, para la etapa de

calentamiento.

TABLA 6.8. COEFICIENTES DE PELICULA DE HUEVO ENTERO LIQUIDO (CAL/CM²S*°C) A DIFERENTES FLUJOS VOLUMETRICOS DE ALIMENTACION (A), DE AGUA DE CALENTAMIENTO (B) Y TEMPERATURAS MEDIAS (C).

A (ml/s)	B (ml/s)	Temperaturas medias (°C)		
		4	13	43
47.5	111.1	0.0197	0.0085	0.0299
	97.2	0.0225	0.0100	0.0293
	83.3	0.0236	0.0112	0.0305
42.5	111.1	0.0266	0.0124	0.0281
	97.2	0.0210	0.0103	0.0296
	83.3	0.0214	0.0104	0.0278
37.5	111.1	0.0205	0.0109	0.0219
	97.2	0.0208	0.0112	0.0218
	83.3	0.0205	0.0109	0.0266

La mayor parte de la resistencia al flujo de calor se encuentra en la película que se encuentra cercana a la interfase líquido-sólido que se encuentra en la pared; por lo tanto, el adelgazamiento debido al flujo y al cambio de viscosidad por la temperatura, favorecen la transferencia de calor. Esto es, el coeficiente convectivo se incrementa con el aumento de la temperatura.

El comportamiento del coeficiente de película del huevo con respecto a la temperatura se representa en la gráfica 6.5.

11. n y k_p . Estos parámetros reológicos se evaluarán experimentalmente, detallándose su desarrollo en el anexo 1.

$$n = 0.9551$$

$$k = -0.0007T + 0.0689 \text{ [g/cm}^2\text{]}^{-n}$$

12. Re , Pr y Nu . Se procedió a evaluar los números adimensionales para los cálculos de convección de acuerdo a las relaciones propuestas por Skelland (1967):

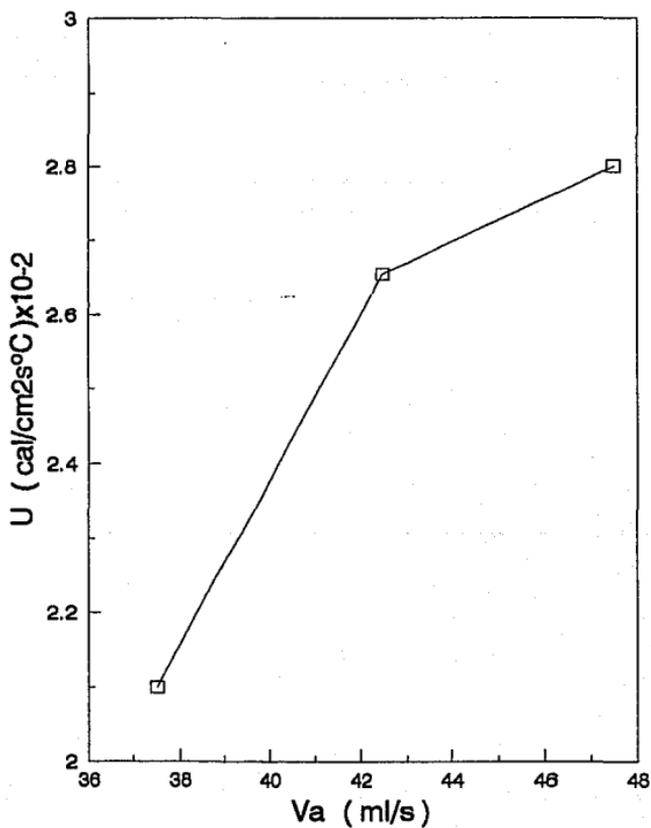
$$Re = [B(D_p)^n (u)^{2-n} (\rho) (n/6n+2)^n] / k$$

$$Pr = [Cpk(u/D_p)^{n-1} (6n+2/n)^n] / BK$$

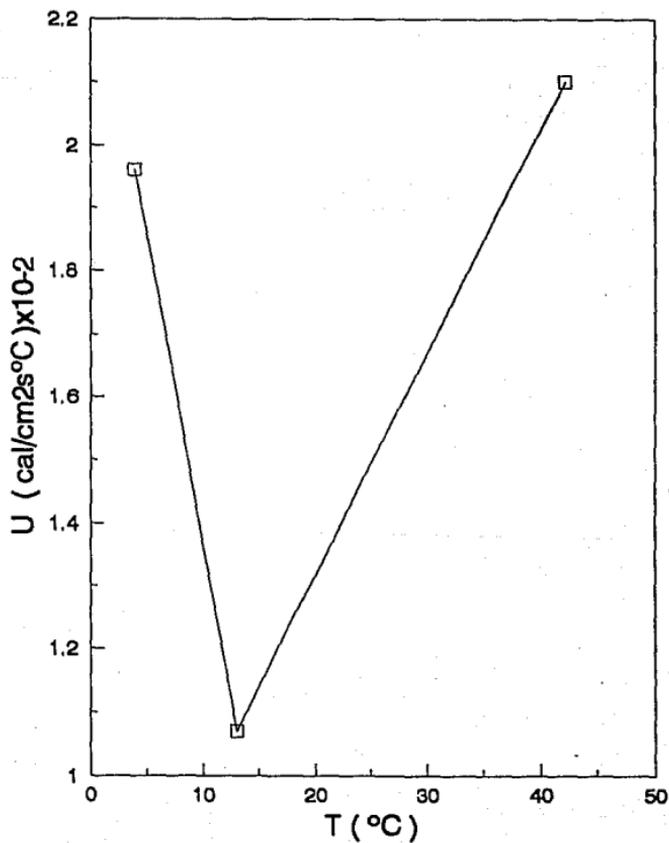
$$Nu = h_p D_p / K$$

donde:

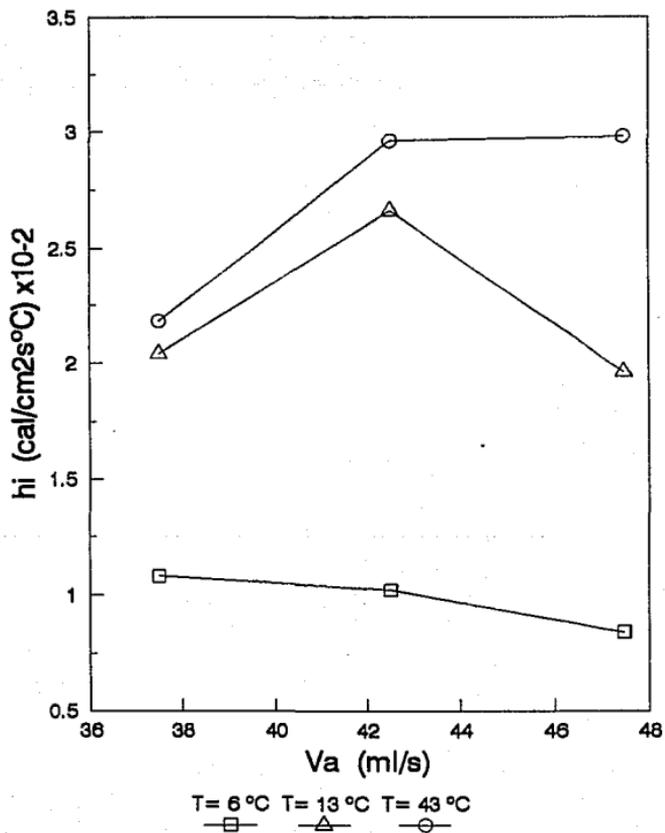
GRAF. 6.3. COMPORTAMIENTO TIPO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR (U) A DIFERENTES FLUJOS DE ALIMENTACION.



GRAF. 6.4. COMPORTAMIENTO TIPO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR (U) A DIFERENTES TEMPERATURAS.



GRAF. 6.5. COEFICIENTE DE PELICULA DE HUEVO ENTERO LIQUIDO A DIFERENTES TEMPERATURAS.



D_e = Diámetro equivalente = $2b$ [=] cm
 b = Espaciamiento entre placas = 0.3048 cm
 n = Índice de comportamiento al flujo = 0.9551
 k = Índice de consistencia [=] $g/cm \ s^{1-n}$
 $= -0.0007T + 0.0689$
 T = Temperatura [=] °C
 u = velocidad promedio = v/A
 v = Flujo volumétrico [=] ml/s
 A = Área transversal del equipo = 4.16 cm^2
 ρ = Densidad = 1.0329 g/ml
 C_p = Calor específico = $0.7885 \text{ cal/g } ^\circ\text{C}$
 K = Conductividad térmica = $0.0011 \text{ cal/s cm } ^\circ\text{C}$
 h_f = Coeficiente de película [=] $cal/cm^2 \ s \ ^\circ\text{C}$

El resultado del cálculo de los números adimensionales se presenta en la tabla 6.9.

TABLA 6.9. NUMEROS ADIMENSIONALES A DIFERENTES FLUJOS VOLUMETRICOS DE ALIMENTACION (A) Y TEMPERATURAS MEDIAS (B).

A (ml/s)	Etapa	Repeticiones		
		Re	Pr	Nu
47.5	4	134.69	38.26	12.16
	13	148.88	34.62	5.49
	43	229.46	22.46	16.57
42.5	4	119.91	38.45	12.00
	13	132.54	34.79	6.11
	43	204.28	22.57	15.79
37.5	4	105.21	38.67	11.41
	13	116.29	34.98	6.10
	43	179.24	22.70	12.99

13. Con la información recabada se procedió a linealizar a través de logaritmos a las relaciones de Nu, Pr y Re, y se les aplicó una regresión múltiple con el fin de conocer los exponentes y coeficientes de dicha relación:

$$Nu = 52.35 Re^{0.1973} Pr^{-0.7632}$$

Los coeficientes y exponentes encontrados en la ecuación que describe la transferencia de calor, se deben a la geometría y configuración de las placas del intercambiador, así como al comportamiento reológico del fluido tratado; el coeficiente de regresión es de 0.9960.

$$Nu = 52.35 Re^{0.1973} Pr^{-0.7632}$$

Los coeficientes y exponentes encontrados en la ecuación que describe la transferencia de calor, se deben a la geometría y configuración de las placas del intercambiador, así como al comportamiento reológico del fluido tratado; el coeficiente de regresión es de 0.9960.

**VII. CONCLUSIONES
Y RECOMENDACIONES.**

De acuerdo con los resultados obtenidos en la experimentación, se puede asegurar que la estabilidad del huevo entero líquido se ve reducida con el incremento de la temperatura de tratamiento, se incrementa con un aumento en el valor del pH y aumenta con la dilución con agua.

El huevo entero líquido resiste una mayor temperatura de tratamiento a un pH = 7.5 y a una dilución con agua del 20%. Con un pH = 7.5, el huevo líquido, ya sea diluido o sin diluir, resiste el tratamiento térmico que garantiza la destrucción de la salmonella. A un pH = 6.5, sólo a la temperatura de 70°C, no resiste el tratamiento térmico. En cambio a un pH = 5.5, sólo con una dilución al 20% y por abajo de los 53°C se puede garantizar la destrucción de la *Salmonella* sin desnaturalizar la ovoalbúmina.

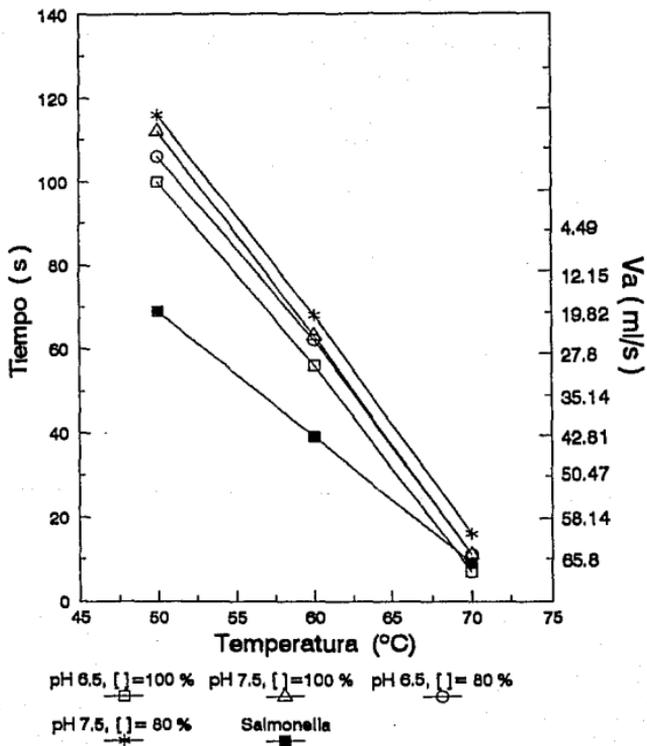
Los coeficientes globales de transferencia de calor, incrementarán su valor al aumentar el flujo volumétrico de alimentación y no ocurre así con el flujo volumétrico de agua de calentamiento, ya que este sólo influye directamente en la etapa de calentamiento.

Las correlaciones empíricas existentes para el agua no son válidas para el huevo entero líquido; debido a que no presenta el comportamiento reológico del agua, así como su viscosidad, además de la conformación geométrica de las placas y sus rugosidades. Es así que se encontró la ecuación que describe la transferencia de calor en el huevo entero líquido a través del intercambiador de placas Alfa-laval P-20:

$$Nu = 52.36 Re^{0.1978} Pr^{-0.7632}$$

Las condiciones de operación y acondicionamiento, para la pasteurización de huevo entero líquido se presentan en la gráfica 7.1; donde se presenta como límite inferior de operación la curva de destrucción de la *Salmonella* y como límite superior cada una de las curvas de destrucción de la ovoalbúmina.

GRAF. 7.1. CONDICIONES DE OPERACION EN LA PASTEURIZACION DE HUEVO ENTERO LIQUIDO EN UN INTERCAMBIADOR ALFA-LAVAL 1-20.



Cabe aclarar, finalmente, que la modificación (aumento) al pH del huevo, sólo debe hacerse cuando la pasteurización forme parte de un paso intermedio en el proceso de secado, ya que si se trata como un procesamiento terminal, el huevo presentará cambios en su coloración natural. También se recomienda que la dilución se use sólo cuando se pretenda obtener huevo en polvo, como producto final; ya que la adición de agua puede disminuir las propiedades espumantes del huevo; además de no hacer diluciones más grandes que la empleada en este trabajo, debido a que ocasionaría un bajo rendimiento del producto en polvo.

VIII. BIBLIOGRAFIA.

1. Adams, J.P.; Simunovic, J. and Smith, K.L. 1984. Temperature histories in UHT indirect heat exchanger. *J. Food Sci.* 49:273-277.
2. Alarcón L., M.; García A., M.A.; León M., J.; López M., F. y Vázquez C., G. 1989. TRANSFERENCIA DE CALOR EN UN FLUIDO NO NEWTONIANO A TRAVES DE UN INTERCAMBIADOR DE PLACAS. L.E.M. IV. Ingeniería en Alimentos. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
3. Alfa-Laval. 1980. HTST. LIBRO DE INSTRUCCIONES. Laboratoire plant, Alfa-Laval.
4. Aris, R. 1973. ANALISIS DE REACTORES. Ed. Alhambra. 1a edición. Madrid, España.
5. Atkinson, B. 1986. REACTORES BIOQUIMICOS. Ed. Reverté. s/e. Barcelona, España.
6. Badui D., S. 1981. QUIMICA DE ALIMENTOS. Ed. Alhambra Mexicana. 2a. edición. México.
7. Ball, H.R. and Cotterill, D.J. 1971. Egg white catalase. 1. Catalytic reaction. *Poultry Sci.* 50:435-448.
8. Banwart, G.J. 1982. MICROBIOLOGIA BASICA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Bellaterra. Barcelona, España.
9. Baquero F., J. y Llorente M., V. 1983. EQUIPOS PARA LA INDUSTRIA QUIMICA Y ALIMENTARIA. Ed. Alhambra. 1a. edición. Madrid, España.
10. Batty, J.C. and Folkman, S.L. 1990. FUNDAMENTOS DE LA INGENIERIA DE ALIMENTOS. Ed. Cecsa. 1a. edición. México.
11. Bergquist, D.H. 1979. Sanitary processing of egg products. *J. Food Protec.* 42(7):591-595.
12. Birch, G.G. et Al. 1978. FOOD SCIENCE. Ed. Pergamon Press. 2a. edition. Oxford, England.
13. Blanco A., J. y Linarte L., R. 1978. DISEÑO DE REACTORES QUIMICOS. Ed. Trillas. 1a. edición. México.
14. Bodwell, C.E. 1977. EVALUATION OF PROTEINS FOR HUMANS. Avi Pub. Co. Inc. s/e. Westport, Connecticut, U.S.A.
15. Bounapane and Troup. 1963. Heat transfer design method for plate heat exchangers. *Chem. Engin. Prog.* 59(7):57-61.
16. Bower, W.F. 1976. MANEJO HIGIENICO DE VIVERES. Ed. Limusa. 1a. edición. México.
17. Brookfield. 1990. THE BROOKFIELD RHEOSET VISCOMETER. Manual No. M/88-131-A. Brookfield Engineering Laboratories, Inc. Stoughton, U.S.A.

18. Brennan, J.G.. 1980. LAS OPERACIONES DE LA INGENIERIA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Acribia. 2a. edición. Zaragoza, España.
19. Castellan, R.H. 1976. FISICOQUIMICA. Fondo Educativo Interamericano. 2a. edición. Mexico.
20. Charm. 1978. FUNDAMENTALS OF FOOD ENGINEERING. Avi Pub. Co. 2a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
21. Cheftel, J.C. 1983. INTRODUCCION A LA BIOQUIMICA Y TECNOLOGIA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Acribia. s/e. Zaragoza, España.
22. Chen, T.C. and Hsu, S.Y. 1981. Quality attributes of whole egg and albumen mixtures cooked by different methods. J. Food Sci. 46:984-986.
23. Cotterill, O.J.; Marion, W.W. and Naber, E.C. 1977. A nutrient re-evaluation of shell eggs. Pout. Sci. 56:1927-1934.
24. Croozier, Booth. 1964. Heat transfer in plate and frame exchanger. Chem. Eng. Prog. 60(8):43-45.
25. Cruz C., I. y Noguez C., P.A. 1989. EFECTO DEL COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN LA DESTRUCCION DE LA VITAMINA C COMO COMPONENTE TERMOLABIL EN UN ALIMENTO DEL TIPO PSEUDOPLASTICO. Tesis. Ingeniería en Alimentos. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
26. Cunningham, F.E. and Lineweaver, H. 1965. Stabilization of egg white proteins to pasteurizing temperatures above 60 °C. Food Technol. 19:1442-1447.
27. Daniel, W.W. 1984. BIOESTADISTICA. Ed. Limusa. 1a. edición. México.
28. Desrosier, N.W. 1985. ELEMENTOS DE TECNOLOGIA DE ALIMENTOS. Ed. Cecsá. 3a impresión. México.
29. Dixon, D.K. and Cotterill, O.J. 1981. Electrophoretic and chromatographic changes in egg yolk proteins due to heat. J. Food. Sci. 46:981-983,970.
30. Earle, R.L. 1988. INGENIERIA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Acribia. 2a. edición. Zaragoza, España.
31. FAO. Servicio de Ciencia y Política de la Alimentación. 1976. CONTENIDO EN AMINOACIDOS DE LOS ALIMENTOS Y DATOS BIOLOGICOS SOBRE LAS PROTEINAS. Dirección de Nutrición. FAO. 3a. edición. Malta.
32. Fennema, O.R. 1985. INTRODUCCION A LA CIENCIA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Reverté. s/e. Barcelona, España.
33. Flaschka, H.A. 1982. QUIMICA ANALITICA CUANTITATIVA. Ed. Cecsá. 8a. impresión. México.

34. Frazier, W.C. 1978. MICROBIOLOGIA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Acribia. 3a. edición. Zaragoza, España.
35. Garibaldi, J.A.; Donovan, J.W.; Davis, J.G. and Cimino, S.L. 1968. Heat denaturation of the ovomucin-lysozyme electrostatic complex a source of damage to the whipping properties of pasteurized egg white. *J. Food Sci.* 33:514-524.
36. Garibaldi, J.A.; Ijichi, K. and Bayne, H.G. 1969. Effect of pH and chelating agents on the heat resistance and viability of *Salmonella typhimurium* and *Salmonella senftenberg* 775 in egg white. *Appl. Microbiol.* 18:318-322.
37. Garibaldi, J.A.; Linewear, H. and Ijichi, K. 1969. Number of salmonellae in commercially broken eggs before pasteurization. *Poultry Sci.* 12:214-218.
38. Beankoplis, C.J. 1988. PROCESOS DE TRANSPORTE Y OPERACIONES UNITARIAS. Ed. Cecsá. 3a. impresión. México.
39. Graham, H.D. 1977. FOOD COLLOIDS. Avi Pub. Co. 2a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
40. Guthrie, R.K. 1980. FOOD SANITATION. Avi Pub. Co. 2a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
41. Hamid, S.M.; Swartzel, K.R. and Ball, H.R. 1984. Flow behavior of liquid whole egg during thermal treatments. *J. Food Sci.* 49:132-136.
42. Harper, J.C. 1979. ELEMENTS OF FOOD ENGINEERING. Avi Pub. Co. 2a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
43. Hart, F.L. y Fisher, H.J. 1984. ANALISIS MODERNO DE LOS ALIMENTOS. Ed. Acribia. 1a. edición. Zaragoza, España.
44. Hickson, D.W.; Dill, C.W.; Morgan, R.G.; Sweat, V.E.; Suter, D.A. and Carpenter, Z.L. 1982. Rheological properties of two heat-induced protein gels. *J. Food Sci.* 47:783-785, 791.
45. Hill, C.W. and Griger, D.L. 1980. Kinetics data: generation, interpretation and use. *Food Technol.* 34(2):56-66.
46. Hobbs, B.C. y Gilbert, R.J. 1978. HIGIENE Y TOXICOLOGIA DE LOS ALIMENTOS. Ed. Acribia. 2a. edición. Zaragoza, España.
47. Holman, J.P. 1984. METODOS EXPERIMENTALES PARA INGENIEROS. Ed. McGraw-Hill. 1a edición. México.
48. Holt, D.L.; Watson, M.A.; Dill, C.W.; Alford, E.S. and Diehl, K.C. 1984. Correlation of the rheological behavior of egg albumen to temperature, pH, and NaCl concentration. *J. Food Sci.* 49:137-141.

49. Hurley P., D. et Al. 1981. TECNICAS DE DISEÑO EXPERIMENTAL. Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán, Universidad Nacional Autónoma de México. México.
50. INEGI. 1991. XI CENSO GENERAL DE POBLACION Y VIVIENDA. Resumen General. Vol. II. Aguascalientes, México.
51. Jackson, B.W. and Troupe R.A. 1964. Laminar flow in a plate heat exchanger. Chem. Engin. Prog. 60(7):62-65.
52. Jamieson, M. and Jobber, P. 1975. MANEJO DE LOS ALIMENTOS. Vol. 2. Ed. Pax-México. 1a. edición. México.
53. Karmas, E. and Harris, R.S. 1987. NUTRITIONAL EVALUATION OF FOOD PROCESSING. Avi Pub. Co. 3a. edition. New York, U.S.A.
54. Kern, D.Q. 1974. PROCESS HEAT TRANSFER. Ed. McGraw-Hill. 2a. edition. Tokyo, Japan.
55. Labuza, T.P. and Riboh, D. 1982. Theory and application of Arrhenius kinetics to the prediction of nutrient losses in foods. Food Technol. 36(10):66, 68, 70, 72, 74.
56. Lawry, A.J. 1959. Plate-type heat exchangers (give increased heat flux) Chem. Engin. 6:89-93.
57. Lee, F.A. 1983. BASIC FOOD CHEMISTRY. Avi Pub. Co. 2a edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
58. Lehniger, A.L. 1981. BIOQUÍMICA. Ed. Omega. 2a. edición. Barcelona, España.
59. Lenz, K.T. and Lund, D.B.. 1980. Experimented procedures for determining destruction kinetics of food components. Food Tech. 34(2):S1-21.
60. Levenspiel, D. 1986. INGENIERIA DE LAS REACCIONES QUÍMICAS. Ed. Reverte. 2a. edición. Barcelona, España.
61. Loncin, M. and Larry, M.R. 1979. FOOD ENGINEERING. Academic Press. s/e. New York, U.S.A.
62. Longrée, K. and Blaker, G.G. 1972. TECNICAS SANITARIAS EN EL MANEJO DE ALIMENTOS. Ed. Pax-México. 1a. edición. México.
63. Lund, D. B. 1979. Effect of commercial processing on nutrients. Food Technol. 33(2):28, 32-34.
64. Manrique, J.A. 1981. TRANSFERENCIA DE CALOR. Ed. Harla. 1a. edición. México.
65. Marriot, N.B. 1985. PRINCIPLES OF FOOD SANITATION. Avi Pub. Co. 1a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
66. Masters, K. 1976. SPRAY DRYING. Ed. John Wiley and Sons. 2a edition. New York, U.S.A.

67. Matz, S.A. 1972. BAKERY TECHNOLOGY AND ENGINEERING. Avi Pub. Co. 2a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
68. McWilliams, M. 1968. FOOD FUNDAMENTALS. Ed. John Wiley and Sons. 4a. edition. New York, U.S.A.
69. Meyer, L.G. 1982. FOOD CHEMISTRY. Avi Pub. Co. 4a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
70. Monsey, J.B. and Jones, J.B. 1979. A simple enzymic test for monitoring the efficient thermal pasteurization of chicken egg-white. J. Food. Tech. 14(4):381-388.
71. Monsey, J.B. and Jones, J.M. 1981. Limitations in the use of an enzymic test for monitoring the thermal pasteurization of dried chicken egg-white. J. Food Technol. 16(4):445-446.
72. Mountney, G.J. 1976. POULTRY PRODUCTS TECHNOLOGY. Avi Pub. Co. 2a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
73. Moyes, F.J. and Takeballi, M.A. 1983. Microbial contamination of the fien's egg a rewiew. J. Food Protec. 46(12):1092-1098.
74. Ng, H; Garibaldi, J.A.; Ijichi, K. and Mihara, K.L. 1979. Pasteurization of salted whole egg inoculated with arizona or salmonella. Appl. Env. Microbiol. 37(6): 1091-1095.
75. Nickerson, J.T.R. and Ronsivalli, L.J. 1982. ELEMENTARY FOOD SCIENCE. Avi Pub. Co. 2a. edition. Westport, Connecticut, U.S.A.
76. Niewiarowicz, A.; Trojan, M.; Kijowski, J. and Kujawska-Biernat, B. 1980. Application of anticoagulants during pasteurization of egg white and liquid whole eggs. Arch. Beuflugelkd, Eur. Pout. Sci. Rev. Sci. Avicole Eur. 44(1):17-21.
77. Ostle, B. 1979. ESTADISTICA APLICADA. Ed. Limusa. 1a. edición. México.
78. Pelosi, H. 1974. Heat exchangers performance data, costs, applications. Technical report. s/r, s/p.
79. Perry and Chilton. 1982. MANUAL DEL INGENIERO QUIMICO. Ed. McGraw-Hill. 2a. edición. México.
80. Quintana, J.A. 1988. AVITECNIA. Ed. Trillas. 1a. edición. México.
81. Reed, G. 1975. ENZYMES IN FOOD PROCESSING. Academic Press. 2a. edition. New York, U.S.A.
82. Regenstein, J.M. and Regenstein, C.E. 1984. FOOD PROTEIN CHEMISTRY. Academic Press. s/e. Orlando, Florida, U.S.A.
83. Riemann, H. 1972. FOOD-BORNE INFECTIONS AND INTOXICATIONS. Academic Press. 2a. edition. New York, U.S.A.

84. Riveros, G.H. y Rosas, L. 1986. EL METODO CIENTIFICO APLICADO A LAS CIENCIAS EXPERIMENTALES. Ed. Trillas. 1a. edición. México.
85. Scholtyssek, S.; Seemann, G.; Philipp, W. and El-Bogdady, A. 1981. The age of the eggs and the pasteurization and their effects on the quality of whole egg. Arch. Geflügelkd. Eur. Poultry. Sci. Rev. Sci. Avicole Eur. 45(5):201-205.
86. Scheffler, W. C. 1981. BIODISTADISTICA. Fondo Educativo Interamericano. 2a. edición. México.
87. Sharma, S.C. 1979. Mathematical modeling of the viscoelastic characteristics of egg yolk. J. Food Sci. 44: 1123.
88. Shimada, K. and Matsushita, S. 1980. Thermal coagulations of egg albumen. J. Agric. Food Chem. 28:409.
89. Shuaib, A.C.A.; Beswick, G. and Tomlins, R.L. 1981. The thiocyanate ion (SCN-) content of eggs from hens (*Gallus domesticus*) fed on a diet containing rapeseed meal. J. Sci. Food Agric. 32:347-352.
90. Singh, R.P. and Heldman, D.R. 1984. INTRODUCTION TO FOOD ENGINEERING. Academic Press. s/e. Florida, U.S.A.
91. Skelland, A.H.P. 1967. NON-NEWTONIAN FLOW AND HEAT TRANSFER. Ed. John Wiley and Sons. 2a edition. New York, U.S.A.
92. Slusser, P. and Minton, A. 1960. Design of heat exchanger. Chem. Engin. Chem. 52(9):743-744.
93. Smith, J.M. 1984. INGENIERIA DE LA CINETICA QUIMICA. Ed. Cecca. 2a. impresión. México.
94. Smith, T and Tung, M.A. 1982. Comparison of formula methods for calculating thermal process lethality. J. Food Sci. 47:626-630.
95. Snedecor, G.W. y Cochran, W.G. 1981. METODOS ESTADISTICOS. Ed. Cecca. 8a. impresión. México.
96. Sonntag, H. and Strenge, K. 1987. COAGULATION KINETICS AND STRUCTURE FORMATION. Plenum Press. s/e. Germany Democratic Rep.
97. Stadelman, W.J. and Cotterill, O.J. 1973. EGG SCIENCE AND TECHNOLOGY. Avi Pub. Co. s/e. Westport, Connecticut, U.S.A.
98. Stuart, W. 1974. Analysis of high temperature, short time sterilization during laminar flow. J. Food Sci. 39:1047-1054.
99. Stumbo, C.R. 1973. THERMOBACTERIOLOGY IN FOOD PROCESSING. Academic Press. 2a. edition. New York, U.S.A.
100. Sugihara, T.F.; Ijichi, K. and Kline, L. 1966. Heat pasteurization of liquid whole egg. Food Technol. 20:1076.

101. Swartzel, K.R. 1982. Arrhenius kinetics as applied to product losses in ultra high temperature processing. *J. Food. Sci.* 47:1886-1890.
102. Tadmor, R. 1985. Corolating-disk, scraped-surface heat exchanger. *Food Technol.* 39(6):67-74.
103. Teixeira, A.A.; Dixon, J.R.; Zahradnik, J.W. and Zinmeister, G.E. 1969. Computer optimization of nutrient retention in the thermal processing of conduction heating foods. *Food Technol.* 23(6):848.
104. Thorner, M.E. and Manning, P.B. 1976. **QUALITY CONTROL IN FOOD SERVICE.** Avi Pub. Co. s/e. Westport, Connecticut, U.S.A.
105. Thatcher, F.S. y Clark, D.S. 1973. **ANALISIS MICROBIOLOGICO DE LOS ALIMENTOS.** Ed. Acribia. s/e. Zaragoza, España.
106. Titus, H.W. 1960. **ALIMENTACION CIENTIFICA DE LAS GALLINAS.** Ed. Acribia. 2a. edición. Zaragoza, España.
107. Torten, J. and Eisenberg, H. 1982. Studies on colloidal properties of whole egg magma. *J. Food Sci.* 47:1423-1428.
108. Valle, P. 1983. **PROCESAMIENTO TERMICO DE ALIMENTOS.** Departamento de Industrias Agrícolas, Universidad Autónoma de Chapingo, Texcoco, México.
109. Verson, A.H. and Troupe, R.A. 1965. Pressure drop studies in a plate heat exchanger. *Amer. Inter. Chem. Engin. J.* 11(3):487-491.
110. Walpole, R.E. y Myers, R.H. 1986. **PROBABILIDAD Y ESTADISTICA PARA INGENIEROS.** Ed. Interamericana. 2a. edición. México.
111. Watson, M.K. 1960. Flow characteristics. *Ind. Engin. Prog.* 52(9):733-744.
112. Welty, J.R. 1978. **TRANSFERENCIA DE CALOR APLICADA A LA INGENIERIA.** Ed. Limusa. 1a. edición. México.
113. Woodward, S.A. and Cotterill, D.J. 1983. Electrophoresis and Chromatography of heat-treated plain, sugared and salted whole egg. *J. Food Sci.* 48:501.
114. Ziegler, G.R. 1985. Thermal conductivity of liquid foods by the thermal comparator method. *J. Food Sci.* 50:1458-1461.

ANEXO 1.
DETERMINACION EXPERIMENTAL
DE LAS PROPIEDADES FISICAS
DEL HUEVO ENTERO LIQUIDO.

Densidad (ρ).

Material:

- Densímetro con un rango de temperatura de 20 a 24 °C.
- Huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.
- Probeta de 200 ml.

Procedimiento:

1. Se vertieron 200 ml de muestra en la probeta.
2. Se introdujo el densímetro en el seno de la muestra.
3. Se hizo girar el densímetro y se esperó a su estabilización.
4. El procedimiento se repitió 5 veces para su validación estadística, a una temperatura de 21.3 °C. Los resultados se anotan a continuación:

Muestra	Densidad (g/ml)
1	1.0330
2	1.0328
3	1.0328
4	1.0330
5	1.0330
\bar{x}	1.0329
s	0.0001

Resultado:

$$\rho = 1.0329 \text{ g/ml}$$

Calor específico (C_v).

Material:

- Calorímetro con resistencia térmica.
- Huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.
- Termómetro digital *Taylor*.
- Vaso de precipitado de 150 ml.

Procedimiento:

1. Se colocaron 200 ml de agua a 65 °C en el interior del calorímetro y se sostuvo esta temperatura con ayuda de la resistencia térmica.
2. Se pusieron 100 ml de agua a 25 °C en el vaso de precipitado y se acomodó en el interior del calorímetro y se tomó la temperatura del agua del vaso después de 180 s (3 min).
3. El procedimiento se repitió 5 veces para su validación estadística. Los resultados se anotan a continuación:

Muestra	T _o (°C)	T _f (°C)	ΔT (°C)
1	25.0	33.8	8.8
2	25.0	33.9	8.9
3	25.0	33.6	8.6
4	25.0	33.7	8.7
5	25.0	33.9	8.9
\bar{x}	-	-	8.78
s	-	-	0.13

$$CV = 1.48 \%$$

Resultado parcial:

$$\Delta T = 8.78 \text{ °C}$$

Balance de energía en el calorímetro:

$$Q_i = v_i C_{v_i} \Delta T_i$$

donde

Q = Calor transferido en el calorímetro [=] cal/s.

v_i = Flujo volumétrico = 100 ml/180 s = 0.5556 ml/s.

C_{v_i} = Capacidad calorífica del agua a 30 °C =
= 0.9944 cal/ml·°C (38).

ΔT_i = Gradiente de temperaturas en el agua = 8.78 °C.

$$\therefore Q = 4.8505 \text{ cal/s.}$$

4. El procedimiento se repitió para la muestra de huevo entero líquido, sólo que ya se conoce el flujo de calor. Los resultados se anotan a continuación:

Muestra	T ₀ (°C)	T _F (°C)	ΔT (°C)
1	25.0	35.5	10.5
2	25.0	35.9	10.9
3	25.0	36.1	11.1
4	25.0	35.1	10.1
5	25.0	36.0	11.0
x	-	-	10.72
s	-	-	0.41

CV = 3.82 %

Resultado parcial:

$$\Delta T = 10.72 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Balance de energía en el calorímetro:

$$Q = v_2 C_{v_2} \Delta T_2 \rightarrow C_{v_2} = Q / v_2 \Delta T_2$$

donde

Q = Calor transferido en el calorímetro = 4.8505 cal/s.

v₂ = Flujo volumétrico = 100 ml/180 s = 0.5556 ml/s.

C_{v₂} = Capacidad calorífica del huevo [=] cal/ml·°C

ΔT₂ = Gradiente de temperaturas en el huevo = 10.72 °C.

Resultado:

$$\therefore C_{v_2} = 0.8144 \text{ cal/ml}\cdot^\circ\text{C}$$

Constantes reológicas:

Índice de consistencia (k').

Índice de comportamiento al flujo (n').

Material:

- Baño termostático Brookfield EX-200.
- Cristalería.
- Huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.
- Viscosímetro Brookfield de cono y plato RV con interfase conectada a computador personal.

Procedimiento:

1. Se ajustó la temperatura de tratamiento (10°C) en el baño termostático y se hizo circular el agua por la cápsula del viscosímetro de cono y plato.
4. Se ingresaron las instrucciones de toma de lectura cada 30 segundos desde 140 a 240 rpm, en el modo *geometric* del programa *Progvisc*, en el computador personal que controla el viscosímetro de cono y plato.
5. Se depositó 0.5 ml de muestra en la cápsula del viscosímetro de cono y plato e inmediatamente se colocó en la columna de medición, para dar inicio simultáneamente al programa *Progvisc*.
6. Al finalizar la ejecución del programa, se solicitó al mismo el registro de los datos de tensor de esfuerzos (τ) contra velocidad de corte ($\dot{\gamma}$). Se repitió el procedimiento desde el punto 1, para las temperaturas de 25 y 40 °C, haciéndose por triplicado para poder validar los resultados estadísticamente. Las medias de los datos obtenidos se presentan en el siguiente cuadro:

Ω (rpm)	$\dot{\gamma}$ (s ⁻¹)	τ (dn/cm ²)		
		T (°C)		
		10	25	40
140	1050	47.7	39.0	29.7
160	1200	54.2	44.3	33.7
180	1350	62.1	49.6	37.7
200	1500	67.2	54.9	41.6
220	1650	73.6	60.1	45.6
240	1800	80.0	65.3	49.5

7. A los datos obtenidos se les linealizó a través de una gráfica log-log, de la cual se obtuvo el valor de la pendiente que equivale al índice de comportamiento al flujo (n') y el antilog de la ordenada al origen es igual al índice de consistencia (k'). Los valores de n' y k' se anotaron en cuadros separados para conocer su comportamiento con respecto a la temperatura, aplicando un análisis de varianza con

clasificación simple.

Indice de comportamiento al flujo (n') a diferentes temperaturas

Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)		
10	25	40
0.9550	0.9600	0.9480
0.9560	0.9590	0.9546
0.9555	0.9605	0.9475

De acuerdo al análisis estadístico:

Para $F_{0.99} = 10.90 \gg RV \Rightarrow$ No existen diferencias significativas entre las medias muestrales, por lo que se puede tomar un cualquier valor de n' .

Para $F_{0.95} = 5.14 \gg RV \Rightarrow$ No existen diferencias significativas entre las medias muestrales, por lo que se puede tomar un cualquier valor de n' .

Tabla ANDEVA de n' a diferentes temperaturas

Fuente	SC	g.l.	CM	RV
Temp.	0.0007	2	0.00035	4.38
Repet.	0.0005	6	0.00008	
Total	0.0012	8		

Indice de consistencia (k') a diferentes temperaturas

Temperaturas ($^{\circ}\text{C}$)		
10	25	40
0.0620	0.0490	0.0404
0.0628	0.0493	0.0398
0.0619	0.0490	0.0399

Tabla ANDEVA de k' a diferentes temperaturas

Fuente	SC	g.l.	CM	RV
Temp.	0.0007	2	0.00035	7.00
Repet.	0.0003	6	0.00005	
Total	0.0021	8		

De acuerdo al análisis estadístico:

Para $F_{0.99} = 10.90 \gg RV \rightarrow$ No existen diferencias significativas entre las medias muestrales.

Para $F_{0.95} = 5.14 \ll RV \rightarrow$ Existen diferencias, pero no son altamente significativas.

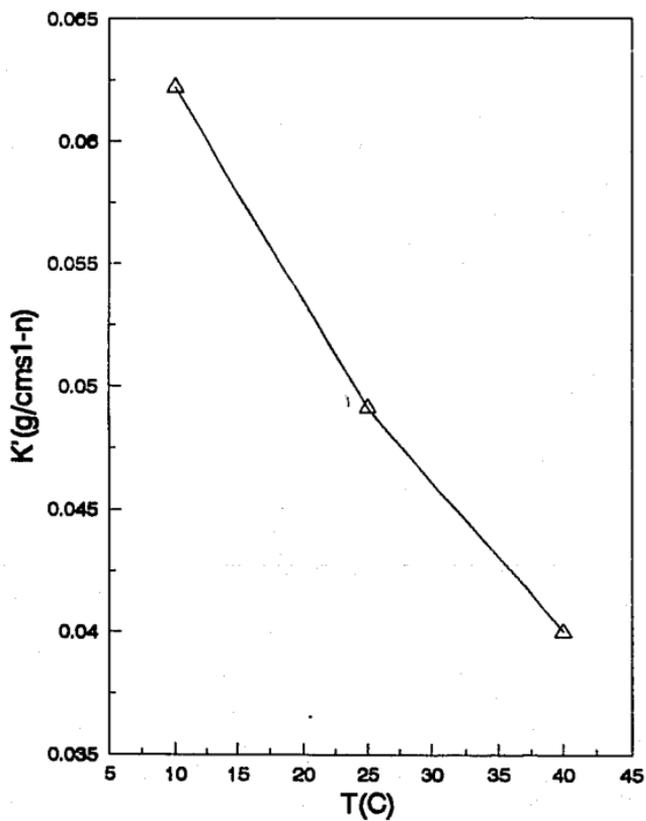
Con estos resultados se construyó la gráfica A.1., en donde se expone el comportamiento de k' con respecto a la temperatura; de aquí se deduce la ecuación que evalúa a k' .

Resultados: Para cualquier temperatura entre 10 y 40 °C.

$$k' = - 0.0007 T + 0.0689 \text{ [=] g/ca s}^{1-n}$$

$$n' = 0.9551$$

GRAF. A.1. VALORES DE K' A DIFERENTES TEMPERATURAS.



ANEXO 2.
CARACTERISTICAS DEL PASTEURIZADOR
ALFA LAVAL P-20.

El intercambiador de calor de placas usado en este trabajo es un pasteurizador de leche Alfa-laval modelo P-20, el cual presenta cinco secciones diferentes de intercambio de calor. En la figura A.2. se presenta el arreglo del flujo de este intercambiador.

I. Sección de mantenimiento.

Espesor de las placas = 0.05 cm

Número de placas = 10

Area de transferencia térmica = 2500 cm²

II. Sección de calentamiento.

Espesor de las placas = 0.05 cm

Número de placas = 8

Area de transferencia térmica = 1900 cm²

III. Sección de precalentamiento.

Espesor de las placas = 0.05 cm

Número de placas = 14

Area de transferencia térmica = 3700 cm²

IV. Sección de preenfriamiento.

Espesor de las placas = 0.05 cm

Número de placas = 10

Area de transferencia térmica = 2500 cm²

V. Sección de enfriamiento.

Espesor de las placas = 0.05 cm

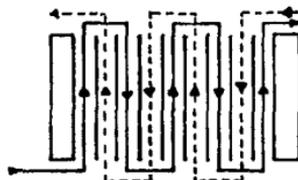
Número de placas = 10

Area de transferencia térmica = 2500 cm²

FIG. A.2. DIAGRAMA DEL ARREGLO DE FLUJO EN EL INTERCAMBIADOR.

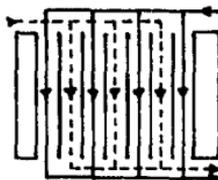
Etapa de mantenimiento:

———— Producto
 - - - - - Agua caliente



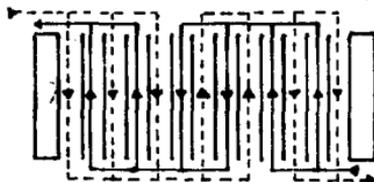
Etapa de calentamiento:

———— Agua caliente
 - - - - - Producto



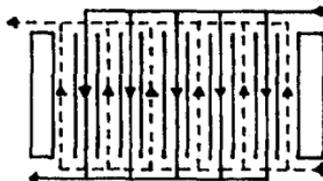
Etapa de precalentamiento:

———— Producto caliente
 - - - - - Producto frío



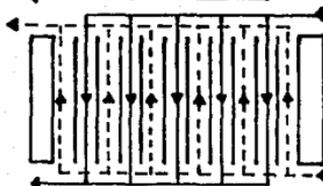
Etapa de preenfriamiento:

———— Producto
 - - - - - Agua fría



Etapa de enfriamiento:

———— Producto
 - - - - - Agua helada



ANEXO 3.
DETERMINACION DE LA DISTRIBUCION
Y TIEMPOS MEDIOS DE RESIDENCIA.

Material y equipo:

Acido clorhídrico al 1%.

Cristalería.

Cronómetro digital.

Fenolftaleína.

Hidróxido de sodio al 0.1%.

Huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.

Intercambiador de calor de placas (pasteurizador) Alfa-laval modelo P-20.

Jeringa hipodérmica.

Termómetros de mercurio.

Procedimiento:

1. Se colocaron 10 lt de la muestra en el tanque de retención a la entrada del pasteurizador.

2. Se abrieron las válvulas de líneas de servicio del equipo.

3. Se reguló el flujo volumétrico de agua de calentamiento a 400 lt/hr a una temperatura de 45°C.

4. Se evaluó el flujo volumétrico de alimentación A_1 a la salida del equipo, a una abertura mínima de la válvula de alimentación y se hizo circular el huevo entero líquido homogenizado y estabilizado.

5. Después de cinco minutos de circulación del fluido a través del pasteurizador, para estabilización del flujo; se inyectó el trazador, con ayuda de una jeringa hipodérmica.

6. Simultáneamente a la inyección del trazador, se procedió a la toma de muestras de 110 ml a la descarga del equipo.

7. A cada una de las muestras se le hizo una titulación con la solución de hidróxido de sodio al 0.1%.

8. Se repitió el procedimiento desde el punto 4, para los diferentes flujos volumétricos de alimentación, haciéndose por triplicado para poder validar los resultados estadísticamente. Las variaciones originadas se enlistan a continuación:

Tratamiento A_1 . Flujo volumétrico de alimentación = 102 lt/hr (28.33 ml/s).

Tratamiento A_2 . Flujo volumétrico de alimentación = 135 lt/hr (37.50 ml/s).

Tratamiento A₉. Flujo volumétrico de alimentación = 168 lt/hr
(46.67 ml/s).

9. Los datos que originó el tratamiento experimental se anotaron en las siguientes tablas con sus respectivos análisis estadísticos:

CONCENTRACION DE TRAZADOR (ML) EN HUEVO ENTERO LIQUIDO A LA SALIDA DEL PASTEURIZADOR CON FLUJO VOLUMETRICO DE 28.33 ML/S.

Muestra	t (s)	Repeticiones		
		1	2	3
1	3.8828	0	0	0
2	7.7656	0	0	0
3	11.6484	0	0	0
4	15.5312	0	0	0
5	19.4140	0	0	0
6	23.2968	0.1	0.1	0.1
7	27.1796	0.3	0.3	0.3
8	31.0624	0.6	0.5	0.5
9	34.9452	18.1	18.2	18.3
10	38.8280	0.5	0.5	0.5
11	42.7108	0.3	0.3	0.3
12	46.5936	0.1	0.1	0.1
13	50.4764	0	0	0
14	54.3592	0	0	0
15	58.2420	0	0	0
\bar{x}		34.9258 3.9938	34.9442 3.9198	35.1199 2.6096

CONCENTRACION DE TRAZADOR (ML) EN HUEVO ENTERO LIQUIDO A LA SALIDA DEL PASTEURIZADOR CON FLUJO VOLUMETRICO DE 37.50 ML/S.

Muestra	t (s)	Repeticiones		
		1	2	3
1	2.9333	0	0	0
2	5.8666	0	0	0
.
.
12	35.1996	0	0	0
13	38.1329	0.1	0.1	0.1
14	41.0662	0.3	0.3	0.3
15	43.9995	0.6	0.6	0.6
16	46.9328	18.3	18.2	18.3
17	49.8661	0.6	0.5	0.5
18	52.7994	0.1	0.2	0.2
19	50.4764	0	0.1	0
20	54.3592	0	0	0
21	58.2420	0	0	0
\bar{x}		46.8298	46.8880	46.8448
s^2		1.6126	2.1812	1.7132

CONCENTRACION DE TRAZADOR (ML) EN HUEVO ENTERO LIQUIDO A LA SALIDA DEL PASTEURIZADOR CON FLUJO VOLUMETRICO DE 46.67 ML/S.

Muestra	t (s)	Repeticiones		
		1	2	3
1	2.3570	0	0	0
2	4.7140	0	0	0
.
.
22	51.8540	0	0	0
23	54.2110	0.2	0.2	0.2
24	56.5680	0.7	0.6	0.7
25	58.9250	18.4	18.3	18.3
26	61.2820	0.6	0.6	0.6
27	63.6390	0.1	0.2	0.1
28	65.9960	0	0.1	0.1
29	68.3530	0	0	0
30	70.7100	0	0	0
31	73.0670	0	0	0
\bar{x}		58.8914	58.9604	58.9250
s^2		0.4829	1.0265	0.9440

La evaluación de los tiempos medios de residencias y su distribución a diferentes valores de flujo volumétrico de alimentación se presentan a continuación, a dichos datos se les aplicó un análisis de varianza con una sola clasificación y las tablas de dicho análisis se presenta enseguida.

TIEMPOS MEDIOS DE RESIDENCIA (EN SEGUNDOS) A DIFERENTES FLUJOS VOLUMETRICOS.

Repet.	Flujos volumétricos (ml/s)		
	28.33	37.50	46.67
1	34.9258	46.8298	58.8914
2	34.9442	46.8880	58.9604
3	35.1199	46.8448	58.9250

ANDEVA DE T A DIFERENTES FLUJOS VOLUMETRICOS.

Fuente de variación	SC	gl	CM	RV
Flujo volumétrico	858.9160	2	429.4580	95435.11
Error	0.0272	6	0.0045	
Total	858.9432	8		

DISTRIBUCION DE TIEMPOS MEDIOS DE RESIDENCIA (EN SEGUNDOS) A DIFERENTES FLUJOS VOLUMETRICOS.

Repet.	Flujos volumétricos (ml/s)		
	28.33	37.50	46.67
1	3.9938	1.6126	0.4829
2	3.9198	2.1812	1.0265
3	2.6096	1.7132	0.9440

ANDEVA DE σ^2 A DIFERENTES FLUJOS VOLUMETRICOS.

Fuente de variación	SC	gl	CM	RV
Flujo volumétrico	5.4475	2	2.7238	2.2734
Error	7.1886	6	1.1981	
Total	12.6361	8		

De acuerdo al análisis estadístico:

- Para el efecto del flujo volumétrico:

$F_{0.99} = 10.90 \ll RV \Rightarrow$ Se rechaza $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ y se acepta
 $H_A : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

$F_{0.95} = 5.14 \ll RV \Rightarrow$ Se rechaza $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ y se acepta
 $H_A : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Las medias muestrales presentan diferencias altamente significativas.

De acuerdo al análisis estadístico:

- Para el efecto del flujo volumétrico:

$F_{0.99} = 10.90 \gg RV \Rightarrow$ Se acepta $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ y se rechaza
 $H_A : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

$F_{0.95} = 5.14 \gg RV \Rightarrow$ Se acepta $H_0 : \mu_1 = \mu_2 = \mu_3$ y se rechaza
 $H_A : \mu_1 \neq \mu_2 \neq \mu_3$

Las medias muestrales no presentan diferencias significativas.

De acuerdo con los resultados estadísticos se puede construir la gráfica A.3. en donde se puede apreciar el comportamiento de los tiempos medios de residencia con respecto al flujo volumétrico.

El RTD se puede considerar constante; mientras que el tiempo medio de residencia varía de manera inversamente proporcional al flujo volumétrico de alimentación.

GRAF. A.3. TIEMPOS MEDIOS DE RESIDENCIA DE HUEVO ENTERO LIQUIDO EN LA ETAPA DE MANTENIMIENTO DE UN INTERCAMBIADOR ALFA-LAVAL P-20, A DIFERENTES FLUJOS DE ALIMENTACION.

