

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO

CARRERA
INGENIERÍA MECÁNICA

Trabajo de Titulación previo a la obtención de título de
Ingeniero Mecánico

TEMA
ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN
PRODUCTOS CÁRNICOS UTILIZANDO HORNOS A GAS

AUTORES
GUAYASAMIN CAIZA DIEGO ARMANDO
PINARGO OÑA RAÚL VINICIO

TUTOR
LUIS FERNANDO TOAPANTA RAMOS

Quito, Julio del 2017

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros Diego Armando Guayasamín Caiza y Raúl Vinicio Pinargo Oña, con documento de identificación N° 1716873151 y 1718098609 respectivamente, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación intitulado: **“ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PRODUCTOS CÁRNICOS UTILIZANDO HORNOS A GAS”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.



.....
Diego Armando Guayasamín Caiza
1716873151



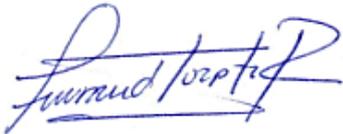
.....
Raúl Vinicio Pinargo Oña
1718098609

Quito, julio 2017

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el Proyecto de Titulación, “ANÁLISIS DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PRODUCTOS CÁRNICOS UTILIZANDO HORNOS A GAS” realizado por Diego Armando Guayasamín Caiza y Raúl Vinicio Pinargo Oña, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana, para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, julio de 2017



Luis Fernando Toapanta Ramos

CI. 1721113759

DEDICATORIA

La culminación del presente trabajo está dedicado en primer lugar a Dios por darme salud y sabiduría durante este largo proceso de formación, y enteramente a mi madre quien ha sido un claro ejemplo de lucha, que con sus valores y sacrificio me enseñó que un sueño solo se lo logra si se trabaja para alcanzarlo. Finalmente a mis hermanos y a cada una de las personas que me acompañaron de la mano siendo parte de esta gran aventura.

Vinicio

Dedico este trabajo a mi familia por su apoyo incondicional a cada momento, mi madre por ser un ejemplo de superación, a mi esposa e hijos por su apoyo en cada instante de mi vida.

En especial a ti mi querido hijo Remy por el corto tiempo que estuviste junto mí, sé que siempre te voy a llevar en mi corazón y vas a hacer mi guía en cada momento. Te amo mucho.

Diego

AGRADECIMIENTO

A la facultad de Ingeniería Mecánica, a sus docentes quienes formaron parte de este proceso formativo, transmitiendo sus experiencias y enseñanzas formando profesionales que se desempeñen en cualquier campo de la ingeniería.

A nuestros familiares y amigos, por el apoyo brindado en todo momento siendo parte fundamental de nuestro desarrollo y de manera especial al Ing. Fernando Toapanta por su acertada dirección, y el gran estímulo recibido para la realización de este proyecto.

ÍNDICE GENERAL

Cesión de derechos de autor	ii
Declaratoria de coautoría del docente tutor/a	iii
Dedicatoria	iv
Agradecimiento	v
Resumen	xvi
Abstract	xvii
Introducción	19
CAPÍTULO 1	20
ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PRODUCTOS CÁRNICOS	20
1.1 Estado del arte	20
1.2 Marco teórico y conceptual	23
1.2.1 Productos cárnicos	23
1.2.2 Cocción	25
1.3 Métodos de transferencia de calor	27
1.3.1 Conducción térmica	28
1.3.2 Convección térmica.....	29
1.3.3 Radiación térmica.....	29
1.3.4 Centro térmico.....	30
1.4 Clasificación de los hornos domésticos.....	30

1.5	Conclusiones del capítulo.....	31
CAPÍTULO 2.....		32
MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR		32
2.1	Propiedades físicas de los alimentos	32
2.1.1	Densidad (ρ).....	32
2.1.2	Calor específico (C_p)	32
2.1.3	Entalpia (H).....	33
2.1.4	Conductividad térmica (k).....	33
2.1.5	Difusividad térmica (α)	34
2.2	Propiedades térmicas de los alimentos	34
2.3	Mecanismos de transferencia de calor y masa	35
2.4	Coefficiente de transferencia de calor y masa	35
2.5	Medición de la penetración de calor.....	35
2.6	Mecanismos de transferencia de calor.....	36
2.7	Transferencia de calor por conducción en estado transitorio	36
2.7.1	Conducción de calor en paredes planas, cilíndricas y esféricas.....	37
2.7.2	Longitud característica	38
2.7.3	Número de Biot	38
2.7.4	Número de Fourier	39
2.7.5	Flujo de calor en estado transitorio	39
2.7.6	Solución aproximada analítica, numérica y gráfica	41

2.8	Convección natural.....	43
2.8.1	Número de Reynolds (Re).....	44
2.8.2	Número de Prandtl (Pr)	45
2.8.3	Número de Grashof (Gr)	45
2.8.4	Número de Rayleigh (Ra)	46
2.8.5	Número de Nusselt (Nu)	46
2.8.6	Coefficiente de expansión volumétrica	47
2.9	Superficie plana horizontal.....	47
2.10	Conclusiones del capítulo	49
CAPÍTULO 3.....		50
APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EN LOS PRODUCTOS CÁRNICOS		50
3.1	Cálculos térmicos de los productos cárnicos.....	50
3.2	Cálculos térmicos para la carne de cerdo	51
3.2.1	Coefficiente de convección natural para geometría plana horizontal.....	51
3.2.2	Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría plana	54
3.2.3	Flujo de calor en geometría plana	56
3.2.4	Coefficiente de convección natural para cilindro horizontal.....	58
3.2.5	Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría cilíndrica.....	61
3.2.6	Flujo de calor en geometría cilíndrica.....	62

3.2.7	Coefficiente de convección natural para esferas	64
3.2.8	Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría esférica	67
3.2.9	Flujo de calor en geometría esférica	68
3.3	Cálculos térmicos para la carne de pollo	71
3.3.1	Coefficiente de convección natural para geometría plana horizontal en la carne de pollo	71
3.3.2	Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría plana	72
3.3.3	Flujo de calor en geometría plana	74
3.3.4	Coefficiente de convección natural para cilindro horizontal.....	74
3.3.5	Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría cilíndrica.....	75
3.3.6	Flujo de calor en geometría cilíndrica.....	77
3.3.7	Coefficiente de convección natural para esferas	77
3.3.8	Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría esférica	79
3.3.9	Flujo de calor en geometría esférica	80
3.4	Conclusiones del capítulo.....	81
CAPÍTULO 4.....		82
EXPERIMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PRODUCTOS CÁRNICOS		82
4.1	Tiempo de precalentamiento del horno a gas	82

4.2	Resultados obtenidos para la carne de cerdo.....	83
4.2.1	Tiempo de calentamiento de la carne de cerdo	83
4.2.2	Tiempo de cocción de la carne de cerdo	83
4.2.3	Tiempo de cocción total para la carne de cerdo.....	84
4.3	Resultados obtenidos para la carne de pollo.....	85
4.3.1	Tiempo de calentamiento para la carne de pollo.....	85
4.3.2	Tiempo de cocción para la carne de pollo.....	86
4.3.3	Tiempo de cocción total para la carne de pollo.....	87
4.4	Conclusiones del capítulo.....	88
	CONCLUSIONES	89
	RECOMENDACIONES	90
	REFERENCIAS	91

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje del consumo de productos cárnicos	21
Figura 2. Procesos de cocción por calor seco, húmedo y por microondas	22
Figura 3. Consumo de pollo en América Latina	24
Figura 4. Métodos de transferencia de calor	28
Figura 5. Conducción de calor a través de una pared plana, cilíndrica y esférica	37
Figura 6. Convección natural	44
Figura 7. Condición inicial	51
Figura 8. Geometría plana dentro de la cámara de cocción.	54
Figura 9. Condición inicial	58
Figura 10. Geometría cilíndrica dentro de la cámara de cocción.....	61
Figura 11. Condición inicial.....	65
Figura 12. Geometría esférica dentro de la cámara de cocción	67
Figura 13. Condición inicial.....	71
Figura 14. Geometría plana dentro de la cámara de cocción	73
Figura 15. Condición inicial.....	74
Figura 16. Geometría cilíndrica dentro de la cámara de cocción.....	76
Figura 17. Condición inicial.....	78
Figura 18. Geometría esférica dentro de la cámara de cocción	79
Figura 19. Gráfica de la curva de precalentamiento del horno	82
Figura 20. Carne de cerdo temperatura ambiente	83

Figura 21. Tiempo de calentamiento de la carne de cerdo.....	83
Figura 22. Tiempo de cocción de la carne de cerdo.....	84
Figura 23. Curva total de cocción	85
Figura 24. Tiempo de calentamiento de la carne de pollo	86
Figura 25. Gráfica de cocción de la carne de pollo.....	86
Figura 26. Tiempo total de cocción del pollo	87

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla A 1. Características de la carne de pollo	2
Tabla A2. Características de la carne de cerdo	3
Tabla A 3. Tiempo y temperatura de cocción de la carne de res	4
Tabla A 4. Tiempo y temperatura de cocción en aves	5
Tabla A 5. Tiempo y temperatura de cocción de la ternera.	6
Tabla A 6. Tiempo y temperatura de cocción cerdo	6
Tabla A 7. Tiempo y temperatura de cocción de la ternera	7
Tabla A 8. Coeficientes usados para solución aproximada utilizados de un término de la conducción de calor unidimensional.....	9
Tabla de resultados 1. Valores de la convección natural para geometría plana	72
Tabla de resultados 2. Valores para geometría plana estado transitorio.....	73
Tabla de resultados 3. Valores de flujo de calor para geometría plana	74
Tabla de resultados 4. Valores de la convección natural para geometría cilíndrica.....	75
Tabla de resultados 5. Valores para geometría cilíndrica estado transitorio	76
Tabla de resultados 6. Valores de flujo de calor para geometría cilíndrica.....	77
Tabla de resultados 7. Valores de la convección natural para geometría esférica	78
Tabla de resultados 8. Valores para geometría esférica en estado transitorio	80
Tabla de resultados 9. Valores de flujo de calor para geometría esférica	80
Tabla de Resultados 10. Estadística de resultados de la carne de cerdo.....	85

Tabla de Resultados 11. Estadística de resultados de la carne de pollo	88
Tabla B 1. Número de Nusselt para las diferentes configuraciones geométricas del producto.....	48
Tabla B 2. Ecuaciones de propiedades térmicas para componentes de alimentos (- 40 °C ≤ t ≤ 150 °C)	8

INDICE DE ANEXOS

Anexo A. Tablas de características de los alimentos

Anexo B. Ecuaciones para las propiedades de los alimentos a diferentes temperaturas.

Anexo C. Valores de propiedades propias de los alimentos

Anexo D. Calor específicos de varios alimentos

Anexo E. Valores de tiempos y temperaturas

Anexo E. Valores de tiempos y temperaturas

Anexo F. Valor de emisividad de productos calientes

Anexo G. Propiedades del aire a 1 atm

Anexo H. Tablas de Heisler

Anexo I. Constantes para paredes planas, cilindros y esferas

Anexo J. Muestras del producto y toma de datos

Anexo K. Certificado de aprobación para el termómetro infrarrojo

RESUMEN

Es común que durante el procesamiento de cocción, especialmente en los productos cárnicos se sometan a distintos tratamientos térmicos, con el propósito de hacer más larga su vida de consumo.

En este proyecto se presentan los principales mecanismos de transferencia de calor, aplicables para diferentes productos. El objetivo es conocer los modelos más adecuados, durante el proceso de cocción, los principios que los rigen y algunas limitaciones que ocurren y que se generan para su pertinente análisis.

Por consiguiente los mecanismos de transferencia de calor utilizados para el análisis del comportamiento de los productos cárnicos durante la cocción son: la conducción, convección y radiación, con estos modelos y con ayuda de un horno a gas se determinó el tiempo de calentamiento que requiere el producto cárnico para estabilizar su temperatura de cocción, para el cálculo de los diferentes mecanismos de transferencia de calor se tomaron diferentes geometrías del producto, es así que tanto para el pollo como para la carne de cerdo se los analizó como geometrías planas, cilíndricas y esféricas, consiguiendo de esta manera obtener una cantidad de flujo de calor por conducción una vez encontrado el valor del coeficiente de conductividad térmica. Asimismo mediante el análisis por convección natural que se genera entre el producto y el aire caliente dentro de la cámara del horno con ayuda de tablas se determina el valor de coeficiente convectivo, así como de números adimensionales de Prandtl, Grashof, Rayleigh, entre otros, números que son indispensables para lograr determinar un valor para el flujo de calor por convección.

Palabras clave: transferencia de calor, productos cárnicos, conducción, convección natural.

ABSTRACT

It is common during the processing, especially meat foods undergo various heat treatments, in order to make longer life consumption. This project presents the main heat transfer mechanisms involved in the different heat treatments in food, which are applicable for different products. The aim of the review is to understand the mechanisms of heat transfer occurring during the cooking process, the principles that govern them and some limitations that occur that are generated for their analysis.

Therefore the mechanisms of heat transfer used for the analysis of the behavior of meat products during cooking: are conduction, convection and radiation, these models and using a gas oven heating time required was determined the Meat product to stabilize its cooking temperature, different product geometries were taken into account for the calculation of the different heat transfer mechanisms, so that both chicken and pork were analyzed as flat, cylindrical and spherical geometries, thereby achieving obtain an amount of conductive heat flow once found the coefficient of thermal conductivity. Also by analyzing natural convection is recorded between the product and the hot air inside the furnace chamber with the aid of tables the value of heat transfer coefficient and dimensionless Prandtl numbers, Grashof, Rayleigh determined, among others, Numbers that are indispensable to be able to determine a value for the heat flow by convection.

Key words: heat transfer, meat products, conduction, natural convection.

INTRODUCCIÓN

El presente proyecto comprende el estudio de los modelos de transferencia de calor presentes en la cocción de alimentos cárnicos, en Ecuador el consumo de productos cárnicos se ha ido incrementando con el pasar de los años, es así que, el porcentaje de consumo por año es del 8 %. Para su consumo es necesario que los productos cárnicos se sometan a diferentes tratamientos térmicos que modifiquen sus propiedades y que no solo los hagan aptos para su consumo sino que también sean agradables al momento de degustar, además de sus beneficios tales como proteínas, vitaminas y minerales esenciales para la salud. Es por esta razón que se genera la necesidad de realizar un estudio térmico del comportamiento de los productos cárnicos durante su cocción utilizando un horno a gas y mediante los modelos de transferencia de calor.

Los mecanismos de transferencia de calor con los que se puede realizar un análisis térmico en los alimentos son tres: conducción, convección y radiación.

La conducción ocurre, principalmente, cuando se presenta la transferencia de energía de una región de alta temperatura a una de baja temperatura. La convección es producida por un fluido que hace circular el calor por zonas a diferente temperatura, para su estudio hay que diferenciar entre convección forzada y convección natural, la primera se produce por el transporte de calor de un fluido caliente o frío, hacia un sólido con la ayuda de un medio externo por ejemplo una bomba o un ventilador, mientras que para el estudio de este proyecto se analizará la convección libre que es aquella que se produce por el contacto de un fluido caliente o frío, con una superficie sólida la cual causa una circulación debido a la diferencia de densidades resultado de variación de temperatura en el fluido. El análisis se lo realizará en un estado transitorio unidimensional, por la acumulación de energía en los alrededores en espacios cerrados por tal razón la radiación es depreciable,

Al final con la aplicación de estos métodos se podrá determinar el coeficiente de convección y la temperatura en el centro del producto.

CAPÍTULO 1

ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PRODUCTOS CÁRNICOS

En el presente capítulo se explicará en breves términos la definición de los diferentes modelos de transferencia de calor, los cuales ayudarán a entender de mejor manera el comportamiento del horno a gas, así como, también los diferentes productos cárnicos que en él se procesarán para su cocción y posterior consumo.

1.1 Estado del arte

El consumo de cárnicos a nivel mundial se divide de manera distinta, en países desarrollados su nivel de consumo no tiene incrementos considerables en los últimos años, mientras que los países en vías de desarrollo han elevado su consumo al doble comparados tan solo con unas décadas atrás esto se debe a la multiplicación de la población y al aumento en sus ingresos, algo muy similar ocurre con las preferencias al momento de escoger sus alimentos, lo que aumenta el requerimiento de productos cárnicos de origen animal [1].

En el Ecuador existe un promedio por consumidor de 54 kg por año de distintas variedades de carnes, siendo la Organización de las Naciones Unidas (ONU) que aconseja 80 kg al año de consumo de estas variedades [2].

El comercio afirma que, los datos compartidos en el primer Encuentro Internacional de Alimentos y Bebidas (Quito 12 de marzo), la carne de mayor consumo en el mundo es la carne de cerdo, seguida por la de pollo, pescado y res entre las preferencias de los consumidores a la hora de escoger sus alimentos de origen animal como muestra la figura 1. Datos que dan fe que los productos cárnicos son los preferidos por los consumidores locales como también de otros países y que sus exigencias a la hora de prepararlos son infinitas.

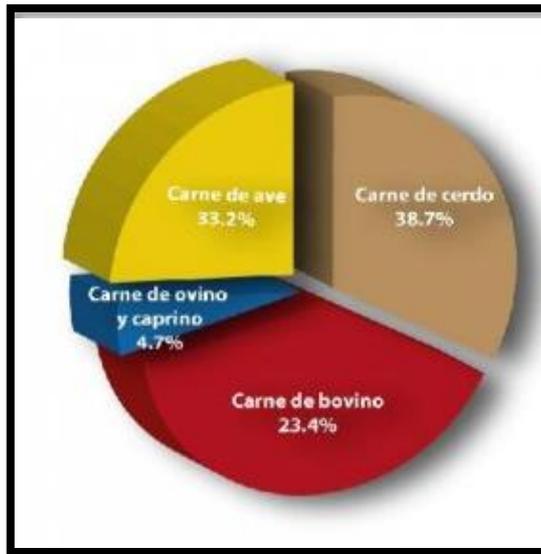


Figura 1. Porcentaje del consumo de productos cárnicos

Fuente: [3]

En el proceso de elaboración de productos cárnicos cocidos, la operación de cocción no solo puede afectar a las propiedades termo físicas del producto y a su textura, sino que, además, supone un consumo energético que supera en la mayor parte de casos el 60 % del consumo, del proceso total de elaboración de productos cárnicos cocidos [4]. La modelización de la operación de cocción de productos tiene gran interés para estudios de optimización del diseño y operación de los equipos utilizados para su elaboración y posterior consumo. Mediante la utilización de los modelos matemáticos es posible conocer la evolución de la temperatura en función del tiempo en el centro y la superficie del producto para evaluar así el tratamiento térmico aplicado en este efecto [4].

La cocción es una técnica que se emplea para modificar los distintos tipos de alimentos especialmente crudos al someterlos al calor cambiando su estructura para su consumo, de idéntica manera los modelos matemáticos de cocción dependerán de la transferencia de calor a la que estos estén expuestos.

Todos aquellos productos que están sometidos a este tipo de métodos cambian su textura para hacerlos más agradables al modificar su aspecto, cabe agregar que, la seguridad en salubridad es considerable ya que en el proceso de cocción se eliminan la gran mayoría de microorganismos propios de los cárnicos [5].

Existen diferentes medios para que la cocción de los alimentos pueda ser efectiva Kalmar [5] afirma que, los medios con los cuales los productos cárnicos podrían ser procesados son, calor seco, calor húmedo o por microondas, y los distintos métodos de cocción dependen de la vía de transferencia de calor a los que estén expuestos, es decir, que aquellos productos que estén expuestos a un calor seco experimentarán diferentes tipos de tratamiento por ejemplo; se someterán a una cocción por aire caliente, otros a llama abierta y otros a la incineración. No así aquellos productos que estén sometidos a un calor húmedo, los cuales experimentarán una cocción por hervido y escaldado diferenciándose del primero por su corto período de tiempo de contacto con el líquido caliente en el figura 2, se observan algunos de los diferentes métodos de cocción de los alimentos.



Figura 2. Procesos de cocción por calor seco, húmedo y por microondas

Fuente: [5]

1.2 Marco teórico y conceptual

1.2.1 Productos cárnicos

El Instituto Ecuatoriano de Normalización [6] afirma que, los productos cárnicos son preparados esencialmente con carne, en piezas, cortadas, picadas, menudencias comestibles de las especies de consumo masivo aves y caza autorizados, que se han sujeto en su proceso de elaboración a diferentes tratamientos tales como el calor, secado o maduración, ventilación, marinado, entre otros. En su transformación pueden incorporarse opcionalmente otros ingredientes que hacen de los productos cocidos agradables para su consumo entre ellos se puede citar condimentos, especias y aditivos autorizados.

Estos alimentos contienen altos niveles de proteínas, así como, elementos esenciales para la acción de todos los tejidos del organismo. Los productos cárnicos tiene una gran fuente de energía mediante la grasa que contienen, la cual es indispensable para la formación de membrana celular, para el sistema nervioso entre otros beneficios [7].

1.2.1.1 Consumo y producción de la carne de pollo

Por su parte el consumo de carne de pollo en los hogares ecuatorianos se ha incrementado de acuerdo con años pasados, durante los años 90 cada persona consumía alrededor de 7 kg al año, en lo posterior este indicador se modificó situándose en 35 kg según la Corporación Nacional de Avicultores del Ecuador (CONAVE). Datos de la Asociación de Fabricantes de Alimentos Balanceados refieren que la producción creció casi 5 veces desde 1990 hasta el 2011. Ya en el 2013, la producción alcanzó 230 millones de unidades en seis ciclos promedio de producción. Es así que la producción de aves sigue su línea de crecimiento, por lo tanto, las industrias productoras con el afán de proveer al mercado se han preocupado en adecuar sus galpones con ambientes controlados para una eficaz producción. El promedio de engorde de un ave para su consumo bordea los 42 días para tener un pollo de 2.2 kg [8].

Por su parte el Ecuador se ubica entre los 6 países de Latino América que más consume producción avícola tan solo detrás de países como Brasil, Argentina, Chile, México y Perú como se muestra en la figura 3.

Perú	42
Brasil	42
Argentina	40
Chile	37
Ecuador	35
México	31
Bolivia	30
Colombia	28
Uruguay	24

Figura 3. Consumo de pollo en América Latina

Fuente: [9]

1.2.1.2 Cualidades de la carne de pollo e importancia de su consumo

La carne de pollo tiene muchos beneficios nutritivos importantes para quien la consume, entre estos puede señalarse su bajo costo y su gran consumo, sus fibras cárnicas son suaves a la mordida y de digestión fácil, así como rápida. Es importante resaltar que su elaboración es versátil y se puede agregar una gran variedad de sazones diferentes.

Es conveniente mencionar el valor nutritivo que contiene la carne de pollo, la cual se asemeja en valor nutritivo con la de res, cordero o cerdo, ya que es poseedora de vitamina B además, hierro y fósforo en su composición [7]. Las características se pueden visualizar en el anexo A.

1.2.1.3 Consumo y producción de la carne de cerdo

En el Ecuador el consumo de carne de cerdo se ha incrementado en relación a cinco años atrás desplazando de manera considerable a otras carnes como la de pollo y res. Este crecimiento se debe en gran parte a que las industrias han

tecnificado sus procesos adicional a esto la venta de productos derivados de la carne de cerdo y sus exportaciones [10].

1.2.1.4 Cualidades de la carne de cerdo e importancia de su consumo

La carne de cerdo tiene una consistencia bastante blanda a más de ser de fibra fina, con un color rosa pálido o bien gris claro. En la cocción la carne toma siempre este color gris claro, a diferencia de todos los demás tipos de carne. Entre sus cualidades posee una excelente fuente de fósforo, especialmente importante para la vida saludable de los huesos, del sistema nervioso y del metabolismo energético por ser fuente del grupo B y previniendo la anemia así como la depresión cualidades que se pueden visualizar en el anexo A [7].

1.2.2 Cocción

Dentro de los procesos que se utilizan para elaborar diferentes productos de consumo alimenticio esta la cocción, la cual se define como el proceso térmico a la que está sujeta la carne y que es responsable de una serie de cambios físico-químicos y microbiológicos, que determinan la calidad y las propiedades que caracterizan al producto acabado. Con este proceso térmico se persigue el desarrollo de las características de los alimentos como color, estructura, sabor, textura, entre otros. La estabilización del producto limitando así los efectos de una cocción excesiva que genera un producto no apto para el consumo y la degradación de las propiedades de los mismos [11].

Los métodos tradicionales o clásicos de cocción, se establecen en el calentamiento de un fluido externo (aire o agua) mediante la inyección de vapor, resistencias eléctricas, entre otros. En estos casos, el calor se transmite a la superficie de los productos y se difunde hasta su interior por conducción. Las características del fluido, principalmente la humedad relativa, tienen una fuerte influencia en el resultado obtenido [11].

En relación con la cocción se puede mencionar los métodos que dependen de la vía de transferencia de calor, es decir, el calor seco, el calor húmedo o por microondas como métodos térmicos.

1.2.2.1 Calor seco

En ese mismo sentido el calor seco es entonces un método térmico de cocción que cambia las propiedades del producto, descarta microorganismos ya que el calor modifica las proteínas microbianas causadas por reacciones de oxidación que crean un ambiente árido, quemando estos microorganismos de manera lenta [5].

1.2.2.2 Calor húmedo

En este método de cocción los alimentos se sumergen en algún líquido y los elementos solubles como vitaminas y minerales se diluyen en éste durante la cocción [12].

Entre los métodos utilizados para la cocción de alimentos mediante calor húmedo se tiene:

- Hervido
- Escaldado
- Al vapor

J. Lagares [11] afirma que, cual sea el proceso de cocción utilizado, la temperatura del centro térmico de la pieza es la que delimitará el punto final del proceso de cocción. Esta temperatura variará dependiendo del tipo de producto y el medio en el que se esté procesando, del rendimiento deseado y de las características organolépticas esperadas en el producto acabado.

Después de las consideraciones anteriores se debe diferenciar términos que comúnmente son confundidos, al entenderlos como similares, es por eso, que se define calor y temperatura como términos independientes.

1.2.2.3 Calor

Es la energía en circulación debido a una diferencia de temperaturas y siempre fluyendo de manera natural de una zona con una mayor temperatura hacia una zona de menor o baja temperatura tomando en cuenta que el volumen de los cuerpos debe mantenerse constante [13].

1.2.2.4 Temperatura

La temperatura es una medida de la energía cinética promedio de los átomos y moléculas individuales de una sustancia. Entonces con referencia a lo anterior cuando a una sustancia incrementa calor, sus átomos o moléculas se desplazan más rápido y su temperatura se eleva, o viceversa [5].

Según se ha visto los alimentos especialmente los productos cárnicos tiene diferentes métodos de proceso, es así, que los tiempos y temperaturas de cocción son distintos dependiendo la manera en que estos son cocidos, entendiéndose, entonces dos cuerpos que difieren en temperatura y se ponen en contacto entre si generan una transferencia de calor del cuerpo de mayor al de menor temperatura, esta transferencia de calor se produce mediante mecanismos físicos que se tratarán más adelante.

1.3 Métodos de transferencia de calor

La transferencia de calor es la energía de tránsito debido a una diferencia de temperaturas entre un cuerpo o entre cuerpos. Como se observa en la figura 4 se denotan los diferentes procesos como son, la conducción, convección y radiación [13].

Las técnicas de procesamiento térmico son ampliamente utilizadas para mejorar la calidad y seguridad de los alimentos y a su vez extender la vida útil de los mismos [14].



Figura 4. Métodos de transferencia de calor

Fuente: [15]

1.3.1 Conducción térmica

Se considera como conducción a la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia, a las más próximas y de menor energía como resultado de la interacción entre estas partículas, es así que la conducción puede darse en sólidos, líquidos así como también en gases, entonces la conducción ocurre en la dirección de la temperatura decreciente. [13].

$$Q_{\text{con}} = -k \cdot A_{\text{con}} \cdot \frac{(T_i - T_e)}{L} \quad [\text{Ec. 1}]$$

Donde:

Q_{con} : Razón del flujo de calor, [W]

k : Conductividad térmica del material de la pared, [W/m·K]

A_{con} : Área de la pared normal al flujo de calor, [m²]

T_i : Temperatura de la superficie interior de la pared, [K]

T_e : Temperatura de la superficie exterior de la pared, [K]

L : Longitud de la pared, [m]

1.3.2 Convección térmica

La transferencia de calor por convección se debe al movimiento del fluido. El fluido frío adyacente a superficies calientes recibe calor que luego transfiere al resto del fluido frío mezclándose con él [16].

$$Q_{cov} = h \cdot A_{cov} \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad [\text{Ec. 2}]$$

Donde:

Q_{cov} : Calor transferido de la superficie al fluido circundante, [W]

h : Coeficiente convectivo de transferencia de calor, [W/m².K]

T_s : Temperatura en la superficie, [K]

T_{∞} : Temperatura del fluido circundante, [K]

A_{cov} : Área de la superficie de transferencia de calor, [m²]

1.3.3 Radiación térmica

Muy a menudo la radiación se considera como un fenómeno perteneciente sólo a cuerpos calientes luminosos.

Esta energía térmica es transportada por ondas electromagnéticas que se diferencia de la conducción y la convección que necesitan de un medio material para la transferencia de energía térmica [16].

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{rad} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad [\text{Ec. 3}]$$

Donde:

Q_{rad} : Flujo de calor por radiación, [W]

T_1 : Temperatura de la superficie, [K]

T_2 : Temperatura de la superficie de los alrededores, [K]

A_{rad} : Área de la superficie, [m²]

ε : Emisividad

σ : Constante de Stefan Boltzman, [W/m²·K⁴]

1.3.4 Centro térmico

En los procedimientos clásicos para evaluar un procesamiento térmico hay un punto o región dentro del producto, ya sea un embutido o una lata, donde el calentamiento se produce forma más lenta, a este punto se denomina centro térmico [17].

1.4 Clasificación de los hornos domésticos

Un horno es un artefacto que genera calor y que lo mantiene dentro de una cámara cerrada. Se emplea generalmente para cocinar distintos tipos de productos, calentar o secar alimentos [18].

Existen en el mercado una variedad de hornos domésticos ya sean estos a gas o eléctricos los principales son:

Hornos a gas.

- Horno clásico
- Horno de bóveda (leña)
- Horno de convección
- Horno de convección a vapor

Horno eléctrico

- Horno convencional
- Horno convección
- Horno microondas

1.5 Conclusiones del capítulo

- En este capítulo se aprecia que en el Ecuador el consumo de productos cárnicos por habitante tiene un promedio anual de 54 kg, esto se debe a que el país se encuentra en vías de desarrollo económico y de crecimiento poblacional lo que genera un incremento en el consumo de este tipo de productos.
- Por otro lado es muy importante saber que para cada producto cárnico existe un tiempo y temperatura adecuado para su cocción. Esto ayuda a que conserven su textura, sabor y olor adecuados para el gusto del consumidor.

CAPÍTULO 2

MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

En este capítulo se presenta los modelos de transferencia de calor que garanticen un ambiente ideal para entender el proceso de cocción de los alimentos, realizando un estudio que ayude a determinar la temperatura en función del tiempo durante el proceso de cocción. También las propiedades de los alimentos con los cuales se trabajará para determinar números adimensionales que faciliten el cálculo.

2.1 Propiedades físicas de los alimentos

2.1.1 Densidad (ρ)

Es la masa por unidad de volumen. Sus unidades en el sistema internacional son kg/m^3 para el cálculo de procesos se distinguen diferentes formas de densidad entre las que anotan las siguientes [19]:

- Densidad verdadera: Es la que se calcula a partir de las densidades de los componentes de un material, considerando la conservación de la masa y el volumen (ρ_v).
- Densidad de sustancia: La que se mide cuando un material se ha esparcido de tal manera que no hay poros en su interior (ρ_s).
- Densidad de partícula: La de una muestra que no ha sido modificada estructuralmente por lo que incluye el volumen de todos los poros cerrados más no la de los poros que tienen conexiones externas (ρ_p).
- Densidad aparente: Es la densidad de una sustancia cuando se incluye el volumen de todos sus poros (ρ_a).

2.1.2 Calor específico (C_p)

Es la cantidad de energía, en forma de calor, que gana o pierde un sistema por unidad de masa, para que se produzca en él un cambio de temperatura de un grado, sin que haya cambio de estado [19].

$$C_p = \frac{q}{m \cdot \Delta T} \quad [\text{Ec. 4}]$$

Donde:

q: Calor ganado o perdido, [kJ]

m: Masa, [kg]

ΔT : Cambio de temperatura, [K]

C_p : Calor específico, [kJ]/(kg · K) cuando la presión es constante

2.1.3 Entalpia (H)

Es la capacidad calórica o grado de energía de un material, referido al que tiene a una temperatura arbitraria en el que fija grado o nivel cero (generalmente $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ para productos congelados ó $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ para otros sistemas). Se utiliza mucho este concepto para el estudio de los fenómenos térmicos de sustancias puras o gases como vapor y aire; en el caso de los alimentos tiene su mayor aplicabilidad para los productos congelados [19].

$$q = m \cdot (H_2 - H_1) \quad [\text{Ec. 5}]$$

Donde:

H_2 : Entalpia a la temperatura T_2 , [kJ]

H_1 : Entalpia a la temperatura T_1 , [kJ]

2.1.4 Conductividad térmica (k)

Es la medida de la capacidad para conducir calor de un material. En el caso de los alimentos depende principalmente de su composición. Sin embargo, tienen también influencia factores como sus espacios vacíos (forma, tamaño y orientación), su homogeneidad, entre otros [19].

Además, la conductividad térmica (k) indica la capacidad que posee un material para conducir el calor, esto implica que, un valor de conductividad térmica alta indica que el material es un buen conductor, y un bajo valor de este señala que el material es mal conductor o se trata de un aislante [20]. Véase en el anexo C la conductividad térmica para distintos productos alimenticios.

2.1.5 Difusividad térmica (α)

La difusividad térmica es una magnitud que indica con que velocidad se eleva la temperatura en un punto de un cuerpo cuando se aplica calor en otro punto del mismo [21].

Se usa para precisar la velocidad de transferencia de calor en alimentos sólidos de distintas formas [19].

$$\alpha = \frac{k}{\rho \cdot C_p} \quad [\text{Ec. 6}]$$

Donde:

α : Difusividad térmica, [m^2/s]

ρ : Densidad, [kg/m^3]

2.2 Propiedades térmicas de los alimentos

Autores como Orrego [19] mencionan que, a la velocidad con la que aparecen nuevos productos alimenticios siempre rebasará a la de producción de datos experimentales, es adecuado conocer modelos predictivos de las propiedades térmicas, que se basan en el conocimiento de la composición química y/o física (densidad, porosidad, tamaño de poro, entre otros) y del rango de temperaturas a las que se someten los materiales y/o productos. Algunas propiedades de los alimentos pueden observarse en anexo C.

2.3 Mecanismos de transferencia de calor y masa

El secado de la humedad en alimentos porosos es ampliamente utilizado en la industria alimenticia, este implica acoplamiento y transferencia de masa a través de un medio poroso, todavía es difícil predecir la tasa de transferencia de humedad a través de un medio poroso, porque los mecanismos involucrados son complejos y no completamente comprendidos. Como resultado el diseño de este proceso sigue siendo en gran parte, un arte basado en la experiencia adquirida a partir de pruebas de ensayo y error, a menudo el control proviene de la transferencia de masa interna y puede ocurrir a través de la fase sólida o dentro de los espacios vacíos. Se han propuesto varios mecanismos de transferencia de masa interna incluyendo difusión de vapor, difusión de humedad y luego vaporización superficial, flujo hidrodinámico, flujo capilar, el flujo de Darcy impulsado por la presión. Sin embargo el modelado de los procesos de secado es complicado porque casi siempre hay más de un mecanismo para el flujo total [22].

2.4 Coeficiente de transferencia de calor y masa

Los coeficientes de calor y masa son parámetros importantes de considerar en la modelación de transferencia de calor y masa durante los procesos térmicos de los alimentos. Los coeficientes de calor superficial se calculan principalmente utilizando una correlación entre un conjunto de números adimensionales:

- Número de Reynolds
- Número de Prandtl
- Número de Grashof
- Número de Nusselt

2.5 Medición de la penetración de calor

El objetivo principal de las mediciones de penetración de calor, es obtener un registro conciso de la temperatura en el punto frío del producto a lo largo del tiempo mientras el depósito está siendo analizado bajo un conjunto de condiciones controlando su proceso de trabajo.

Esto se logra normalmente mediante el uso de termopares insertados en el producto, y se realiza el análisis para obtener la información precisa durante el proceso de cocción [22].

2.6 Mecanismos de transferencia de calor

En general se trata de un problema de flujo transitorio que se describe con la ecuación 7, de transferencia de calor. Suponiendo que no exista generación interna de energía y que la conductividad térmica sea también constante.

La energía de entrada es aquella entregada por la potencia del quemador del sistema. La energía que sale para el caso del producto es la misma en su superficie. La energía que se almacena es en cambio la que corresponde a la variación de temperatura en función del tiempo, los cambios de energías corresponden a la variación de energía térmica en su interior [20].

En general se entiende que la conservación de la energía viene dada por:

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = \dot{E}_a \quad [\text{Ec. 7}]$$

Donde:

\dot{E}_e : Energía que entra al sistema, [kJ]

\dot{E}_s : Energía que sale del sistema, [kJ]

\dot{E}_a : Energía que se almacena en el sistema, [kJ]

2.7 Transferencia de calor por conducción en estado transitorio

Para el estudio de la transferencia de calor por conducción en estado transitorio se considera que no existe generación de energía, por tanto, $\dot{e}_{\text{genera}} = 0$. Además, se tomará en cuenta para el análisis de transferencia de calor, que el producto no tiene una distribución uniforme de la temperatura, por tanto no se puede aplicar un análisis como si se tratara de sistemas concentrados. Al tratarse de un cuerpo de forma arbitraria donde se lleva a cabo la transferencia de calor, del cuerpo con el

medio en el que este se encuentra, se supondrá que el análisis de los sistemas concentrados es aplicable, lo que quiere decir, que la temperatura permanece uniforme en el interior del producto y esta temperatura solo cambia con el tiempo. [20]

2.7.1 Conducción de calor en paredes planas, cilíndricas y esféricas

Se considera una pared plana de espesor $2L$, un cilindro largo de radio r_o , y una esfera de radio r_o , inicialmente con temperatura uniforme T_i . Como se muestra en la figura 5.

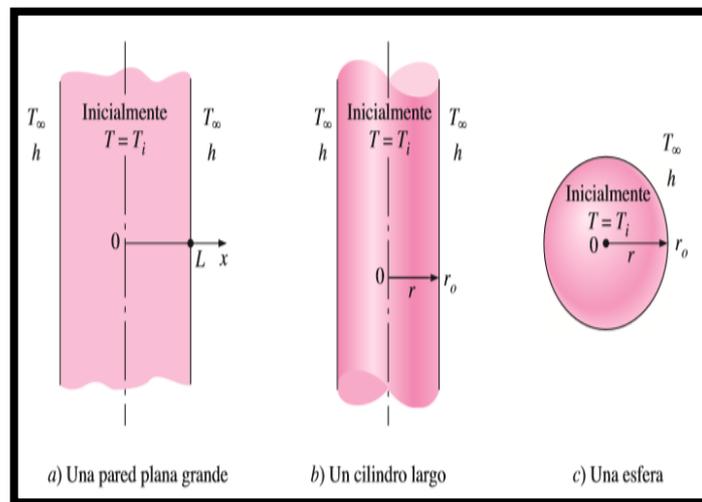


Figura 5. Conducción de calor a través de una pared plana, cilíndrica y esférica

Fuente: [20]

En el instante $t = 0$, a cada configuración geométrica se coloca en un medio grande que está a una temperatura constante T_∞ y se mantiene en este medio para $t > 0$. La transferencia de calor se lleva a efecto entre estos cuerpos y sus medios ambientes por convección, con un coeficiente de calor h uniforme y constante. Note que los tres casos poseen simetría geométrica y térmica: La pared plana es simétrica con respecto a su plano central ($x = 0$), el cilindro es simétrico con respecto a su línea central ($r = 0$) y la esfera es simétrica con respecto a su punto central ($r = 0$) [20].

2.7.2 Longitud característica

Para el análisis de los sistemas concentrados es necesario establecer un criterio de aplicabilidad además saber en qué momento es indicado usarlos, entonces, para ello lo primero es definir una longitud característica.

Es importante tomar en cuenta que para la longitud característica existen variaciones a más de ser la relación del volumen del producto por el área de transferencia (V/A) cuando se trata de un sistema de transferencia de calor por conducción en estado transitorio, depende también de la configuración geométrica del producto, entonces, la longitud característica se la considera según los siguientes casos.

- Cuando se trata de superficies planas la longitud característica es igual a $2L$
- Cuando se trata de superficies cilíndricas la longitud característica se reemplaza por $(r/2)$ siendo r el radio del cilindro.
- Cuando se trata de superficies esféricas la longitud característica se reemplaza por $(r/3)$ siendo r el radio de la esfera.

$$L_c = \frac{V}{A} \quad [\text{Ec. 8}]$$

Donde:

L_c : Longitud característica, [m]

V : Volumen de la superficie de la placa plana, [m³]

A : Área de la placa plana, [m²]

2.7.3 Número de Biot

Número de Biot, es el coeficiente adimensional de transferencia de calor este número hace referencia a la transferencia de calor por convección en la periferia

de un cuerpo respecto a la transferencia de calor por conducción dentro de dicho cuerpo [20].

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k} \quad [\text{Ec. 9}]$$

Donde:

h: Coeficiente convectivo de transferencia de calor, $[\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})]$

k: Conductividad térmica, $[\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})]$

2.7.4 Número de Fourier

Se considera como el número adimensional que indica la medida del calor conducido a través de un cuerpo, mientras mayor sea este número más rápida es la propagación del calor en dicho cuerpo.

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{(L_c)^2} \quad [\text{Ec. 10}]$$

Donde:

t: Tiempo, [s]

Algo semejante ocurre con la ecuación de conducción de calor en coordenadas cilíndricas y esféricas, que se puede manifestar de manera adimensional restando de este modo un número significativo de variables independientes y parámetros.

2.7.5 Flujo de calor en estado transitorio

Para entender de manera clara la conducción en estado transitorio la temperatura del cuerpo cambia de la temperatura inicial T_i , a la de los alrededores en el que se encuentra T_∞ , al final del proceso de conducción de calor en estado transitorio. Por tanto, la cantidad máxima de calor que un cuerpo puede ganar ó perder si ($T_i > T_\infty$) es sencillamente el cambio en el contenido de energía del cuerpo [20].

Es decir:

$$Q_{\max} = \rho \cdot C_p \cdot V \cdot (T_{\infty} - T_i) \quad [\text{Ec. 11}]$$

Donde:

T_i : Temperatura inicial, [K]

T_{∞} : Temperatura de los alrededores, [K]

Q_{\max} : Cantidad de calor máximo, [W]

Este Q_{\max} representa la cantidad de transferencia de calor cuando la temperatura del producto tiende a la temperatura del ambiente que lo rodea o que se encuentra circundante al mismo [20].

Si se usan las relaciones aproximadas de temperatura adimensional basadas en la de un término para pared plana, cilindro y esfera, y se realizan las integraciones indicadas, se obtienen las siguientes relaciones para la fracción de transferencia de calor en esas configuraciones geométricas [20].

Transferencia de calor para geometría plana.

$$\left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)_{\text{pared}} = 1 - \theta_{0, \text{pared}} \frac{\text{sen } \lambda_1}{\lambda_1} \quad [\text{Ec. 12}]$$

Transferencia de calor para geometría cilíndrica.

$$\left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)_{\text{cil}} = 1 - 2 \cdot \theta_{0, \text{cil}} \frac{J_1 \lambda_1}{\lambda_1} \quad [\text{Ec. 13}]$$

Transferencia de calor para geometría esférica.

$$\left(\frac{Q}{Q_{\max}}\right)_{\text{esf}} = 1 - 3 \cdot \theta_{0, \text{esf}} \frac{\text{sen } \lambda_1 - \lambda_1 \cos \lambda_1}{\lambda_1^3} \quad [\text{Ec. 14}]$$

También se tiene las gráficas de estas relaciones, basadas en la aproximación de un término, para Q/Q_{\max} , contra las variables de Biot y $h^2 \cdot \alpha \cdot t/k^2$, para pared

plana, cilindro y la esfera obsérvese estos valores en el anexo H para cada geometría [20], donde:

λ : Valores propios o característicos adimensionales

J_0, J_1 : Funciones de Bessel

2.7.6 Solución aproximada analítica, numérica y gráfica

La solución analítica para la conducción transitoria unidimensional de calor en una pared plana comprende series infinitas y ecuaciones implícitas, las cuales son difíciles de evaluar. Por lo tanto, existe una motivación clara para simplificar las soluciones analíticas con el fin de representar las soluciones en forma tabular o gráfica [20].

Las cantidades adimensionales para una pared plana también se pueden usar para un cilindro o una esfera, al reemplazar la variable espacial "x" por "r" y el semiespesor por "L" por el radio exterior "ro". Nótese que la longitud característica que se encuentra en la definición del número de Biot se toma "L" para la pared plana y el radio "ro", para el cilindro y la esfera, en lugar de "V/A" [20].

Solución aproximada analítica para geometría plana.

$$\theta_{\text{pared}} = \frac{T_{(x,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad [\text{Ec. 15}]$$

$$\theta_{\text{pared}} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \tau} \cdot \cos(\lambda_1 \cdot x/L) \quad [\text{Ec. 16}]$$

Donde :

θ : Temperatura adimensional

A_1, λ_1 : Contantes, funciones del número de Biot (véase en el anexo I sus valores)

$T_{(x,t)}$: Temperatura externa en la geometria plana

Solución aproximada analítica para geometría cilíndrica.

$$\theta_{\text{cil}} = \frac{T_{(r,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad [\text{Ec. 17}]$$

$$\theta_{\text{cil}} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \tau} \cdot J_0(\lambda_1 \cdot r/r_o) \quad [\text{Ec. 18}]$$

Donde:

J_0, J_1 : Funciones de Bessel

$T_{(r,t)}$: Temperatura externa en la geometría cilíndrica

Solución aproximada analítica para geometría esférica.

$$\theta_{\text{esf}} = \frac{T_{(r,t)} - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad [\text{Ec. 19}]$$

$$\theta_{\text{esf}} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \tau} \cdot \frac{\text{Sen}(\lambda_1 \cdot r/r_o)}{\lambda_1 \cdot r/r_o} \quad [\text{Ec. 20}]$$

Donde :

$T_{(r,t)}$: Temperatura externa en la geometría esférica

Dado que $\cos(0) = J_0(0) = 1$ y que el límite de $(\text{sen } x)/x$ también es uno, estas relaciones se simplifican para dar las siguientes ecuaciones en el centro de una pared plana, un cilindro o una esfera [20]:

Centro de la pared ($x = 0$),

$$\theta_{0,\text{pared}} = \frac{T_0 - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} \quad [\text{Ec. 21}]$$

$$\theta_{0,\text{pared}} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad [\text{Ec. 22}]$$

Donde :

θ_0 : Temperatura adimensional en el centro geométrico, [°C]

T_0 : Temperatura en el centro geométrico, [°C]

Centro del cilindro ($r = 0$)

$$\theta_{0,cil} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad [\text{Ec. 23}]$$

$$\theta_{0,cil} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad [\text{Ec. 24}]$$

Centro del esfera ($r = 0$)

$$\theta_{0,esf} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} \quad [\text{Ec. 25}]$$

$$\theta_{0,esf} = A_1 \cdot e^{-\lambda_1^2 \tau} \quad [\text{Ec. 26}]$$

2.8 Convección natural

Hay muchos ejemplos de convección natural en la industria alimentaria. La convección es significativa cuando las superficies que se encuentran calientes. Esta se produce cuando el alimento se coloca dentro de un refrigerador o congelador en el que la circulación no es asistida por ventiladores. La convección es muy importante cuando el producto es colocado en hornos sin ventiladores y después sacados para enfriar al aire en la figura 6, se observa la convección natural en los casos mencionados.

Se ha encontrado que depende de las constantes físicas del fluido, la densidad (ρ), viscosidad dinámica (μ), la conductividad térmica (k), el calor específico a presión constante (C_p) y el coeficiente de expansión volumétrico (β).

Otros factores que afectan a la transferencia de calor por convección son, la dimensión lineal del sistema, el diámetro (D) o la longitud (L), diferencia de temperaturas (ΔT) y la gravedad (g) ya que es la diferencia de densidad que actúan

sobre la gravedad y crean la circulación. Esta tasa de transferencia se expresada por el coeficiente de calor convectivo (h).

De manera experimental se ha demostrado que la transferencia de calor por convección se puede describir en términos de estos tres factores agrupados en números [23].

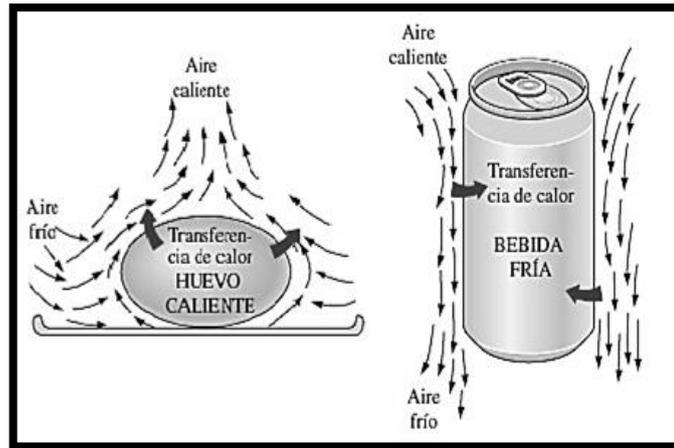


Figura 6. Convección natural

Fuente: [20]

2.8.1 Número de Reynolds (Re)

El número de Reynolds simboliza la relación que existe entre las fuerzas de viscosidad y las de inercia actuando sobre un elemento de volumen de un fluido, éste indica si el flujo de un fluido es laminar o turbulento [20].

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L_c}{\mu} \quad [\text{Ec. 27}]$$

Donde:

μ : Viscosidad dinámica, [kg/m·s]

V: Velocidad, [m/s]

2.8.2 Número de Prandtl (Pr)

El número de Prandtl simboliza la relación entre la difusividad molecular de movimiento y la difusividad molecular del calor o también entre el espesor de la capa límite de velocidad y la capa límite térmica.

Los valores de número de Prandtl están dados alrededor de la unidad para gases, indicando esto la cantidad de movimiento como la cantidad de calor que se difunden por el fluido a velocidad similar.

En metales líquidos el calor se difunde con mayor rapidez que en aceites, esto quiere decir, que $Pr \ll 1$ para metales líquidos y $Pr \gg 1$ cuando se trata de aceites al igual que el número de Nusselt, Prandtl se utiliza en convección forzada como en convección natural [20].

$$Pr = \frac{c_p \cdot \mu}{k} \quad [\text{Ec. 28}]$$

2.8.3 Número de Grashof (Gr)

El número de Grashof simboliza la relación que existe entre las fuerzas de viscosidad y las de empuje que ejercen sobre un fluido, indica el régimen de flujo en convección natural, es equivalente al número de Reynolds en convección forzada [20].

$$Gr = \frac{L_c^3 \cdot \rho^2 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\mu^2} \quad [\text{Ec. 29}]$$

Donde:

g : Gravedad, $[\text{m/s}^2]$

β : Coeficiente de expansión volumétrico, $[\text{K}^{-1}]$

El parámetro adimensional del primer término de la ecuación 29 es una consecuencia directa de la fuerza de empuje. Sin embargo, como se expresa en términos de la velocidad no es conveniente en su forma actual y se trabaja con su

forma alternativa que se obtiene al multiplicar $Re^2 = (\mu \cdot L/\nu)^2$. El resultado se denomina Grashof (Gr_L) [13].

$$Gr_L = \frac{L_c^3 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2} \quad [Ec. 30]$$

Donde:

ν : Viscosidad cinemática, [m²/s]

2.8.4 Número de Rayleigh (Ra)

Otra cantidad sin dimensiones, es el número de Rayleigh se lo utiliza con mayor frecuencia en la literatura sobre el tema de transferencia de calor dicho número está en función del número de Grashof y el número de Prandtl y su valor viene dado por el producto del número de Grashof por el número de Prandtl, el número de Rayleigh es exclusivo de la convección natural [23]:

$$Ra = Gr \cdot Pr \quad [Ec. 31]$$

El coeficiente promedio de transferencia de calor, $h_{promedio}$ se obtiene integrando h sobre la altura L , de la pared ya que la temperatura de la pared es uniforme. Dicha expresión viene dado por [23]:

$$h_{promedio} = \frac{1}{L_c} \int_0^L h \cdot dy \quad [Ec. 32]$$

$$Nu_{promedio} = \frac{h_{promedio} \cdot L_c}{k} \quad [Ec. 33]$$

2.8.5 Número de Nusselt (Nu)

El número adimensional que representa la relación que existe entre el calor que se transfiere por convección y el calor que se transferiría si solo se tratará de la conducción.

El número de Nusselt se utiliza tanto para convección forzada como para convección natural, cuanto mayor sea este número más eficaz será la convección.

$$Nu = h \frac{L_c}{k} \quad [\text{Ec. 34}]$$

Donde:

h_c : Coeficiente de convección, $[\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$

L_c : Longitud característica, $[\text{m}]$

k : Coeficiente de conductividad térmica del fluido, $[\text{W}/\text{m} \cdot \text{K}]$

2.8.6 Coeficiente de expansión volumétrica

Es una propiedad que representa la variación de las densidades de un fluido con la temperatura a presión constante, en otras palabras. El coeficiente de expansión volumétrica es una medida del cambio de volumen de una sustancia con la temperatura a presión constante y se define:

$$\beta = \frac{1}{T} \quad [\text{Ec. 35}]$$

Donde:

β : Coeficiente de expansión volumétrica $[1/\text{K}]$

T : Diferencia de temperatura entre la temperatura inicial y la temperatura final del producto.

2.9 Superficie plana horizontal

El valor del número del Nusselt para la transferencia de calor en una superficie plana horizontal depende de que la placa este caliente o fría en relación con el fluido ambiente. La longitud característica (L_c) para correlacionar los datos en convección natural toman las siguientes consideraciones [23].

- Longitud de lado en el caso de un cuadrado
- El promedio de los dos lados en el caso del rectángulo
- $0,9 \cdot D$ En el caso de un disco circular con diámetro D

Holman [24] afirma que, la ecuación para el cálculo de la longitud característica en convección queda definida como:

$$L_c = \frac{A}{P} \quad [\text{Ec. 36}]$$

Donde:

A = Área de la superficie de la placa plana, $[\text{m}^2]$

P = Perímetro de la placa plana, $[\text{m}]$

También cabe recalcar que la longitud característica para transferencia de calor según Karlekar [23], para cilindros y esferas está determinada por el diámetro (D).

En la tabla B1, se observa cómo se puede trabajar con diferentes geometrías de los productos para su análisis.

Tabla B 1. Número de Nusselt para las diferentes configuraciones geométricas del producto

Placa horizontal caliente con cara hacia arriba

$Nu_{\text{promedio}} = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4}$ para $2,6 \times 10^4 < Ra < 10^7$	[Ec. 37]
$Nu_{\text{promedio}} = 0,15 \cdot Ra_L^{1/3}$ para $2,6 \times 10^7 < Ra < 10^{10}$	[Ec. 38]

Placa horizontal caliente con cara hacia abajo

$Nu_{\text{promedio}} = 0,27 \cdot Ra_L^{1/4}$ para $3 \times 10^7 < Ra < 10^{10}$	[Ec. 39]
--	----------

Cilindros horizontales

$\text{Nu}_{\text{promedio}} = 0,53 \cdot \text{Ra}_D^{1/4} \quad \text{para } 10^4 < \text{Ra}_D < 10^9$	[Ec. 40]
$\text{Nu}_{\text{promedio}} = 0,13 \cdot \text{Ra}_D^{1/3} \quad \text{para } 10^9 < \text{Ra}_D < 10^{12}$	[Ec. 41]

Esferas

$\text{Nu}_{\text{promedio}} = 2 + 0,43 \cdot \text{Ra}_D^{1/4} \quad \text{para } 1 < \text{Ra}_D < 10^5$	[Ec. 42]
$\text{Nu}_{\text{promedio}} = 2 + \frac{0,43 \cdot \text{Ra}_D^{1/4}}{[1 + (0,469/\text{Pr})^{9/16}]^{4/9}} \quad \text{Ra}_D \leq 10^5 \text{ y } \text{Pr} \geq 0,7$	[Ec. 43]

2.10 Conclusiones del capítulo

- Para el correcto análisis de los productos cárnicos, es necesario conocer sus propiedades físicas, térmicas y como estas reaccionan al ser sometidas a los diferentes métodos de transferencia de calor.
- Las ecuaciones de los números adimensionales en un sistema transitorio unidimensional facilitan la obtención de temperatura en el centro de los productos.

CAPÍTULO 3

APLICACIÓN DE LOS MODELOS MATEMÁTICOS EN LOS PRODUCTOS CÁRNICOS

En este capítulo se aplicarán las ecuaciones propuestas en el apartado anterior, que servirán para encontrar el coeficiente de convección en un determinado ambiente, también será posible determinar el flujo de calor por conducción, convección y radiación, para ello se utilizarán las características térmicas de cada producto, en este caso los productos cárnicos a utilizarse son la carne de cerdo y pollo.

Adicionalmente con el coeficiente de convección hallado se podrá obtener las respectivas temperaturas del centro térmico de cada producto y se determinará si la temperatura es la correcta para su cocción en un determinado tiempo.

3.1 Cálculos térmicos de los productos cárnicos

Para el cálculo del coeficiente de convección se utilizarán las características térmicas del aire a una temperatura de 350 F (178 °C), esta temperatura es la recomendada, antes de que el producto cárnico ingrese al horno, es decir, es el precalentamiento de la cámara de cocción, en el anexo E se puede observar la temperatura a la que debe llegar la cámara de cocción.

Para la temperatura interna de los productos se utilizarán las tablas del anexo E donde se encuentra las temperaturas y tiempos de cocción de la carne de cerdo y pollo a una temperatura de precalentamiento aproximadamente (180 °C). Las características térmicas del aire a una temperatura de 180 °C se puede observar en el anexo G.

Para el cálculo del coeficiente de convección se tiene las siguientes condiciones iniciales, la cámara de cocción tiene una dimensión de 0,42 m de ancho, 0,42 m de alto y 0,7 m de fondo con una temperatura interna de 180 °C. Para la obtención

de la transferencia de calor se aplicará en los diferentes casos, cuerpos planos, cilíndricos y esféricos.

Para el coeficiente de convección se utilizarán las respectivas ecuaciones que permitirán obtener el coeficiente de convección señaladas en el capítulo anterior.

3.2 Cálculos térmicos para la carne de cerdo

Para el cálculo de la transferencia de calor en la carne de cerdo se tendrá que determinar cuáles son sus características térmicas, el cálculo se lo realizará en régimen transitorio unidimensional y flujo natural, para geometrías planas, cilíndricas y esféricas.

3.2.1 Coeficiente de convección natural para geometría plana horizontal

Para el primer caso se realizará el cálculo en una superficie plana de forma horizontal el producto cárnico a utilizar para este caso será la carne de cerdo que se representa esquemáticamente dentro del horno como se muestra en la figura 7, el cual tiene las siguientes dimensiones ancho 0,1 m, largo 0,21 m y espesor 0,06 m su peso aproximadamente 1kg con un tiempo de 40 minutos, las características térmicas del producto cárnico se puede observar en el anexo C.

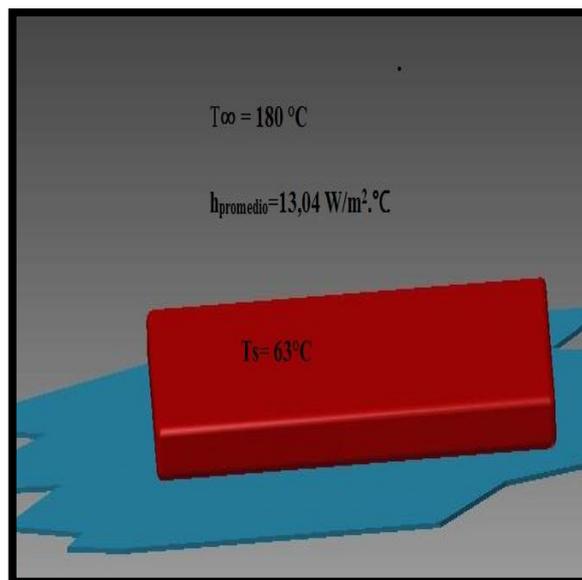


Figura 7. Condición inicial

Condición inicial.

Placa = 0,1 m x 0,21 x 0,06 m

$T_{\infty} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_s = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Para determinar el número de Prandtl se utilizará la ecuación 28.

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

$$\text{Pr} = \frac{1019 \text{ J/kg} \cdot ^{\circ}\text{C} \cdot 2,504 \cdot 10^{-5} \text{ Kg/m s}}{0,03646 \text{ W/m} \cdot ^{\circ}\text{C}}$$

$$\text{Pr} = 0,669$$

Determinado el número adimensional de Prandtl para el cálculo de superficies planas se calcular la longitud característica con ayuda de la ecuación 36.

$$L_c = \frac{A}{P}$$

$$L_c = \frac{0,1 \text{ m} \cdot 0,21 \text{ m}}{2(0,1 \text{ m}) + 2(0,21 \text{ m})}$$

$$L_c = 0,033 \text{ m}$$

Se determinará el número adimensional de Grashof, antes se debe obtener el coeficiente de expansión volumétrica con la ecuación 35 se puede obtener este valor.

$$\beta = \frac{1}{T}$$

$$\beta = \frac{1}{(453,15 \text{ K} - 336,15 \text{ K})}$$

$$\beta = 8,547 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Definido el coeficiente de expansión volumétrica se reemplaza, este resultado en la ecuación 30.

$$Gr_L = \frac{L_c^3 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

$$Gr_L = \frac{(0,033 \text{ m})^3 \cdot 8,547 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot (453,15 - 336,15) \text{ K}}{(3,212 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2}$$

$$Gr_L = 3,41 \times 10^5$$

Con la ecuación 31 se obtendrá el número de Rayleigh de forma simplificada.

$$Ra_L = Gr \cdot Pr$$

$$Ra_L = 3,41 \times 10^5 \cdot 0,669$$

$$Ra_L = 2,28 \times 10^5$$

Para obtener el número de Nusselt promedio se recurre a la ecuación 37 para placa horizontal.

$$Nu_{\text{promedio}} = 0,54 \cdot Ra^{1/4}$$

$$Nu_{\text{promedio}} = 0,54 \cdot (2,28 \times 10^5)^{1/4}$$

$$Nu_{\text{promedio}} = 11,80$$

Se recurre a la ecuación 33, al despejar el coeficiente convección promedio. La ecuación queda de la siguiente manera:

$$h_{\text{promedio}} = \frac{Nu_{\text{promedio}} \cdot k}{L_c}$$

$$h_{\text{promedio}} = \frac{11,80 \times 0,03646 \text{ W/m} \cdot \text{°C}}{0,033 \text{ m}}$$

$$h_{\text{promedio}} = 13,04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

3.2.2 Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría plana

Para la conducción en el producto cárnico se considera como estado transitorio en placas planas como se representa en la figura 8, las características térmicas del cerdo se puede observar en el anexo C.

Condición inicial

$$T_{\infty} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_s = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$h_{\text{promedio}} = 13,04 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$$

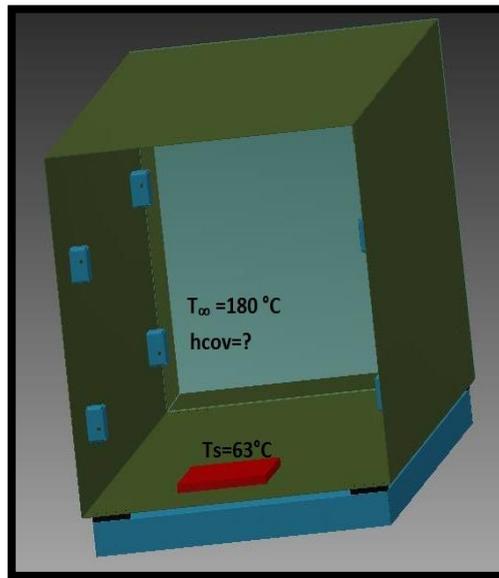


Figura 8. Geometría plana dentro de la cámara de cocción.

Para el cálculo de superficies planas se considera un filete de peso aproximado de 1 kg en un tiempo de 40 min véase el anexo E, los tiempos para cada tipo de corte. Con ayuda de la ecuación 8 se puede calcular la longitud característica para geometría plana.

$$L_c = \frac{V}{A}$$

$$L_c = \frac{0,1\text{m} \cdot 0,21\text{m} \cdot 0,06\text{m}}{2[(0,1\text{m} \cdot 0,21\text{m}) + (0,1\text{m} \cdot 0,06\text{m}) + (0,21\text{m} \cdot 0,06\text{m})]}$$

$$L_c = 0,0159 \text{ m}$$

Para determinar la temperatura en el centro del producto, se debe determinar el número de Biot y Fourier. Para el número de Biot se tomará en cuenta la ecuación 9, con una consideración, que para el coeficiente de convección se utilizara el h_{promedio} que se obtuvo del cálculo de convección natural que es el adecuado para este sistema. En cambio para el número de Fourier se considera la ecuación 10.

$$Bi = \frac{h_{\text{promedio}} \cdot L_c}{k}$$

$$Bi = \frac{13,04 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \cdot 0,0159\text{m}}{0,456 \text{ W/m} \cdot \text{°C}}$$

$$Bi = 0,46$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{L^2}$$

$$\tau = \frac{(0,13 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}) \cdot 2400 \text{ s}}{(0,0159)^2}$$

$$\tau = 1,23$$

Para encontrar la temperatura en el centro del producto es necesario recurrir a la ecuación 21, antes se de obtener la temperatura adimensional.

$$\theta_{0,\text{pared}} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

Con la ecuación 22 se obtendrá la temperatura adimensional, para este caso el valor del número de Biot es 0,46 y con los valores de las constantes de Biot del anexo I, se obtendrá la temperatura media.

Los valores se obtienen de una interpolación donde: $A_1 = 1.0652$ y $\lambda_1 = 0,6112$

$$\theta_0 = 1.0652e^{-0,6112^2 \cdot 1,23}$$

$$\theta_0 = 0,85$$

$$\frac{T_0 - 180^\circ\text{C}}{63^\circ\text{C} - 180^\circ\text{C}} = 0,85$$

$$T_0 = 80,95^\circ\text{C}$$

La temperatura resultante es la del centro del producto.

3.2.3 Flujo de calor en geometría plana

Es importante saber que el flujo de calor para los diferentes métodos, se puede determinar si el sistema está ganando o perdiendo energía.

3.2.3.1 Flujo de calor por conducción

Para determinar el flujo de transferencia de calor se debe utilizar las tablas de Heisler véase en el anexo H, sin embargo se debe encontrar el flujo de calor máximo con la ecuación 11 se obtendrá dicho valor.

$$Q_{\max} = m \cdot C_p \cdot (T_\infty - T_s)$$

$$Q_{\max} = 1\text{kg} \cdot 3,49 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}(453,15 - 336,15) \text{K}$$

$$Q_{\max} = 408,33 \text{ kJ} / 2400 \text{ s}$$

$$Q_{\max} = 170,13 \text{ W}$$

Para encontrar la relación adimensional de transferencia de calor se debe obtener primero los valores de Biot y Biot al cuadrado por Fourier, estas ecuaciones son

condiciones para ingresar a las gráficas de Heisler y determinar la relación adimensional de transferencia de calor.

$$Bi^2 \cdot \tau = 0,46^2 \cdot 1,23$$

$$Bi^2 \cdot \tau = 0,26$$

Con la ayuda del anexo H se puede determinar el valor de la relación adimensional de transferencia de calor que para este caso el valor es de 0,27.

$$\frac{Q_{\text{cod}}}{Q_{\text{max}}} = 0,27$$

$$Q_{\text{con}} = 0,27 \cdot Q_{\text{max}}$$

$$Q_{\text{con}} = 0,27 \cdot 170,13 \text{ W}$$

$$Q_{\text{con}} = 45,93 \text{ W}$$

3.2.3.2 Flujo de calor por convección

Para determinar el flujo de calor por convección para la carne de cerdo se utiliza la ecuación 2.

$$Q_{\text{cov}} = h_{\text{promedio}} \cdot A_{\text{cov}} \cdot (T_s - T_{\infty})$$

$$Q_{\text{cov}} = 13,04 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C} \cdot 0,021 \text{ m}^2 (63 - 180) ^\circ\text{C}$$

$$Q_{\text{cov}} = -32,09 \text{ W}$$

Como se esperaba el flujo de calor es negativo ya que el fluido está transfiriendo energía a la superficie del producto.

3.2.3.3 Flujo de calor por radiación

Para encontrar el flujo de calor por radiación se necesita el valor de la emisividad para el caso de cuerpos calientes, se puede observar en el anexo F y la constante de Boltzmann, para este caso es $\varepsilon = 0,93$ y $\sigma = 5,66 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Mediante la ecuación 3 se encontrará el flujo de calor por radiación.

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\text{rad}} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 0,378 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \cdot 0,021 \text{ m}^2 \cdot (336,15 - 453,15) \text{ K}$$

$$Q_{\text{rad}} = -0,93 \text{ W}$$

3.2.3.4 Flujo total de calor en geometrías planas

Para encontrar el flujo total se realizará la sumatoria del flujo por conducción, convección y radiación.

$$Q_T = Q_{\text{con}} + Q_{\text{cov}} + Q_{\text{rad}}$$

$$Q_T = 45,93 \text{ W} - 32,09 \text{ W} - 0,93 \text{ W}$$

$$Q_T = 12,91 \text{ W}$$

3.2.4 Coeficiente de convección natural para cilindro horizontal

Otra forma geométrica posible del producto cárnico (cerdo) es la cilíndrica, que se representa gráficamente dentro del horno como se muestra en la figura 9, este tipo de geometría se puede encontrar como embutidos o tal vez enrollados del producto.

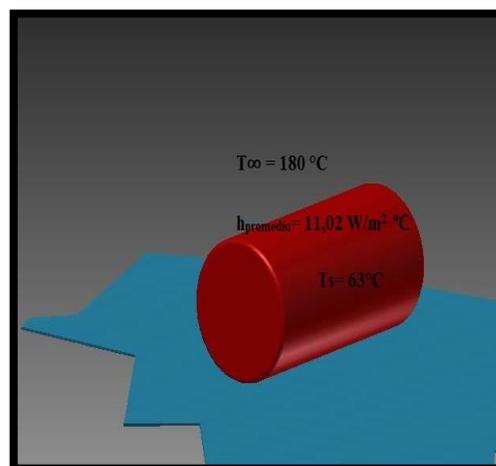


Figura 9. Condición inicial

Condición inicial

$$D = 0,06 \text{ m}$$

$$L = 0,21 \text{ m}$$

$$T_{\infty} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_s = 63 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para determinar el número de Prandtl se utilizará la ecuación 30.

$$\text{Pr} = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

$$\text{Pr} = 0,669$$

Para el caso de los cilindros la longitud característica para los cálculos correspondientes corresponde al diámetro (D_{cil}) que es la condición para el cálculo del número de Grashof.

Se determinará el número adimensional de Grashof, antes se debe obtener el coeficiente de expansión volumétrica con la ecuación 35.

$$\beta = \frac{1}{T}$$

$$\beta = 8,547 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Definido el coeficiente de expansión volumétrica se reemplazar valores en la ecuación 31 para número de Grashof.

$$\text{Gr}_D = \frac{D_{\text{cil}}^3 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

$$\text{Gr}_D = \frac{(0,06 \text{ m})^3 \cdot 8,547 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1} \cdot 9,8 \text{ m/s}^2 \cdot (180 - 63) \text{ K}}{(3,212 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s})^2}$$

$$\text{Gr}_D = 2,05 \times 10^6$$

Donde:

D_{cil} : Diámetro del cilindro que reemplaza a la longitud característica en el caso de esta configuración geométrica.

Una vez que se ha determinado el número de Grashof obtenido con el anterior desarrollo, se procede con la ecuación 31, que representa a la simplificada de número de Rayleigh.

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr$$

$$Ra_D = 2.05 \times 10^6 \cdot 0,669$$

$$Ra_D = 1,37 \times 10^6$$

Para obtener el número de Nusselt promedio se utilizará la ecuación 40 para cilindro horizontal.

$$Nu_{promedio} = 0,53 \cdot Ra_L^{1/4}$$

$$Nu_{promedio} = 0,53(1,37 \times 10^6)^{1/4}$$

$$Nu_{promedio} = 18,14$$

Para determinar el coeficiente de convección se utiliza la ecuación 33. Donde despejando $h_{promedio}$ queda de la siguiente forma:

$$h_{promedio} = \frac{Nu_{promedio} \cdot k}{D_{cil}}$$

$$h_{promedio} = \frac{18,14 \cdot 0,03646 \text{ W/m} \cdot \text{°C}}{0,06 \text{ m}}$$

$$h_{promedio} = 11,02 \text{ W/m}^2 \text{ °C}$$

3.2.5 Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría cilíndrica

Para el cálculo de la temperatura considerando la geometría cilíndrica del producto se tiene las siguientes consideraciones tomadas en cuenta para un diámetro de 0,06 m y una longitud de 0,21 m para una cantidad de 1 kg del producto el cual está representado dentro de la cámara de cocción como muestra la figura 10.

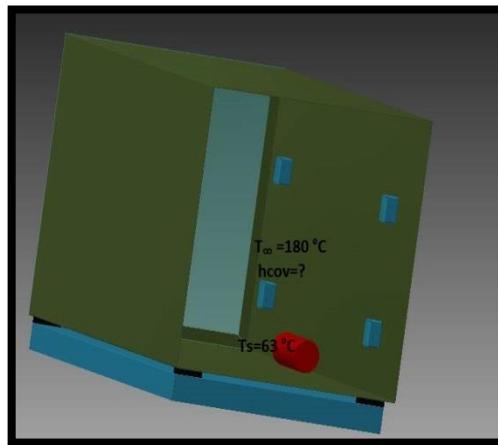


Figura 10. Geometría cilíndrica dentro de la cámara de cocción

Para determinar la temperatura en el centro del producto, se debe determinar el número de Biot y Fourier. Para el número de Biot se utilizará la ecuación 9, con una consideración, que para el coeficiente de convección se debe emplear el $h_{promedio}$ que se obtuvo del cálculo de convección natural que es el adecuado para este sistema. Para Fourier se hará uso de la ecuación 9, y que por tratarse de un cilindro la longitud característica será reemplazado por el r_o .

$$Bi = \frac{h_{promedio} \cdot r_o}{2k}$$

$$Bi = \frac{11.02 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \cdot 0,03\text{m}}{2(0,456 \text{ W/m} \cdot \text{°C})}$$

$$Bi = 0,36$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{r_0^2}$$

$$\tau = \frac{(0,13 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}) \cdot 1500 \text{ s}}{(0,03\text{m})^2}$$

$$\tau = 0,216$$

Para encontrar la temperatura en el centro del producto se hará uso de la ecuación 23, previamente se debe encontrar la temperatura adimensional una vez obtenido este valor se puede hacer uso de las tablas de Heisler.

$$\theta_{0,\text{cil}} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

Con la ecuación 24, se obtendrá la temperatura adimensional, para este caso el valor del número de Biot es 0,36 y con los valores de las constantes de Biot del anexo I, se conseguirá la temperatura media.

Los valores se obtienen de una interpolación $A_1 = 1,08434$ y $\lambda_1 = 0,80956$

$$\theta_{0,\text{cil}} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$$

$$\theta_{0,\text{cil}} = 1,08434 e^{-0,80956^2 \cdot 0,35}$$

$$\theta_0 = 0,86$$

$$\frac{T_0 - 180^\circ\text{C}}{63^\circ\text{C} - 180^\circ\text{C}} = 0,85$$

$$T_0 = 79,83^\circ\text{C}$$

La temperatura resultante es la del centro del producto.

3.2.6 Flujo de calor en geometría cilíndrica

Es importante saber el flujo de calor para los diferentes métodos con estos se puede determinar si el sistema está ganando o perdiendo energía.

3.2.6.1 Flujo de calor por conducción

Para determinar el flujo de transferencia de calor se debe utilizar las tablas de Heisler véase en el anexo H, sin embargo se debe encontrar el flujo de calor máximo con la ecuación 11 se obtendrá dicho valor.

$$Q_{\max} = m \cdot C_p \cdot (T_{\infty} - T_s)$$

$$m = \rho \cdot v$$

$$m = 1030 \text{ kg/m}^3 \cdot 5,93 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = 0,61 \text{ kg}$$

La masa está determinada para un tiempo de 1500 s

$$Q_{\max} = 166,48 \text{ W}$$

Para encontrar la relación adimensional de transferencia de calor se debe obtener primero los valores de Biot y Biot al cuadrado por Fourier, estas ecuaciones son condiciones para ingresar a las gráficas de Heisler y determinar la relación adimensional de transferencia de calor.

$$Bi^2 \cdot \tau = 0,03$$

Con la ayuda del anexo H se puede determinar el valor de la relación adimensional de transferencia de calor para este caso el valor es de 0,15.

$$\frac{Q_{\text{con}}}{Q_{\max}} = 0,15$$

$$Q_{\text{cod}} = 0,15 \cdot Q_{\max}$$

$$Q_{\text{cod}} = 24,97 \text{ W}$$

3.2.6.2 Flujo de calor por convección

Para determinar el flujo de calor por convección para la carne de cerdo se utiliza la ecuación 2.

$$Q_{\text{cov}} = h_{\text{promedio}} \cdot A_{\text{cov}} \cdot (T_s - T_{\infty})$$

$$Q_{\text{cov}} = -64,46 \text{ W}$$

3.2.6.3 Flujo de calor por radiación

Para encontrar el flujo de calor por radiación se necesita el valor de la emisividad para el caso de cuerpos calientes, se puede observar en el anexo F y la constante de Boltzmann, para este caso es $\varepsilon = 0,93$ y $\sigma = 5,66 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Mediante la ecuación 3 se encontrará el flujo de calor por radiación.

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\text{rad}} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = -0,68 \text{ W}$$

3.2.6.4 Flujo total de calor en cilindros

Para encontrar el flujo total se realizará la sumatoria del flujo por conducción, convección y radiación.

$$Q_T = Q_{\text{con}} + Q_{\text{cov}} + Q_{\text{rad}}$$

$$Q_T = 24,97 \text{ W} - 64,46 \text{ W} - 0,68 \text{ W}$$

$$Q_T = -40,17 \text{ W}$$

3.2.7 Coeficiente de convección natural para esferas

Para el cálculo de transferencia de calor de una geometría esférica del producto se utilizará el diámetro de la esfera 0,1 m como muestra la figura 11.

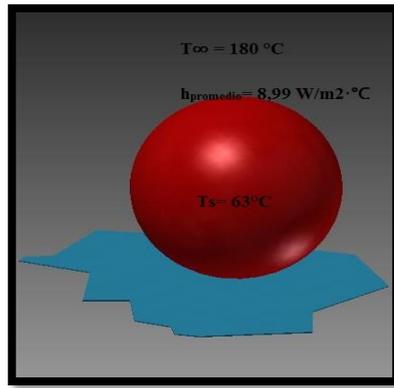


Figura 11. Condición inicial

Condición inicial

$$D_{\text{esf}} = 0.1\text{ m}$$

$$T_{\infty} = 180\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_s = 63\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Para determinar el número de Prandtl se utilizará la ecuación 28.

$$Pr = \frac{C_p \cdot \mu}{k}$$

$$Pr = 0,669$$

Determinado el número adimensional de Prandtl para superficies esféricas se calcula su longitud característica para el caso de las esferas es su diámetro (D_{esf}).

$$L_c = D_{\text{esf}}$$

Para determinar el coeficiente de expansión volumétrica se hace uso de la ecuación 35.

$$\beta = \frac{1}{T}$$

$$\beta = 8,547 \times 10^{-3}\text{ K}^{-1}$$

Definido el coeficiente de expansión volumétrica se reemplazará valores en la ecuación 30 para número de Grashof.

$$Gr_D = \frac{D^3 \cdot \beta \cdot g \cdot \Delta T}{\nu^2}$$

$$Gr_D = 9,49 \times 10^6$$

Para obtener el número de Rayleigh se emplea la ecuación 31.

$$Ra_D = Gr_D \cdot Pr$$

$$Ra_D = 6,35 \times 10^6$$

Para obtener el número de Nusselt promedio se aplicará la ecuación 43, para cilindro horizontal.

$$Nu_{\text{promedio}} = 2 + \frac{0,589 \cdot Ra_D^{1/4}}{[1 + (0,469/Pr)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$Nu_{\text{promedio}} = 2 + \frac{0,589 \cdot (1,37 \times 10^6)^{1/4}}{[1 + (0,469/0,669)^{9/16}]^{4/9}}$$

$$Nu_{\text{promedio}} = 24,66$$

Para determinar el coeficiente de convección se aplicará la ecuación 33. Donde despejando h_{promedio} queda de la siguiente forma:

$$h_{\text{promedio}} = \frac{Nu_{\text{promedio}} \cdot k}{D}$$

$$h_{\text{promedio}} = \frac{24,66 \cdot 0,03646 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}}{0,1 \text{ m}}$$

$$h_{\text{promedio}} = 8,99 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

3.2.8 Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría esférica

Con la obtención del factor de transferencia de calor por convección se puede obtener la temperatura en centro del producto, para el caso de la esfera se tomará en cuenta la temperatura del producto y del sistema como se aprecia en la figura 12.

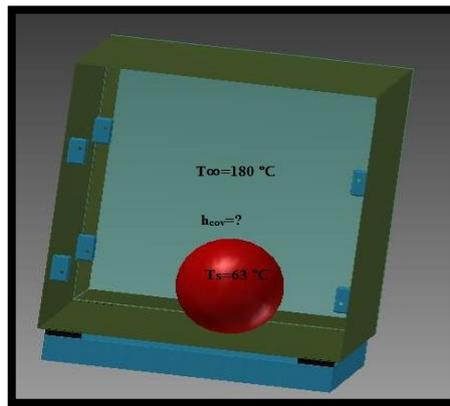


Figura 12. Geometría esférica dentro de la cámara de cocción

Condición inicial.

$$T_{\infty} = 180 \text{ °C}$$

$$T_s = 63 \text{ °C}$$

$$h_{\text{promedio}} = 8,99 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

Para determinar la temperatura en centro del producto se emplea la ecuación 9, para obtener el número de Biot y la ecuación 10 para Fourier.

$$Bi = \frac{h_{\text{promedio}} \cdot r_o}{3 \cdot k}$$

$$Bi = \frac{8,99 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C} \cdot 0,05\text{m}}{3(0,456 \text{ W/m} \cdot \text{°C})}$$

$$Bi = 0,33$$

$$\tau = \frac{\alpha \cdot t}{r_0^2}$$

$$\tau = \frac{(0,13 \times 10^{-6} \text{m}^2/\text{s}) \cdot 1294 \text{ s}}{(0,05)^2}$$

$$\tau = 0,067$$

Para encontrar la temperatura en el centro del producto en estado transitorio unidimensional se utiliza la ecuación 25, para geometría esférica.

$$\theta_{0,\text{esf}} = \frac{T_0 - T_\infty}{T_1 - T_\infty}$$

La temperatura en el centro del producto, se determina con el valor de Biot y las tablas del anexo I, donde se encuentran los valores de A_1 , λ_1 y la ecuación 27.

Los valores se obtienen de una interpolación $A_1 = 1,09652$ y $\lambda_1 = 0,9604$

$$\theta_{0,\text{esf}} = A_1 e^{-\lambda_1^2 \tau}$$

$$\theta_{0,\text{esf}} = 1,09652 e^{-0,9604^2 \cdot 0,067}$$

$$\theta_{0,\text{esf}} = 1,030$$

Para el este caso el factor adimensional de temperatura es 1,030

$$\frac{T_0 - 180^\circ\text{C}}{63^\circ\text{C} - 180^\circ\text{C}} = 1,030$$

$$T_0 = 68,54^\circ\text{C}$$

La temperatura resultante es la del centro del producto.

3.2.9 Flujo de calor en geometría esférica

Es importante saber el flujo de calor para los diferentes métodos con estos se puede determinar si el sistema está ganando o perdiendo energía.

3.2.9.1 Flujo de calor por conducción

Para determinar el flujo de transferencia de calor se deben utilizar las tablas de Heisler véase en el anexo H, sin embargo se debe encontrar el flujo de calor máximo con la ecuación 11, tomando en cuenta cómo cambia de temperatura del producto desde la temperatura inicial a la temperatura de los alrededores obteniendo de esta manera dicho valor.

$$Q_{\max} = m \cdot C_p \cdot (T_{\infty} - T_s)$$

$$m = \rho \cdot v$$

$$m = 1030 \text{ kg/m}^3 \cdot 5,23 \times 10^{-4} \text{ m}^3$$

$$m = 0,54 \text{ kg}$$

La masa está determinada para un tiempo de 1294 s

$$Q_{\max} = 170,40 \text{ W}$$

Para encontrar la relación adimensional de transferencia de calor se debe obtener primero los valores de Biot y Biot al cuadrado por Fourier, estas ecuaciones son condiciones para ingresar a las gráficas de Heisler y determinar la relación adimensional de transferencia de calor.

$$Bi^2 \cdot \tau = 7,29 \times 10^{-3}$$

En el anexo H se puede determinar el valor de la relación adimensional de transferencia de calor para este caso el valor es de 0,15.

$$\frac{Q_{\text{con}}}{Q_{\max}} = 0,15$$

$$Q_{\text{cod}} = 0,15 \cdot Q_{\max}$$

$$Q_{\text{cod}} = 8,52 \text{ W}$$

3.2.9.2 Flujo de calor por convección

Para determinar el flujo de calor por convección para la carne de cerdo se utiliza la ecuación 2, de la misma manera hay que tomar en cuenta cómo cambia la temperatura del producto desde la temperatura inicial hasta tomar la temperatura de los alrededores.

$$Q_{\text{cov}} = h_{\text{promedio}} \cdot A_{\text{cov}} \cdot (T_s - T_{\infty})$$

$$Q_{\text{cov}} = -33,04 \text{ W}$$

3.2.9.3 Flujo de calor por radiación

Para encontrar el flujo de calor por radiación se necesita el valor de la emisividad para el caso de cuerpos calientes, se puede observar en el anexo F y la constante de Boltzmann, para este caso es $\varepsilon = 0,93$ y $\sigma = 5,66 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$

Mediante la ecuación 3 se encontrará el flujo de calor por radiación.

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{\text{rad}} \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = -0,69 \text{ W}$$

3.2.9.4 Flujo total de calor en esferas

Para encontrar el flujo total se realizará la sumatoria del flujo por conducción, convección y radiación.

$$Q_T = Q_{\text{con}} + Q_{\text{cov}} + Q_{\text{rad}}$$

$$Q_T = 8,52 \text{ W} - 33,04 \text{ W} - 1,38 \text{ W}$$

$$Q_T = -25,9 \text{ W}$$

3.3 Cálculos térmicos para la carne de pollo

Para el cálculo de la transferencia de calor en la carne de pollo se tendrá que determinar, su característica térmica, el cálculo se lo realizará en régimen transitorio unidimensional y flujo natural, para geometrías planas, cilíndricas y esféricas.

Resumen de resultados de geometría plana para la carne de pollo.

3.3.1 Coeficiente de convección natural para geometría plana horizontal en la carne de pollo

Para el cálculo del coeficiente de convección se tiene las características térmicas del pollo como se aprecia en la figura 13, cuyas dimensiones son ancho 0,15 m, largo 0,2 m y espesor 0,07 m .Su peso es de 1 kg y un tiempo de cocción 45 min.

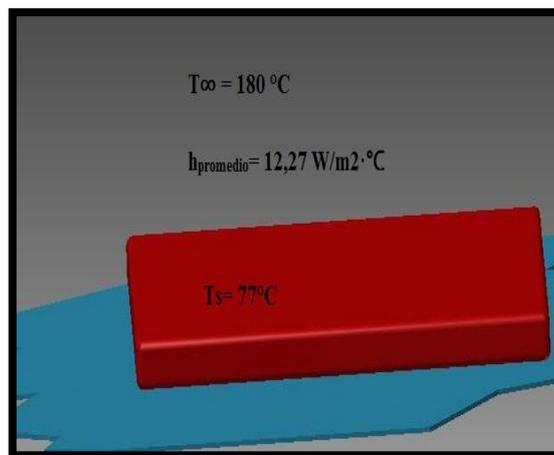


Figura 13. Condición inicial

Condición inicial.

$$L = 0,15 \text{ m} \times 0,2 \text{ m} \times 0,07 \text{ m}$$

$$T_{\infty} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_s = 77 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

Tabla de resultados 1. Valores de la convección natural para geometría plana

Número de Prandtl	$Pr = 0,669$
Longitud característica	$L_c = 0,042\text{m}$
Coefficiente de expansión volumétrica	$\beta = 9,70 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Número adimensional de Grashof	$Gr = 7,031 \times 10^5$
Número de Rayleigh de forma simplificada.	$Ra_L = 4,70 \times 10^5$
Número de Nusselt promedio.	$Nu_{\text{promedio}} = 0,54 \cdot Ra_L^{1/4}$ $Nu_{\text{promedio}} = 14,14$
Coefficiente convección promedio	$h_{\text{promedio}} = 12,27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$

3.3.2 Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría plana

Para la conducción en el producto cárnico se considera estado transitorio en placas planas como se observa la figura 14, las características térmicas del pollo se puede observar en el anexo C.

Condición inicial.

$$T_{\infty} = 180 \text{ °C}$$

$$T_s = 77 \text{ °C}$$

$$h_{\text{promedio}} = 12,27 \text{ W/m}^2 \cdot \text{°C}$$

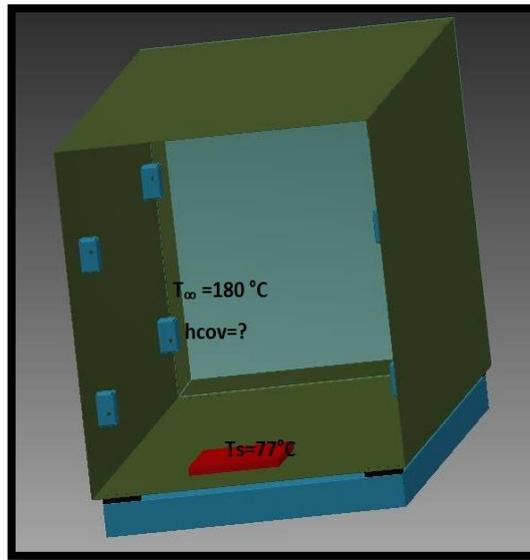


Figura 14. Geometría plana dentro de la cámara de cocción

Para el cálculo en superficies planas se considera un filete de peso 1 kg en un tiempo de 45 min véase el anexo E, tiempos para cada tipo de corte.

Tabla de resultados 2. Valores para geometría plana estado transitorio

La longitud característica.	$L_c = 0,019\text{m}$
Número de Biot	$Bi = 0,48$
Número Fourier	$\tau = 0,97$
Los valores se obtienen de una interpolación $A_1 = 1,06768$ $\lambda_1 = 0,64128$	
Temperatura adimensional	$\theta_{0,\text{pared}} = 0,72$
Temperatura en el centro del producto en estado transitorio unidimensional	$T_0 = 105,8^\circ\text{C}$

3.3.3 Flujo de calor en geometría plana

Tabla de resultados 3. Valores de flujo de calor para geometría plana

Flujo de calor por conducción	$Q_{\text{con}} = 27,16 \text{ W}$
Flujo de calor por convección	$Q_{\text{cov}} = -37,91 \text{ W}$
Flujo de calor por radiación	$Q_{\text{rad}} = -1,60 \text{ W}$
Flujo total de calor en geometrías planas	$Q_{\text{T}} = -12,35 \text{ W}$

3.3.4 Coeficiente de convección natural para cilindro horizontal

Otra forma geométrica posible del producto cárnico (pollo) es la cilíndrica esto se puede encontrar como embutidos o tal vez enrollados del producto con configuración geométrica similar a la que muestra la figura 15.

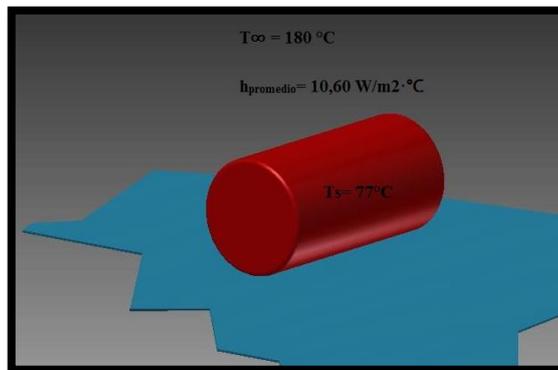


Figura 15. Condición inicial

Condición inicial

Diametro = 0,07 m

L = 0,2 m

$T_{\infty} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$

$T_s = 77 \text{ }^{\circ}\text{C}$

Tabla de resultados 4. Valores de la convección natural para geometría cilíndrica

Número de Prandtl	$Pr = 0,669$
Longitud característica	$L_c = D_{cil}$
Coefficiente de expansión volumétrica	$\beta = 9,70 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Número de Grashof.	$Gr_D = 3,2 \times 10^6$
Número de Rayleigh.	$Ra_D = 2,2 \times 10^6$
Número de Nusselt	$Nu_{promedio} = 0,53 \cdot Ra_L^{1/4}$ $Nu_{promedio} = 20,36$
Coefficiente de convección	$h_{promedio} = 10,60 \text{ W/m}^2 \cdot ^{\circ}\text{C}$

3.3.5 Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría cilíndrica

Para el cálculo de geometría cilíndrica de la carne de pollo se tiene las siguientes consideraciones:

Diámetro = 0,07 m

Longitud = 0,2 m para una cantidad de 1 kg del producto.

Temperatura del horno = 180 °C

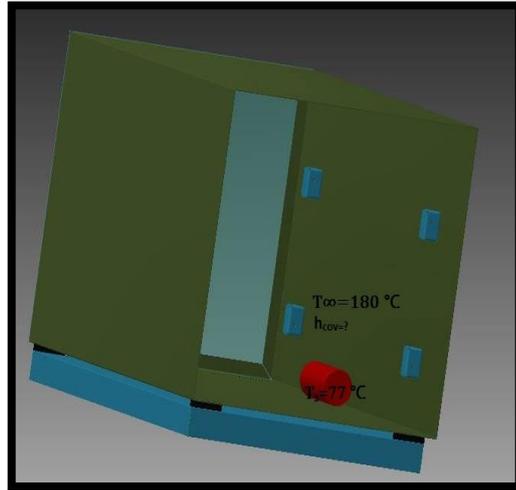


Figura 16. Geometría cilíndrica dentro de la cámara de cocción

Tabla de resultados 5. Valores para geometría cilíndrica estado transitorio

Número de Biot	$Bi = 0,39$
Número Fourier	$\tau = 0,23$
Temperatura adimensional.	$\theta_{0,\text{cil}} = 0,92$
En este caso los valores son directos de la tabla $A_1 = 1,0931$ y $\lambda_1 = 0,8516$	
Temperatura del centro del producto.	$T_0 = 85,24 \text{ }^{\circ}\text{C}$

3.3.6 Flujo de calor en geometría cilíndrica

Tabla de resultados 6. Valores de flujo de calor para geometría cilíndrica

Flujo de calor por conducción	$Q_{\text{cod}} = 24,19 \text{ W}$
Flujo de calor por convección	$Q_{\text{cov}} = -56,24 \text{ W}$
Flujo de calor por radiación	$Q_{\text{rad}} = -0,74 \text{ W}$
Flujo total de calor para geometrías cilíndricas	$Q_{\text{T}} = -40,23 \text{ W}$

3.3.7 Coeficiente de convección natural para esferas

Para el cálculo de transferencia de calor de geometría esférica como muestra la figura 17, se utilizará los siguientes datos diámetro de 0,15 m. Esto corresponde a un pollo entero.

Condición inicial

$$D_{\text{esf}} = 0,15 \text{ m}$$

$$T_{\infty} = 180 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\text{s}} = 77 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

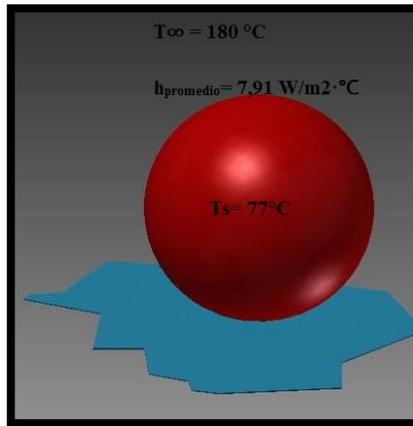


Figura 17. Condición inicial

Tabla de resultados 7. Valores de la convección natural para geometría esférica

Número de Prandtl	$Pr = 0,669$
Longitud característica para el caso de las esferas	$L_c = D_{esf}$
Coefficiente de expansión volumétrica	$\beta = 9,70 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$
Número de Grashof.	$Gr_D = 3,2 \times 10^7$
Número de Rayleigh	$Ra_D = 2,1 \times 10^7$
Número de Nusselt promedio	$Nu_{promedio} = 32,56$
Coefficiente de convección	$h_{promedio} = 7,91 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$

3.3.8 Temperatura media en estado transitorio unidimensional en geometría esférica

Con la obtención del factor de transferencia por convección se puede obtener la temperatura en centro del producto. La figura 18, muestra la configuración esférica del producto dentro de la cámara de cocción.

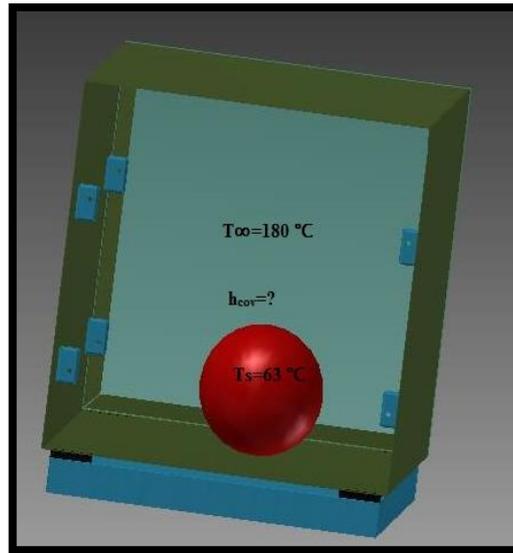


Figura 18. Geometría esférica dentro de la cámara de cocción

Condición inicial.

$$T_\infty = 180\text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_s = 77\text{ }^\circ\text{C}$$

$$h_{\text{promedio}} = 7,91\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$$

Tabla de resultados 8. Valores para geometría esférica en estado transitorio

Número de Biot Fourier.	$Bi = 0,4$
Número de Fourier.	$\tau = 0,11$
Los valores se obtienen directo de tablas $A_1 = 1,09652$ y $\lambda_1 = 0,9604$	
Temperatura adimensional	$\theta_{0,esf} = 0,98$
Temperatura resultante es la del centro del producto.	$T_0 = 78,20\text{ }^\circ\text{C}$

3.3.9 Flujo de calor en geometría esférica

Tabla de resultados 9. Valores de flujo de calor para geometría esférica

Flujo de calor por conducción	$Q_{con} = 10,83\text{ W}$
Flujo de calor por convección	$Q_{cov} = -57,58\text{ W}$
Flujo de calor por radiación	$Q_{rad} = -4\text{ W}$
Flujo total de calor para geometrías esféricas	$Q_T = -50,75\text{ W}$

3.4 Conclusiones del capítulo

- Se puede observar que el valor negativo de -37.91 W en el caso de la convección para la carne de pollo indica que el fluido está transfiriendo energía a la superficie del producto.
- La temperatura en el centro del producto toma valores entre 70 y 85 °C obtenidos una vez realizado el cálculo de los diferentes números adimensionales que simplifican la obtención de estos resultados.

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN DE LOS MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN PRODUCTOS CÁRNICOS

En el presente capítulo se realizará una verificación experimental en 20 muestras de carne de pollo y cerdo pudiéndose verificar si la temperatura es la adecuada para su cocción. Para lo cual se utilizara un horno de convencional a gas, un pirómetro infrarrojo, tablas para su comparación de temperatura y tiempo para cada producto y 20 kg de carne de cerdo y similar cantidad de carne de pollo.

El objetivo de la experimentación es verificar si los valores de las tablas del anexo E se asemejan a los valores reales tomados con el pirómetro en el proceso de cocción de la carne de pollo y cerdo.

4.1 Tiempo de precalentamiento del horno a gas

Para empezar con la parte experimental primero se debe tomar en cuenta un aspecto importante, el cual consiste en precalentar el horno a una temperatura de 180 °C en un rango de 60 min, ya que a esta temperatura según las investigaciones tiene lugar la cocción de los alimentos. Esta curva de precalentamiento del horno puede ser observada en la figura 19.

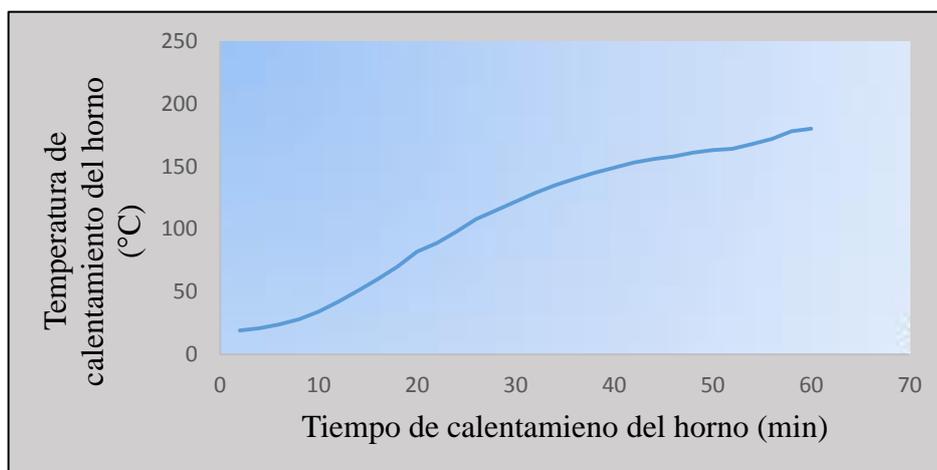


Figura 19. Gráfica de la curva de precalentamiento del horno

4.2 Resultados obtenidos para la carne de cerdo

4.2.1 Tiempo de calentamiento de la carne de cerdo

Después del precalentamiento del horno se ingresa la carne de cerdo a una temperatura de 180 °C, la carne ingresa a temperatura ambiente como muestra la figura 20 hasta llegar a la temperatura de cocción de 63 °C el tiempo aproximado para este caso es de 20 min, en la figura 21 se puede observar la curva de calentamiento del producto.



Figura 20. Carne de cerdo temperatura ambiente

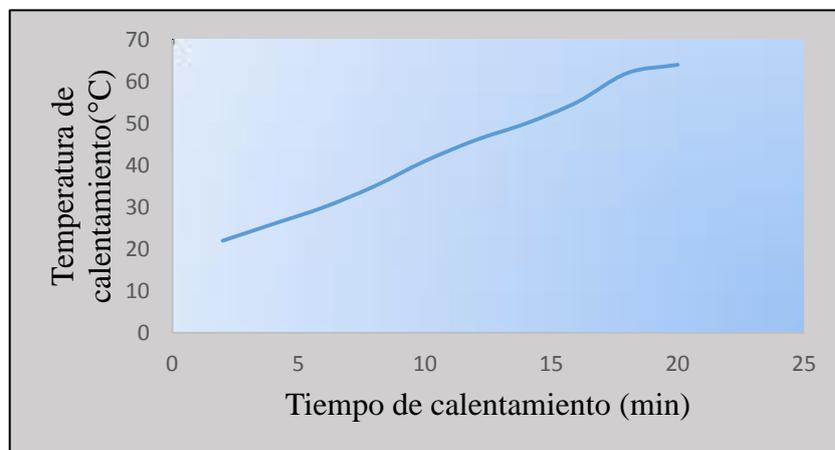


Figura 21. Tiempo de calentamiento de la carne de cerdo

4.2.2 Tiempo de cocción de la carne de cerdo

Cuando el producto haya alcanzado la temperatura de cocción de 63 °C se mantendrá en el interior del horno durante 40 min aproximadamente para su cocción y con la ayuda del pirómetro con un intervalo de 2 min respectivamente

se realizará las mediciones para verificar si la temperatura es la correcta para su cocción.

En la figura 22 también se puede observar como varía la temperatura de cocción tomada de las mediciones, respecto a la temperatura teórica del anexo E, que debería mantenerse constante hasta el final de la cocción.

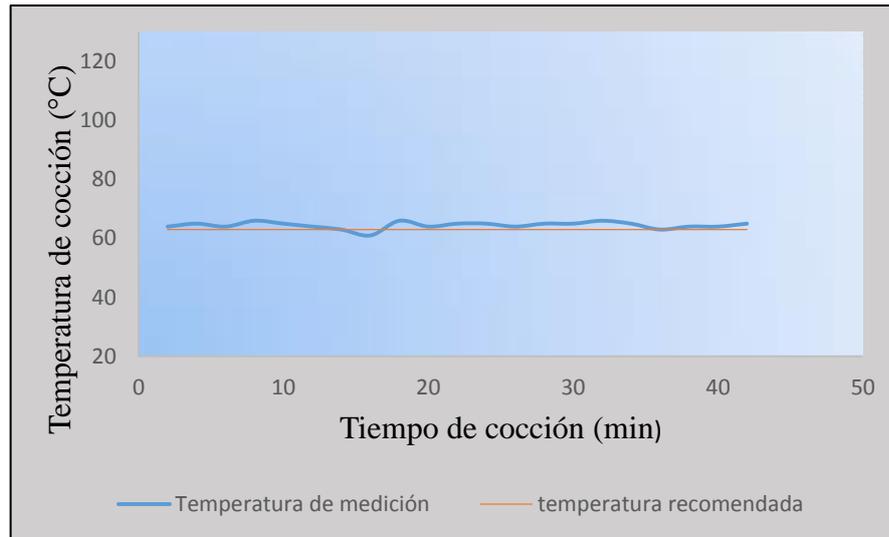


Figura 22. Tiempo de cocción de la carne de cerdo

4.2.3 Tiempo de cocción total para la carne de cerdo

Como se observa en la figura 23, la curva de cocción de la carne de cerdo se divide en dos partes, la primera es la curva referente al calentamiento del producto tiempo en el cual, este gana temperatura en la parte interna, que en un instante de tiempo se estabilizará al termino de 20 (min). El segundo proceso es la cocción del producto, para este caso el tiempo que se tarda es de aproximadamente 40 (min) a una temperatura de cocción cercana a los 63 °C. Al juntar los dos procesos el tiempo que tarda el producto en terminar su cocción es de 60 (min).

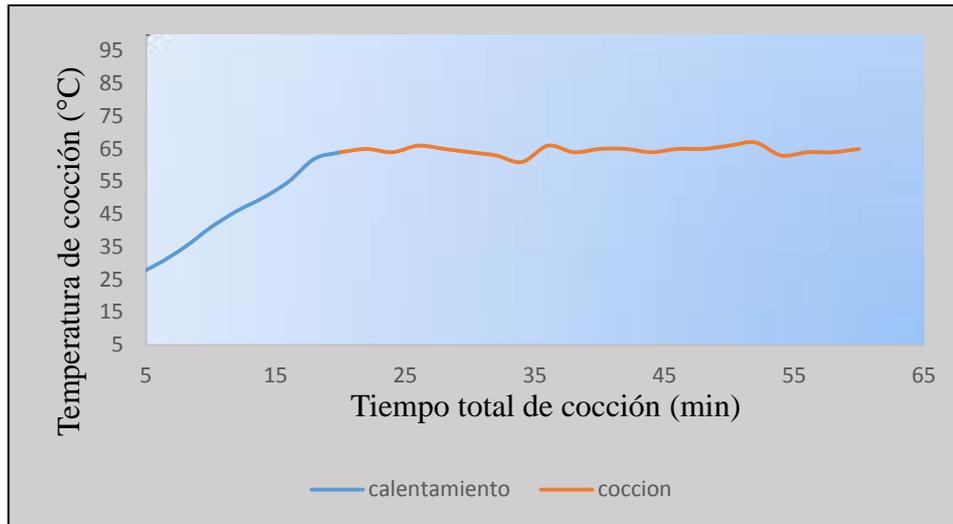


Figura 23. Curva total de cocción

- **Resultados de mediciones:**

Con las mediciones realizadas en la experimentación se tomó una muestra de las 20 realizadas para su mejor apreciación cuyos resultados estadísticos se pueden observar en la tabla de resultados 10.

Tabla de Resultados 10. Estadística de resultados de la carne de cerdo

X_i	f_i	$X_i \cdot f_i$	$X_i^2 \cdot f_i$	Error Absoluto (%)	Error Relativo (%)
61	1	61	3721	3.4	5.57
63	2	126	7938	1.4	2.22
64	7	448	28672	-0.4	-0.625
65	7	455	29575	-0.6	-0.92
66	3	198	13068	-1.6	-2.42

4.3 Resultados obtenidos para la carne de pollo

4.3.1 Tiempo de calentamiento para la carne de pollo

Después del precalentamiento del horno se ingresa la carne de pollo a una temperatura de 180 °C, la carne ingresa a temperatura ambiente hasta llegar a la temperatura de cocción de 77 °C el tiempo aproximado para este caso es de 25 min, en la figura 24 se puede observar la curva de calentamiento del producto.

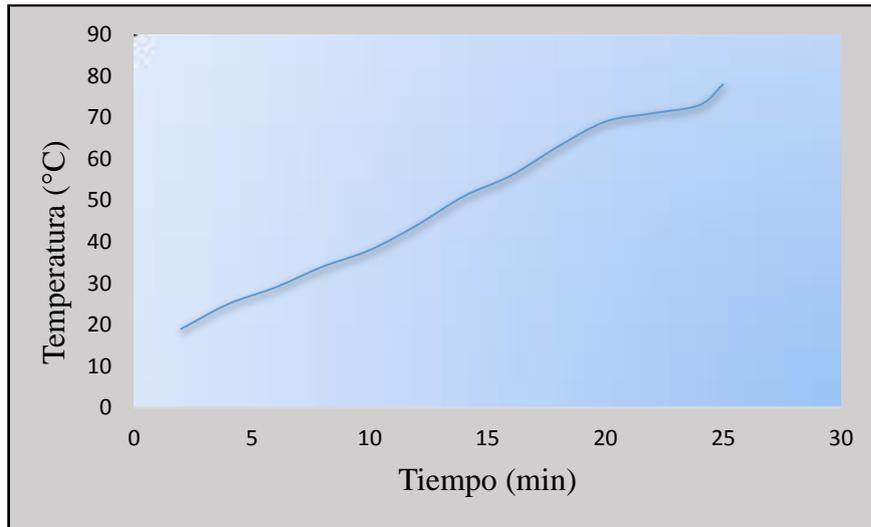


Figura 24. Tiempo de calentamiento de la carne de pollo

4.3.2 Tiempo de cocción para la carne de pollo

Cuando el producto haya alcanzado la temperatura de cocción de 63 °C se mantendrá en el interior del horno durante 45 min aproximadamente para su cocción y con la ayuda del pirómetro con un intervalo de 2 min respectivamente se realizará las mediciones para verificar si la temperatura es la correcta para su cocción.

Nótese que, con respecto a la carne de cerdo, la carne de pollo demora más en cocerse, esto es debido a que los valores de sus propiedades cambian.

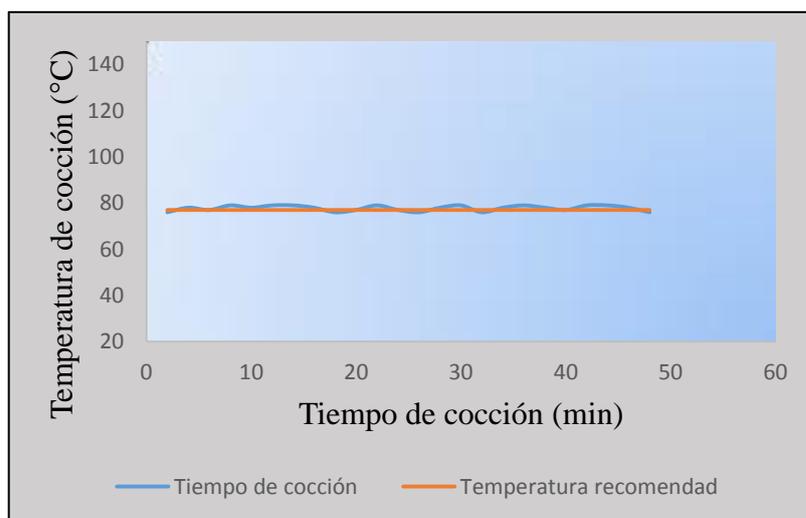


Figura 25. Gráfica de cocción de la carne de pollo

4.3.3 Tiempo de cocción total para la carne de pollo

Como se observa que en la figura 26, la curva total de cocción consta de dos etapas, la primera está determinada para el tiempo de calentamiento del producto tiempo en el cual el producto gana temperatura en su parte interna hasta estabilizarse, mientras que la segunda muestra que el producto tarda alrededor de 45 (min) a una temperatura determinada para luego mantenerse casi constante durante el tiempo que dura el proceso de cocción. Adicionalmente se mencionan valores como la temperatura a la que ingresa el producto al horno, que es un valor aproximado de 22 °C, hasta llegar a alrededor de 77 °C en un tiempo de cercano a los 25 (min).

En la zona de la cocción se mantiene a los mismos 77 °C alrededor de 45 (min). El resultado de la sumatoria de las dos zonas en la que se produce la cocción del pollo, arroja un valor aproximado de 70 (min), o lo que es lo mismo (1 h y 19 min) para el proceso total de cocción.

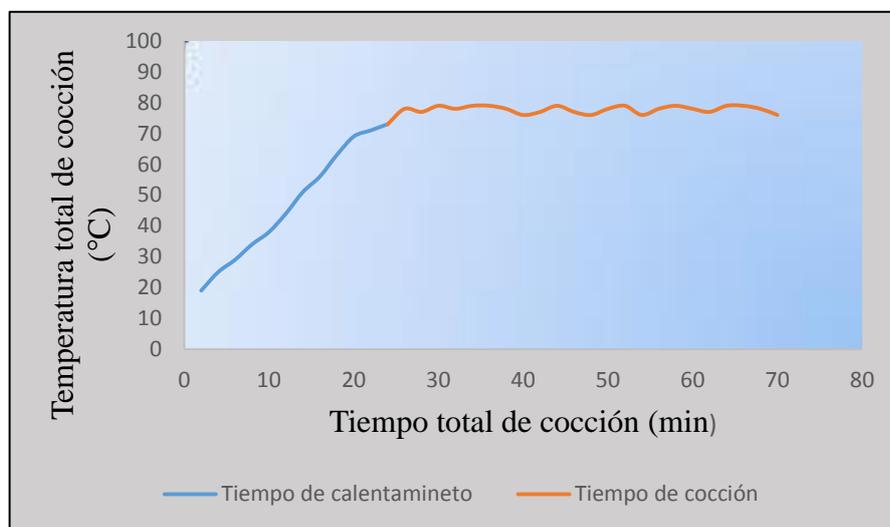


Figura 26. Tiempo total de cocción del pollo

- Resultados de mediciones:

Con las mediciones realizadas en la experimentación se tomó una muestra de las 20 realizadas para su mejor apreciación cuyos resultados estadísticos se pueden observar en la tabla de resultados 11.

Tabla de Resultados 11. Estadística de resultados de la carne de pollo

Xi	fi	Xi*fi	Xi²*fi	Error Absoluto (%)	Error Relativo (%)
76	5	380	28880	1.75	2.30
77	4	308	23716	0.75	0.97
78	7	546	42588	-0.25	-0.32
79	8	632	49928	-1.25	-1.58

4.4 Conclusiones del capítulo

- Los datos estadísticos arrojan un error de $\pm 2\%$ en relación a las temperaturas tabuladas para que ocurra el proceso de cocción de los productos cárnicos.
- Durante el proceso de cocción para el caso del cerdo se evidenció un error de lectura máximo de 3.4% y un mínimo de 1.6% debido a que fue necesario abrir el horno para realizar las mediciones de temperatura.

CONCLUSIONES

- Al aplicar los diferentes métodos de transferencia de calor a los productos cárnicos se consiguió determinar su tiempo y temperatura de cocción tomando en cuenta que para ello es necesario contar con un ambiente de trabajo a una temperatura cercana a los 180 °C, temperatura a la cual los productos completan los diferentes procesos de cocción.
- Mediante el proceso de experimentación se determinó que el tiempo de cocción para el caso del pollo se encuentra entre 45-50 min, que comparados con los valores del anexo A tabla 4 la variación es de 5 min, de idéntica manera para la carne de cerdo donde el tiempo de cocción es de 40-44 min valores que comparados con el anexo A tabla 6 reflejan una variación es de 4 min.
- Se determina el tiempo total de cocción para cada producto, en el caso del cerdo del tiempo total hasta culminar el proceso de cocción es de 1 hora, así mismo para el caso del pollo el tiempo es de 1 hora y 19 min.
- Para todas las geometrías el flujo total de calor por convección es negativo ya que en todos los casos la transferencia de calor se está realizando desde el fluido hacia el producto.
- Es importante considerar que existe un error en los valores obtenidos, esto debido a que para realizar las diferentes mediciones de temperatura es necesario extraer el producto del horno, produciéndose un cambio evidente de temperatura.

RECOMENDACIONES

- Las mediciones de temperatura se deben realizar en un ambiente cerrado con la finalidad de obtener valores que no se vean afectados por los cambios bruscos de temperatura ambiente.
- Es importante que el horno cuente con un pirómetro incorporado y evitar abrir sus puertas para realizar las mediciones y de este modo contar con valores más exactos.
- Errores de cálculo se deben a que siempre existirá diferentes interpretaciones en el momento de extraer valores de tablas y gráficos.
- Se debe tomar en cuenta que el horno debe estar a una temperatura alrededor de 180 °C en el momento que ingrese el producto al mismo, ya que esto hace que el producto empiece a cocerse desde el primer instante que se encuentre dentro del ambiente precalentado.

REFERENCIAS

- [1] p. I. A. y. I. A. Organización de las Naciones Unidas, «Producción y Sanidad Animal,» 26 abril 2016. [En línea]. Available: <http://www.fao.org/Ag/againfo/themes/es/meat/home.html>. [Último acceso: 22 septiembre 2016].
- [2] El Comercio, «En ocho provincias se concentra el mayor consumo de cárnicos,» *Lideres*, nº 905, p. 24, 2015.
- [3] «Revista énfasis alimentación,» 11 Noviembre 2012. [En línea]. Available: <http://www.alimentacion.enfasis.com/articulos/65628-consumo-carnico-nivel-mundial>. [Último acceso: 30 Noviembre 2016].
- [4] S. Castillo, P. Virdesa y J. Abril, «Simulación del proceso térmico de productos cárnicos cocidos aplicada al chopped,» Universidad Pública de Navarra, junio 1997. [En línea]. Available: http://www.acyja.com/documentos/Publicaciones/Revistas_pepe/AETJunio%201997.pdf. [Último acceso: 1 Diciembre 2016].
- [5] J. M. Kalmar, «UNICAFAM - Fundacion Universitaria Cafam,» 17 febrero 2013. [En línea]. Available: http://unicafam.bligoo.com.co/media/users/20/1035809/files/398696/T_cnicas_y_M_todos_de_Cocci_n.pdf. [Último acceso: 25 marzo 2016].
- [6] INEN, *CARNES Y PRODUCTOS CARNICOS DEFINICIONES (NTE INEN 1217:2012)*, Quito, Pichincha, 2012.
- [7] G. Carvajal, *VALOR NUTRICIONAL DE LA CARNE DE : RES, CERDO Y POLLO*, San Jose, 2001.
- [8] El Universo, «Consumo de pollo subió cinco veces más frente a 1990,» 12 mayo 2014.

- [9] ProExpansión, «Perú y Brasil son los países que más pollo consumen en América Latina,» 11 Noviembre 2014. [En línea]. Available: <http://proexpansion.com/es/articles/765-peru-y-brasil-son-los-paises-que-mas-pollo-consumen-en-america-latina>. [Último acceso: 1 Diciembre 2016].
- [10] Agencia ANE, «Radio Equinoccio.com,» 6 Enero 2014. [En línea]. Available: <http://radioequinoccio.com/inicio/item/4392-cada-ecuatoriano-consume-105-kilos-de-carne-de-cerdo.html>. [Último acceso: 1 Diciembre 2016].
- [11] J. Lagares, «Procesos de fabricacion de productos cárnicos de musculo entero V;Cocción,» *Metalquimia*, pp. 161-169, 14 febrero 2011.
- [12] A. Julieth, «SlideShare,» 22 mayo 2015. [En línea]. Available: http://www.elgourmet.cl/datos/metodos_de_coccion.php. [Último acceso: 22 septiembre 2016].
- [13] F. P. Incropera y D. P. DeWitt, Fundamentos de transfencia de calor, 4ta ed., Mexico: Pearson Educacion, 1999.
- [14] D. Arbolcerda, V. Valencia, J. Espinosa y O. Ochoa, «MÓDELO MATEMÁTICO PARA EL PROCESO TÉRMICO DE PRODUCTOS CARNICOS DE GEOMETRIA CILÍNDRICA,» *DYNA*, pp. 301-307, 2010.
- [15] «Respuestas y tips,» 22 Junio 2016. [En línea]. Available: <http://respuestas.tips/cuales-son-los-tipos-de-transferencia-del-calor/>. [Último acceso: 8 Diciembre 2016].
- [16] D. Q. Kern, Procesos de tranferencia de calor, México: Continental S.A, 1999.
- [17] R. M. d. l. S. Mella y J. Ramón Yanez, Concervacion de productos cárnicos por calor, Cuba: D-Instituto de investigaciones para la Industria Alimentaria, 2009.

- [18] E. María, «Cosumoteca,» 24 Octubre 2014. [En línea]. Available: <http://www.consumoteca.com/electrodomesticos/hornos-y-hornos-microondas/horno-de-gas/>. [Último acceso: 2 Diciembre 2016].
- [19] C. E. ORREGO ALZATE, *Procesamiento de Alimentos*, Primera ed., Manizales: Centro de Publicaciones Universidad Nacional de Colombia, 2003.
- [20] C. Yunus A y G. Afshin J, *Transferencia de Calor y Masa*, Mexico DF: McGraw-Hill, 2011.
- [21] A. G. VERDUCH, «ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS DE LA COCCIÓN RÁPIDA,» Instituto de Cerámica y Vidrio, C.S.I.C. Arganda del Rey (Madrid), [En línea]. Available: <http://boletines.secv.es/upload/198423387.pdf>. [Último acceso: 2 Marzo 2017].
- [22] Da-Wen Sun, *Thermal Food Processing*, New York: CRC press, 2012.
- [23] B. Karlekar y M. Desmond, *Transferencia de calor*, México: McGraw-Hill, 1994.
- [24] J. P. Holman, *Transferencia de Calor*, Madrid: McGRAW-HILL, 1998.
- [25] Betty Crocker, «Timetable for Roasting Meats,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.bettycrocker.com/how-to/tipslibrary/charts-timetables-measuring/timetable-roasting-meats>. [Último acceso: 2 Diciembre 2016].
- [26] B. A. Fricke y B. R. Becker, «UMKC Website,» 18 10 2001. [En línea]. Available: <http://b.web.umkc.edu/beckerb/publications/journals/thermophysical.pdf>. [Último acceso: 15 12 2016].
- [27] «Recipetips.com,» [En línea]. Available: <http://www.recipetips.com/kitchen-tips/t--907/pork-cooking-times.asp>.

[Último acceso: 22 Enero 2017].

- [28] [En línea]. Available: http://finbullet.fi/liitteet/8656_kayttoohje_eng_2a3.pdf.
- [29] [En línea]. Available: http://nhambiu.uem.mz/wp-content/uploads/2011/05/aula_9.pdf. [Último acceso: 25 Enero 2017].
- [30] S. Rahman, Food Properties handbook, United States of America: CRC prees, 2009.
- [31] D. J. Moran Quijije y E. V. Sangacha Robalino, «Diseño y simulacion de un horno vertical para el asado de un pollos parilleros,» *DSPACE*, p. 153, 06 08 2014.
- [32] R. L.Earle, «Operaciones Básicas de PROCESAMIENTO DE ALIMENTOS,» 20047 . [En línea].
- [33] J. D. Sosa Domínguez, «SLIDERPLAYER,» julio 2016. [En línea]. Available: <http://slideplayer.es/slide/10927911/>. [Último acceso: 24 diciembre 2016].
- [34] R. uitero, «Club de reposteria,» 16 Febrero 2014. [En línea]. Available: <http://clubdereposteria.com/pautas-para-hornear-temperaturas-del-horno/>. [Último acceso: 22 Enero 2017].

ANEXOS

ANEXO A Tablas de características de los alimentos

Tabla A 1. Características de la carne de pollo

Composición de la carne de pollo		
Características	Pollo sin piel	Pollo con piel
Humedad (%)	74,06 ± 0,09	69,47
Proteína (%)	20,0 ± 0,2	17,44
Grasa (%)	4,57 ± 0,07	11,85
Ceniza (%)	1,35 ± 0,02	1,19
Calorías (kcal/100g)	121 ± 1	177
Colesterol (mg/100g)	109 ± 2	142
Calcio (mg/100g)	16,5 ± 0,4	16,1
Hierro (mg/100g)	1,8 ± 0,09	1,76
Fosforo (%)	0,265 ± 0,004	0,23

Fuente: [7]

Tabla A2. Características de la carne de cerdo

Composición de la carne de cerdo		
Nutrientes	Cerdo crudo	Cerdo asado
Humedad (%)	70	50
Proteína (%)	20	24
Grasa (%)	7	23
Ca mg	8	8
P mg	210	250
Fe mg	2,5	2,5
Na mg	70	70
K mg	350	350
Tiamina mg	0,8	0,6
Riboflamina mg	0,2	0,2

Fuente: [7]

Tabla A 3. Tiempo y temperatura de cocción de la carne de res

Tiempo y temperatura de cocción en carne de res			
Nombre	Peso	Tiempo	Temperatura
Costilla sin hueso	3-4 lb	1,5-2 hr	145°F
	4-6 lb	2-2,5 hr	145°F
	6-8 lb	2,5-2,75 hr	145°F
Costilla con hueso	4-6 lb	1.5-2 hr	145°F
	6-8 lb	2-2,5 hr	145°F
	8-10 lb	2,5-2,75 hr	145°F
Lomo asado	2-3 lb	35-40 min	145°F
	4-5 lb	50-60 min	145 °F
Tri-tip	1,5-2 lb	30-40 min	145 °F
Punta redonda	3-4 lb	1,75 - 2 hr	145 °F
	4-6 lb	2-2,5 hr	145 °F
	6-8 lb	2,5-3 hr	145 °F
Rump	2-4 lb	1,5-2 hr	145 °F
Fondo redondo	3-4 lb	1,5-2 hr	145 °F
Ojo redondo asado	2-3 lb	1,2-1,75 hr	145 °F
Brisket fresco	2.5-4 lb	2,5-3 hr	170 °F
Brisket en conserva	2,3-3,5 lb	2,5-3,5 hr	170 °F
	3,5-5 lb	3,5-4,5 hr	170 °F

Fuente: [25]

Tabla A 4. Tiempo y temperatura de cocción en aves

Tiempo y temperatura de cocción en aves			
Nombre	Peso	Tiempo	Temperatura
Pollo			
Pechuga	2 lb	35-45 min	165 °F
Entero	3-4 lb	1,5-2 hr	165 °F
Pato			
Entero	3,5-4 lb	2 hr	165 °F
	5-5,5 lb	3 hr	165 °F
Ganso			
Entero	7-9 lb	2,5-3 hr	165 °F
	9-11 lb	3-3,5 hr	165 °F
	11-13 lb	3,5-4 hr	165 °F
Pavo			
Entero	8-12 lb	2,75-3 hr	165 °F
	12-14 lb	3-3,75 hr	165 °F
	14-18 lb	3,75-4,25 hr	165 °F
	18-20 lb	4,25-4,5 hr	165 °F
	20-24 lb	4,5-5 hr	165 °F
Pechuga	2-4 lb	2,5-3 hr	165 °F
	3-4 lb	3-3,5 hr	165 °F
	5-7 lb	3,4-4 hr	165 °F

Fuente: [25]

Tabla A 5. Tiempo y temperatura de cocción de la ternera.

Tiempo y temperatura de cocción de la ternera			
Nombre	Peso	Tiempo	Temperatura
Lomo asado	3-4 lb	1,75-2,25 hr	155 °F
Asado de costilla	4-5 lb	1,5-2,25 hr	160 °F

Fuente: [25]

Tabla A 6. Tiempo y temperatura de cocción cerdo

Tiempo y temperatura de cocción del cerdo			
Nombre	Peso	Tiempo	Temperatura
Lomo asado	2-5 lb	20 min/lb	145 °F
Asado de corona	6-10 lb	20 min/lb	145 °F
Butt asado	3-6 lb	21 min/lb	145 °F
Filete lomo		0,75 -1 hr	145 °F
Ham		15-20 min/lb	140 °F
Pierna		15-20 min/lb	145 °F

Fuente: [25]

Tabla A 7. Tiempo y temperatura de cocción de la ternera

Tiempo y temperatura de cocción del cordero			
Nombre	Peso	Tiempo	Temperatura
Pierna con hueso	5-7 lb	20-30 min/lb	160°F
	7-9 lb	20-25 min/lb	160°F
Pierna sin hueso	4-7 lb	25-30 min/lb	160°F
Hombro asado	3-4 lb	40-45 min/lb	160°F

Fuente: [25]

ANEXO B. Ecuaciones para las propiedades de los alimentos a diferentes temperaturas.

Tabla B 2. Ecuaciones de propiedades térmicas para componentes de alimentos (- 40 °C ≤ t ≤ 150 °C)

Thermal Propierty	Food Component	Thermal Property Model
Thermal Conductivity (W/(m-K))	Protein	$k = 1.7881 \times 10^{-1} + 1.1958 \times 10^{-3}t - 2.7178 \times 10^{-6}t^2$
	Fat	$k = 1.8071 \times 10^{-1} - 2.7604 \times 10^{-3}t - 1.7749 \times 10^{-7}t^2$
	Carbohydrate	$k = 2.0141 \times 10^{-1} + 1.3874 \times 10^{-3}t - 4.3312 \times 10^{-6}t^2$
	Fiber	$k = 1.8331 \times 10^{-1} + 1.2497 \times 10^{-3}t - 3.1683 \times 10^{-6}t^2$
	ash	$k = 3.2962 \times 10^{-1} + 1.4011 \times 10^{-3}t - 2.9069 \times 10^{-6}t^2$
Thermal Difusivity m^2/s	Protein	$\alpha = 6.8714 \times 10^{-8} + 4.7578 \times 10^{-10}t - 1.4646 \times 10^{-12}t^2$
	Fat	$\alpha = 9.8777 \times 10^{-8} - 1.2569 \times 10^{-10}t - 3.8286 \times 10^{-14}t^2$
	Carbohydrate	$\alpha = 8.0842 \times 10^{-8} + 5.3052 \times 10^{-10}t - 2.3218 \times 10^{-12}t^2$
	Fiber	$\alpha = 7.3976 \times 10^{-8} + 5.1902 \times 10^{-10}t - 2.2202 \times 10^{-12}t^2$
	ash	$\alpha = 1.2461 \times 10^{-7} + 3.7321 \times 10^{-10}t - 1.2244 \times 10^{-12}t^2$
Density Kg/m^3	Protein	$\rho = 1.3299 \times 10^3 - 5.1840 \times 10^{-1}t$
	Fat	$\rho = 9.2559 \times 10^3 - 4.1757 \times 10^{-1}t$
	Carbohydrate	$\rho = 1.5991 \times 10^3 - 3.1046 \times 10^{-1}t$
	Fiber	$\rho = 1.3115 \times 10^3 - 3.6589 \times 10^{-1}t$
	ash	$\rho = 2.4238 \times 10^3 - 2.8063 \times 10^{-1}t$
Specifie Heat J/(Kg-K)	Protein	$Cp = 2.0082 \times 10^3 + 1.2089t - 1.3129 \times 10^{-3}t^2$
	Fat	$Cp = 1.9842 \times 10^3 + 1.4733t - 4.8008 \times 10^{-3}t^2$
	Carbohydrate	$Cp = 1.5488 \times 10^3 + 1.9625t - 5.9399 \times 10^{-3}t^2$
	Fiber	$Cp = 1.8459 \times 10^3 + 1.8306t - 4.6509 \times 10^{-3}t^2$
	ash	$Cp = 1.0926 \times 10^3 + 1.8896t - 3.6817 \times 10^{-3}t^2$

Fuente: [26]

Tabla A 8. Coeficientes usados para solución aproximada utilizados de un término de la conducción de calor unidimensional

Bi	<i>Pared plana</i>		<i>Cilindro</i>		<i>Esfera</i>	
	λ_1	A_1	λ_1	A_1	λ_1	A_1
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239
0.1	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298
0.2	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592
0.3	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0931	1.0528	1.1164
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713
0.7	0.7506	1.0918	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5995	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202
5.0	1.3138	1.2403	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	2.7654	1.8920
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249
20.0	1.4961	1.2699	2.2880	1.5919	2.9857	1.9781
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990
∞	1.5708	1.2732	2.4048	1.6021	3.1416	2.0000

Fuente: [20]

ANEXO C. Valores de propiedades propias de los alimentos

Tabla C. Propiedades de los alimentos

Alimento	Contenido de agua, % (masa)	Temperatura, T °C	Densidad, ρ kg/m ³	Conductividad térmica, k W/m · °C	Difusividad térmica, α m ² /s	Calor específico, c_p kJ/kg · K
Frutas/Vegetales						
Manzana, jugo de	87	20	1 000	0.559	0.14×10^{-6}	3.86
Manzanas	85	8	840	0.418	0.13×10^{-6}	3.81
Manzanas secas	41.6	23	856	0.219	0.096×10^{-6}	2.72
Chabacanos secos	43.6	23	1 320	0.375	0.11×10^{-6}	2.77
Plátanos frescos	76	27	980	0.481	0.14×10^{-6}	3.59
Brócoli	—	-6	560	0.385	—	—
Moras frescas	92	0-30	1 050	0.545	0.13×10^{-6}	3.99
Higos	40.4	23	1 241	0.310	0.096×10^{-6}	2.69
Toronja, jugo de	89	20	1 000	0.567	0.14×10^{-6}	3.91
Duraznos	89	2-32	960	0.526	0.14×10^{-6}	3.91
Ciruelas	—	-16	610	0.247	—	—
Papas	78	0-70	1 055	0.498	0.13×10^{-6}	3.64
Pasas	32	23	1 380	0.376	0.11×10^{-6}	2.48
Carnes						
Res, bistec de	67	6	950	0.406	0.13×10^{-6}	3.36
Res, carne magra de	74	3	1 090	0.471	0.13×10^{-6}	3.54
Res, carne grasosa de	0	35	810	0.190	—	—
Res, hígado de	72	35	—	0.448	—	3.49
Gatos, alimento para	39.7	23	1 140	0.326	0.11×10^{-6}	2.68
Pollo, pechuga de	75	0	1 050	0.476	0.13×10^{-6}	3.56
Perros, alimento para	30.6	23	1 240	0.319	0.11×10^{-6}	2.45
Bacalao	81	3	1 180	0.534	0.12×10^{-6}	3.71
Salmón	67	3	—	0.531	—	3.36
Jamón	71.8	20	1 030	0.480	0.14×10^{-6}	3.48
Cordero	72	20	1 030	0.456	0.13×10^{-6}	3.49
Puerco, carne magra	72	4	1 030	0.456	0.13×10^{-6}	3.49
Pavo, pechuga de	74	3	1 050	0.496	0.13×10^{-6}	3.54
Tenera	75	20	1 060	0.470	0.13×10^{-6}	3.56
Otros						
Mantequilla	16	4	—	0.197	—	2.08
Chocolate, pastel de	31.9	23	340	0.106	0.12×10^{-6}	2.48
Margarina	16	5	1 000	0.233	0.11×10^{-6}	2.08
Leche descremada	91	20	—	0.566	—	3.96
Leche entera	88	28	—	0.580	—	3.89
Olivo, aceite de	0	32	910	0.168	—	—
Cacahuete, aceite de	0	4	920	0.168	—	—
Agua	100	0	1 000	0.569	0.14×10^{-6}	4.217
	100	30	995	0.618	0.15×10^{-6}	4.178
Pastel blanco	32.3	23	450	0.082	0.10×10^{-6}	2.49

Fuente: [20]

ANEXO D. Calor específicos de varios alimentos

Calores específicos para varios alimentos

Alimento	% agua	Calor específico (KJ/Kg°C)	
		Debajo punto	Encima punto de congelación (0-100°)
Atún	70	1.720	3.180
Pescado frito ²	60		3.012
Pescado fresco ²	80		3.598
Pescado seco, salado ²	16 a 20		1.715 a 1.841
Tocino fresco ²	57		2.010
Carne de cerdo grasa ²	39		2.594
Carne de cerdo magra ²	57		3.054
Carne de res, grasa	51	1.470	2.887
Carne de res, magra ²	72		3.431
Salchicha frankfurt	60	2.35	3.73
Pollo fresco	74	1.55	3.31
Aguacate	94	2.05	3.81
Ciruela ²	77		3.52
Limón	89.3	1.93	3.85
Manzana	84	1.85	3.6
Mango	93	1.993	3.77
Naranja	87.2	1.93	3.77
Pera	83.5	1.99	3.60
Plátano	74.8	1.76	3.35
Alcachofa ²	90		3.891
Apio	93.7	2.01	3.98
Cebolla ²	80 a 90		3.598 a 3.891
Cebolla seca ²	3.3		1.966
Hongos frescos ²	90		3.933
Hongos secos	30		2.343
Lechuga ²	94.0	2.01	4.02
Papa	75		3.515
Papa cocida ²	80		3.640
Papa seca ²	6.1		1.715
Repollo	92.4	1.97	3.94
Repollo seco ²	5.4		2.176
Tomate	94	2.01	3.98
Zanahoria	88.2	1.9	3.7

• Entre 0 y 100°C.
(1) Hayes ,1992; (2) Rahman, 1995.

Fuente: [20]

ANEXO E. Valores de tiempos y temperaturas

Los Tiempos Y Temperaturas De Cocción CERDO				
Carne De Cerdo Al Horno O Asado A 350 ° F				
Tipo de cerdo	Cortar la carne de cerdo	Peso	Carne Termómetro Temperatura	Aproximada Tiempo de cocción (minutos por libra)
carne de cerdo fresca	asado de la corona	6-10 lbs.	145 ° F	12 minutos
	Centro de asado de lomo (con hueso)	3-5 lbs.	145 ° F	20 minutos
	Sin hueso asado de lomo superior	2-4 lbs.	145 ° F	20 minutos
	lomo de la cuchilla o solomillo	3-4 lbs.	145 ° F	27-32 minutos
	lomo de laminado	3-5 lbs.	145 ° F	35-40 minutos
	Toda la pierna (jamón fresco, con hueso)	12-16 lbs.	145 ° F	15 minutos
	Toda la pierna (jamón fresco, laminado)	10-14 lbs.	145 ° FF	20 minutos
	La mitad de la pierna (con hueso)	5-8 lbs.	145 ° F	22-25 minutos
la mitad de la pierna (pierna o parte de cabeza)	3-4 lbs.	145 ° F	22-25 minutos	
Boston butt	3-6 lbs.	145 ° F	20 minutos	
hombro Boston	4-6 lbs.	145 ° F	20 minutos	
Solomillo (asado a 425 ° - 450 ° F)	1/2 - 1 1/2 lbs.	145 ° F	20-27 minutos en total	
hombro de picnic	5-8 lbs.	145 ° F	25-30 minutos	
hombro de picnic laminado	3-5 lbs.	145 ° F	25 minutos	
Cojín de hombro del estilo	3-5 lbs.	145 ° F	30-35 minutos	
Costillares	3 lbs.	Oferta	1 1/2 - 2 horas totales	

ANEXO E. Valores de tiempos y temperaturas

Los Tiempos Y Temperaturas De Cocción POLLO				
Al Horno O Asado De Pollo				
Tipo de pollo entero	La temperatura del horno	Peso	Tiempo aproximado de cocción	
			sin relleno	Relleno
Pollo (entero)	350 ° F	2 1/2 - 3 lbs.	1 1/4 - 1 1/2 horas	1 1/2 - 1 3/4 horas
Pollo (entero)	350 ° F	3 - 4 lbs.	1 1/2 - 1 3/4 horas	1 3/4 - 2 horas
Pollo (entero)	350 ° F	4 - 6 lbs.	1 3/4 - 2 horas	2 - 2 1/4 horas
Gallina de Cornualles	350 ° F	1 - 2 lbs.	1 - 1 1/4 horas	1 1/4 - 1 1/2 horas
Capón	325 ° F	5 - 6 lbs.	1 3/4 - 2 horas	2 1/2 - 3 horas
Capón	325 ° F	6 - 8 lbs.	2 1/4 - 3 1/2 horas	3 - 4 horas

Nota: Comience con el pollo a temperatura de refrigerador. Retire el pollo del horno cuando el termómetro de carne lee 175 ° - 180 ° F; la temperatura seguirá aumentando a medida que las gradas de pollo.

Fuente: [27]

ANEXO F. Valor de emisividad de productos calientes

Material	Emissivity	Material	Emissivity
Aluminum	0.30	Iron	0.70
Asbestos	0.95	Lead	0.50
Asphalt	0.95	Limestone	0.98
Basalt	0.70	Oil	0.94
Brass	0.50	Paint	0.93
Brick	0.90	Paper	0.95
Carbon	0.85	Plastic	0.95
Ceramic	0.95	Rubber	0.95
Concrete	0.95	Sand	0.90
Copper	0.95	Skin	0.98
Dirt	0.94	Snow	0.90
Frozen food	0.90	Steel	0.80
Hot food	0.93	Textiles	0.94
Glass(plate)	0.85	Water	0.93
Ice	0.98	Wood	0.94

Fuente: [28]

ANEXO G. Propiedades del aire a 1 atm

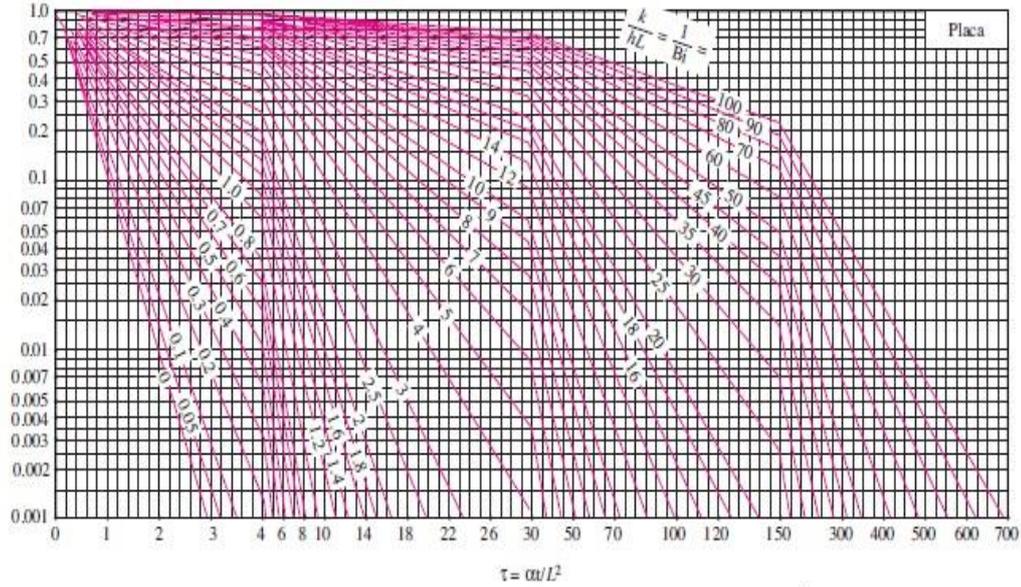
Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., T, °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k, W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1000	0.2772	1184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1500	0.1990	1234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2000	0.1553	1264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Fuente: [20]

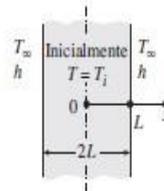
ANEXO H. Tablas de Heisler

Tablas de Heisler para placas planas

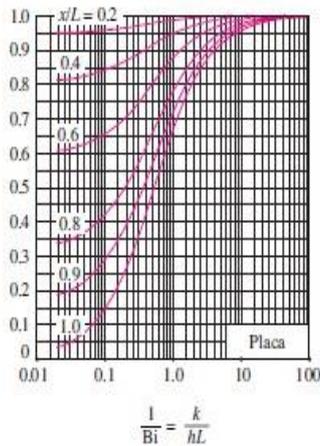
$$\theta_o = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$



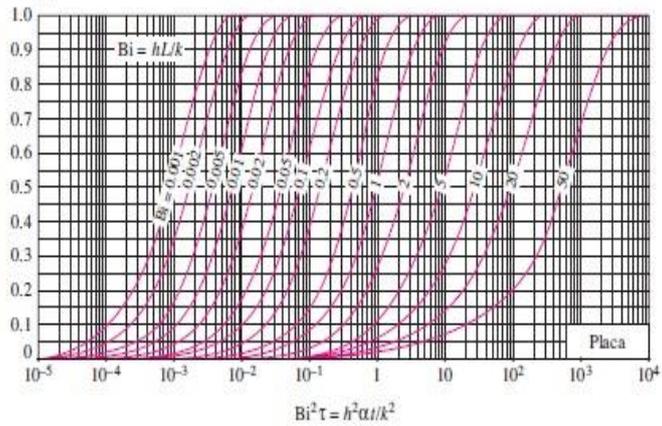
a) Temperatura del plano medio (tomado de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating". *Trans. ASME* 69, 1947, págs. 227-36. Reimpreso con autorización de ASME International).



$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty}$$



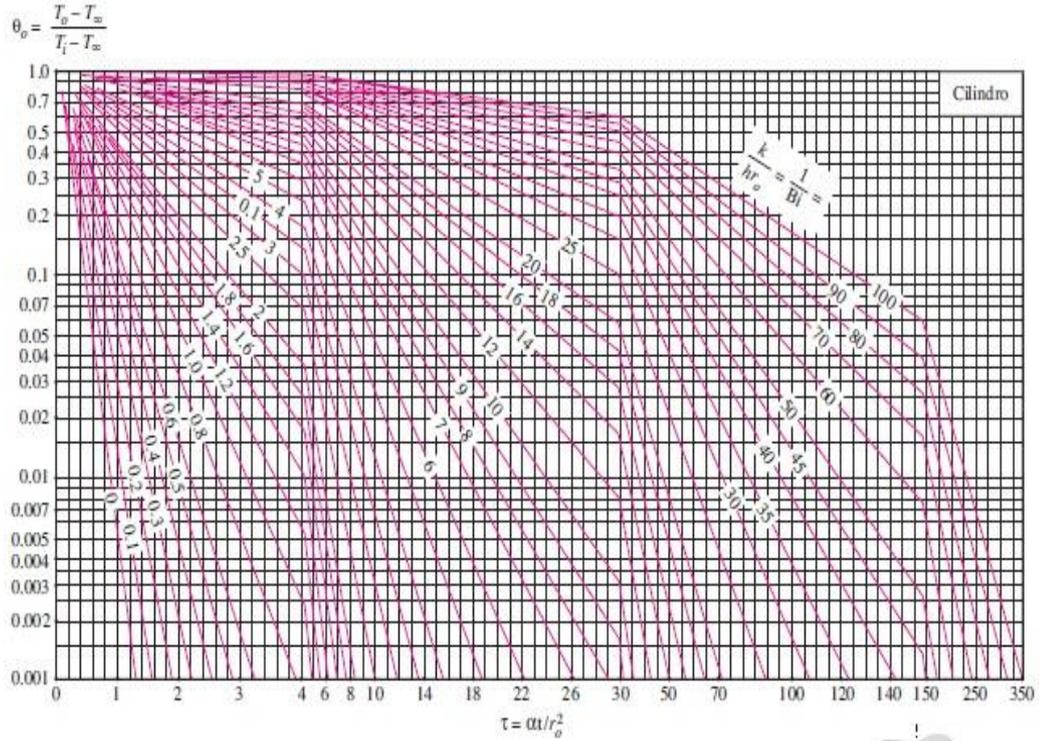
$$\frac{Q}{Q_{max}}$$



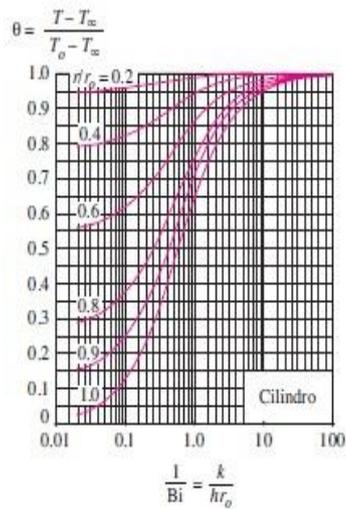
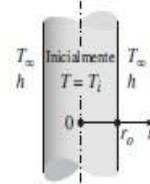
b) Distribución de temperatura (tomado de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating". *Trans. ASME* 69, 1947, págs. 227-36. Reimpreso con autorización de ASME International).

c) Transferencia de calor (tomado de H. Gröber *et al.*)

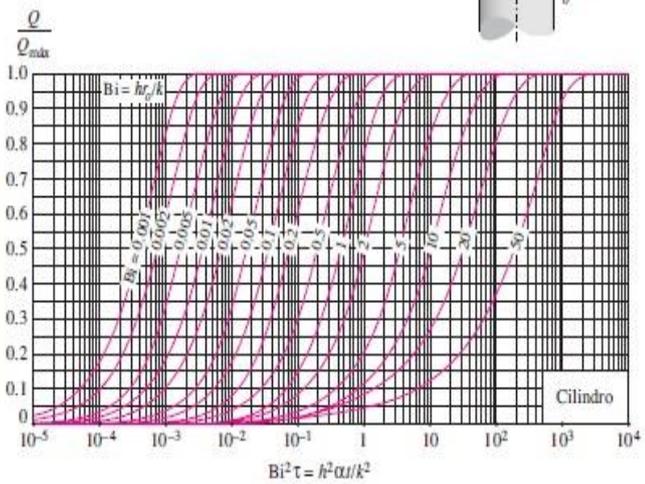
Tablas de Heisler para cilindros



a) Temperatura de la línea central (tomado de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating". *Trans. ASME 69*, 1947, págs. 227-36. Reimpreso con autorización de ASME Internacional).



b) Distribución de temperaturas (tomado de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating". *Trans. ASME 69*, 1947, págs. 227-36. Reimpreso con autorización de ASME Internacional).

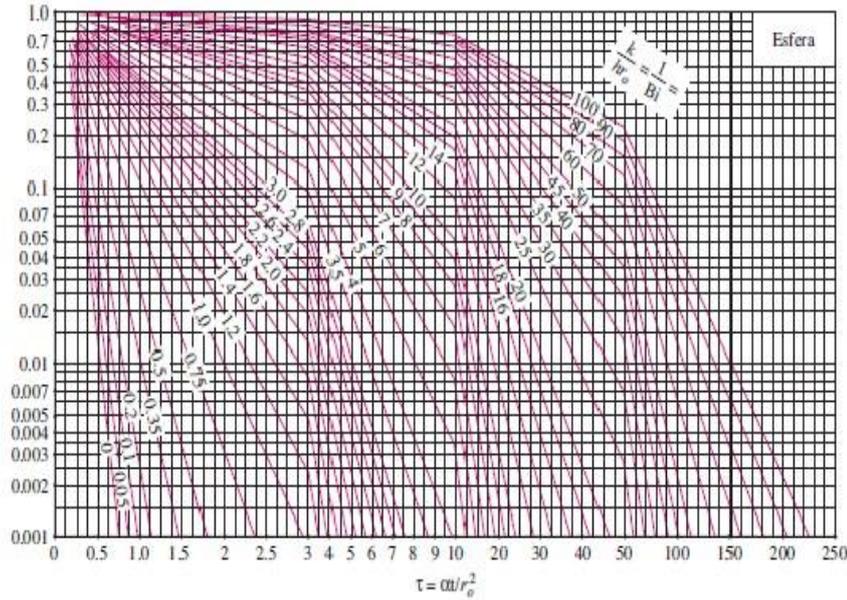


c) Transferencia de calor (tomado de H. Gröber *et al.*)

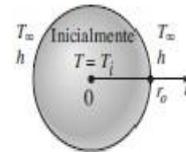
Fuente: [20]

Tablas de Heisler para esferas

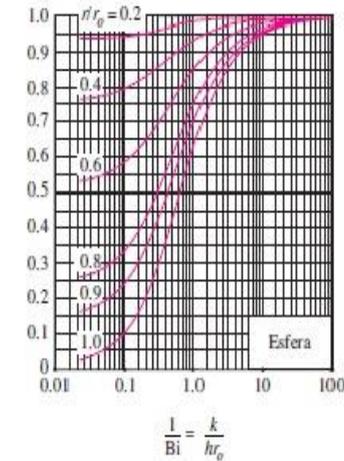
$$\theta_o = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$



a) Temperatura en el centro (tomado de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating". *Trans. ASME* 69, 1947, págs. 227-36. Reimpreso con autorización de ASME Internacional).

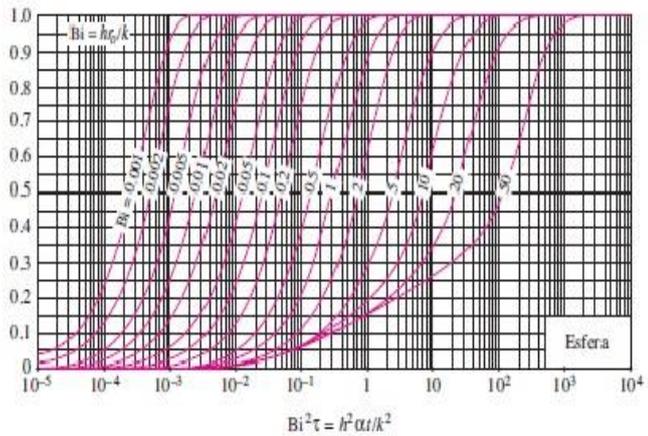


$$\theta = \frac{T - T_\infty}{T_o - T_\infty}$$



b) Distribución de temperaturas (tomado de M. P. Heisler, "Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating". *Trans. ASME* 69, 1947, págs. 227-36. Reimpreso con autorización de ASME Internacional).

$$\frac{Q}{Q_{\text{máx}}}$$



c) Transferencia de calor (tomado de H. Gröber *et al.*)

Fuente: [20]

ANEXO I. Constantes para paredes planas, cilindros y esferas

Bi	<i>Pared plana</i>		<i>Cilindro</i>		<i>Esfera</i>	
	λ_1	A_1	λ_1	A_1	λ_1	A_1
0.01	0.0998	1.0017	0.1412	1.0025	0.1730	1.0030
0.02	0.1410	1.0033	0.1995	1.0050	0.2445	1.0060
0.04	0.1987	1.0066	0.2814	1.0099	0.3450	1.0120
0.06	0.2425	1.0098	0.3438	1.0148	0.4217	1.0179
0.08	0.2791	1.0130	0.3960	1.0197	0.4860	1.0239
0.1	0.3111	1.0161	0.4417	1.0246	0.5423	1.0298
0.2	0.4328	1.0311	0.6170	1.0483	0.7593	1.0592
0.3	0.5218	1.0450	0.7465	1.0712	0.9208	1.0880
0.4	0.5932	1.0580	0.8516	1.0931	1.0528	1.1164
0.5	0.6533	1.0701	0.9408	1.1143	1.1656	1.1441
0.6	0.7051	1.0814	1.0184	1.1345	1.2644	1.1713
0.7	0.7506	1.0918	1.0873	1.1539	1.3525	1.1978
0.8	0.7910	1.1016	1.1490	1.1724	1.4320	1.2236
0.9	0.8274	1.1107	1.2048	1.1902	1.5044	1.2488
1.0	0.8603	1.1191	1.2558	1.2071	1.5708	1.2732
2.0	1.0769	1.1785	1.5995	1.3384	2.0288	1.4793
3.0	1.1925	1.2102	1.7887	1.4191	2.2889	1.6227
4.0	1.2646	1.2287	1.9081	1.4698	2.4556	1.7202
5.0	1.3138	1.2403	1.9898	1.5029	2.5704	1.7870
6.0	1.3496	1.2479	2.0490	1.5253	2.6537	1.8338
7.0	1.3766	1.2532	2.0937	1.5411	2.7165	1.8673
8.0	1.3978	1.2570	2.1286	1.5526	2.7654	1.8920
9.0	1.4149	1.2598	2.1566	1.5611	2.8044	1.9106
10.0	1.4289	1.2620	2.1795	1.5677	2.8363	1.9249
20.0	1.4961	1.2699	2.2880	1.5919	2.9857	1.9781
30.0	1.5202	1.2717	2.3261	1.5973	3.0372	1.9898
40.0	1.5325	1.2723	2.3455	1.5993	3.0632	1.9942
50.0	1.5400	1.2727	2.3572	1.6002	3.0788	1.9962
100.0	1.5552	1.2731	2.3809	1.6015	3.1102	1.9990
∞	1.5708	1.2732	2.4048	1.6021	3.1416	2.0000

Fuente: [20]

ANEXO J. Muestras del producto y toma de datos

Imágenes de las pruebas en el horno



a) Peso de la pechuga de pollo

b) Peso de la carne de pollo



c) Peso de la pechuga de cerdo

d) Peso de la carne de cerdo



e) termómetro infrarrojo utilizado para mediciones



f) Lectura de la temperatura ambiente de la carne de pollo



g) 20 de muestras de 1kg de carne de pollo para la experimentación



h) 20 de muestras de 1kg de carne de cerdo para la experimentación



i) Preparación de los dos productos antes de ingresarlo al horno



j) Preparación del pollo para ingresarlo al horno



k) Horno utilizado en la experimentación

ANEXO K. Certificado de aprobación para el termómetro infrarrojo



CERTIFICADO DE CALIBRACION

Certificado N.: LPEC - PE - 2017 - 397
Fecha de calibración: 2017 - JUNIO - 06
Instrumento: INFRARED TEMPERATURE METER
Marca: SMART ELECTRIC
Modelo o tipo: S-GUN
Serie: 300100200
Rango: *****
División de escala: *****
Clase: Digital
Declaración de Conformidad: Los errores determinados en la calibración del equipo de propósito general se encuentran dentro de los límites de errores máximos permitidos, EMP, para Tipo Analógico y Digital.
Localización: QUITO
Observaciones: Adhesivo N°: 84Z
Solicitante: HE-1
Dirección: AV.GRAN COLOMBIA Y QUECERAS DEL MEDIO

El Laboratorio de Metrología de Ala de Transportes N° 11, realizó la calibración de equipo arriba descrito, el Laboratorio de Propósito General LPGC, utilizando Patrones de Referencia que mantienen trazabilidad a patrones internacionales, utilizando procedimientos reproducidos que se han desarrollado dentro de este laboratorio de acuerdo a los requerimientos de la norma NTE INEN ISO/IEC 17025:2006, y IEC61010.

Los resultados de calibración y su incertidumbre se considera un nivel de confianza del 95 % y un factor de cobertura $K=2$, y son parte de este documento y se refieren al momento y condiciones en que se realizó la calibración.

Este laboratorio no se responsabiliza de los perjuicios que pueda ocasionar el uso inadecuado del equipo calibrado.

El transporte del equipo hacia y desde el laboratorio es responsabilidad del cliente.

El usuario está obligado a tener el equipo recalibrado en intervalos apropiados.

El presente certificado de calibración certifica los valores obtenidos expresados como los resultados de las calibraciones y no constituyen un certificado de aptitud para el uso del instrumento o equipo como patrón.

Este documento no significa certificación de calidad y no debe ser utilizado con fines publicitarios, Prohibida su reproducción parcial, la reproducción total deberá hacerse con la autorización escrita de la Dirección General del Laboratorio de Metrología.


Subs. Jorge Chicaiza
Supervisor de Servicios Tecnológico





Solicitante:	HE-1		
Certificado No.:	LPE-PE-2017-397		
Fecha de Calibración:	23-JUN-2017		
CONDICIONES AMBIENTALES DEL ENSAYO			
TEMPERATURA:	21,2 °C		
PRESION ATM:	532,7 mmHg.		
HUMEDAD REL.:	46,8 %		
METODO UTILIZADO: La calibración se realizó aplicando el procedimiento de verificación de la norma ISO 17025:2006.			
PATRÓN UTILIZADO			
Marca: FLUKE	CONDICIONES DE MEDICIÓN		
Modelo: 971	Resolución: 0,00001		
Serie: 97361239	Digital: SI		
No. Cert.: 1602993 CIMA CALIBRATION LAB.			
RESULTADOS OBTENIDOS: TABLA DE CALIBRACION			
Patrón	Lecturas	ERRORES	Histéresis
TEMPERATURA A 200mm	Promedio	Desviación (U)	
°C	°C	°C %	°C
87,60	80,100	3,139	7,500
39,00	35,700	1,457	3,300
Patrón	Lecturas	ERRORES	Histéresis
TEMPERATURA A 400mm	Promedio	Desviación (U)	
°C	°C	°C %	°C
85,30	68,740	7,397	16,580
39,00	32,420	2,817	6,580
Patrón	Lecturas	ERRORES	Histéresis
TEMPERATURA A 800mm	Promedio	Desviación (U)	
°C	°C	°C %	°C
81,60	42,840	16,382	38,780
38,50	26,040	5,201	12,480

Responsable:

Sgts. Caiza Franklin



Revisado por:

Subs. Jorge Chicaiza