

REPÚBLICA DE CUBA.
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR.
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS.
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA



Tesis de diploma de Ingeniería Mecánica

Curso 2010-2011

Titulo: Cálculos de Transferencia de Calor asociados al ahorro de energía en el proceso de enfriamiento de tuberías de PVC durante su fabricación en la Empresa de Petrocasas de Cuba.

Autor: Sonam Tshering

Tutor(es): M.Sc. Milagros Montesino Pérez.

Dr. Aníbal Borroto Nordelo

Consultante: M.Sc. Antonio Jiménez Ramos

Año 53 de la Revolución
Cienfuegos, 2011





**DECLARACION DE AUTORIDAD
UNIVERSIDAD DE CIENFUEGOS**

“Carlos Rafael Rodríguez”

Sistema de Documentación y Proyecto.

Hago constar que el presente trabajo fue realizado en la Universidad de Cienfuegos Carlos Rafael Rodríguez como parte de la culminación de los estudios en la especialidad de Ingeniería Mecánica, autorizando a que el mismo sea utilizado por la Universidad de Cienfuegos para los fines que estime conveniente, ya sea parcial o totalmente, que además no podrá ser presentado sin la aprobación de la Universidad de Cienfuegos.

Firma del autor.

Los abajo firmantes certificamos que el presente trabajo ha sido según acuerdo de la dirección del centro y el mismo cumple los requisitos que debe tener un trabajo de este envergadura, referido a la temática señalada.

Información Científico Técnico
Nombre y Apellidos. Firma.

Vice Decano.
Nombre y Apellidos. Firma.

Firma de Tutor

Sistema de Documentación y Proyecto.
Nombre y Apellido. Firma.

PENSAMIENTOS

Todo conocimiento comienza con los sentimientos.

-Leonardo Da-Vinci

La ciencia tiene una característica maravillosa, y es que aprende de sus errores, que utiliza sus equivocaciones para reexaminar los problemas y volver a intentar resolverlos, cada vez por nuevos caminos.

- Ruy Pérez Tamayo

It is not your aptitude, but your attitude, that determines your altitude.

-Zig Ziglar

"Science without religion is lame. Religion without science is blind."

"Everything should be made as simple as possible, but not simpler."

"God does not care about our mathematical difficulties. He integrates empirically."

"The whole of science is nothing more than a refinement of everyday thinking."

"No busques ser alguien de éxito sino busca ser alguien valioso: lo demás llegará naturalmente."

- Albert Einstein

AGRADECIMIENTOS

Para hacer realidad la culminación de esta tesis, quiero agradecer primeramente la guía y la ayuda de mi Dios por haber iluminado mi mente y haber puesto las inspiraciones necesarias en mi vida. Además he necesitado la valiosa, entusiasta, oportuna ayuda, y apoyo incondicional de prestigiosas instituciones y numerosos maestros y amigos a los que ofrezco mi eterna gratitud.

Entre ellos puede mencionar:

1. A mis tutores: Dr. Aníbal Borroto Nordelo, M.Sc. Milagros Montesino Pérez y a el consultante Ing. Antonio Jiménez Ramos de la Empresa PETROCASAS ya que ellos fueron complementos básicos en la estructura de esta tesis consciente de la magnitud de esta tarea y de sus propias limitaciones incorporando sus conocimientos fundamentales para cumplimiento y éxitos de esta tesis.
2. A mi profesor: Dr. José Monteagudo Yanes por el apoyo y dedicación brindado en el transcurso de mi carrera profesional por sus consejos y por ser mi ejemplo como maestro.
3. También quiero agradecer a la institución que me ha formado y estimulado durante todo el transcurso de mi carrera Universidad de Cienfuegos, Cuba. y a todos los profesores que laboran en ella.
4. No deseo terminar sin agradecer a aquellas personas que también me han apoyado e incentivado, que depositaron su confianza en mi y cooperaron emocionalmente en la culminación de esta tesis, como ser mis amigos y mi novia Fanny de Honduras que hicieron valiosas sugerencias y rectificaron mis manuscrito.

DEDICATORIA

Dedico la presente tesis en primer lugar al creador del universo, que me dio la sabiduría, fortaleza y paciencia necesaria para la culminación de esta y de mi carrera profesional, ya que en el transcurso de estos años me he enfrentado a muchos retos y obstáculos pero mi Dios siempre ha estado a mi lado para poder enfrentarlos de la mejor manera.

Además no puedo olvidar a mi padres y familia en general los cuales han confiado en mi y a pesar de la distancia y de no tenerlos junto a mi me han apoyado y puesto toda su confianza en mi, dándome fuerzas y aliento en los momentos difíciles de esta honrosa y sacrificada carrera, pienso que así como, yo ellos sienten el mismo orgullo de sentir haber culminado con satisfacción y éxito.

También dedico esta tesis con mucho cariño y respeto a mis profesores que han estado en el transcurso de todos estos años de estudio a mi lado impartíendome el don del saber, especialmente a mi tutora MSc.Milagros Montesino Pérez , de no ser por ella me hubiese sido imposible la terminación de esta importante tesis al dedicar su valioso tiempo y conocimientos, es por ello que representa una parte fundamental en la elaboración y culminación de este trabajo además de poder graduarme como un ingeniero que promete demostrar los frutos de todos estos años en este prestigioso país.

A mis amigos y novia por compartir malos y buenos momentos juntos ya que han sido mi apoyo y fortaleza en ausencia de mi familia.

RESUMEN

Este trabajo forma parte de una actualización y profundización de la situación energética que tendrá la Empresa PLASTIMEC para convertirse en PETROCASAS. El sector industrial de plásticos, hoy en día, invierte gran cantidad de recursos para mantener sus productos a los estándares manejados en los diferentes mercados donde éstos se comercialicen. Las tuberías de policloruro de vinilo, utilizadas en innumerables aplicaciones, son ejemplo de estos productos que deben cumplir con las normas internacionales, lo que garantiza que la tubería prestará el servicio en la forma y en el tiempo para el cual fueron diseñadas.

En PLASTIMEC se implementó la Tecnología de Gestión Total Eficiente de la Energía (TGTEE), desde hace una década aproximadamente, por lo cual se cuenta con una estadística energética de la misma y establecido sus índices de consumo. No obstante, esta implementación, aun no se cuenta en la empresa con un procedimiento para la obtención de mínimo costo de extrusión de tuberías de PVC, con el cual se evidencie la positiva evolución que deben tener los indicadores de eficiencia energética como resultado de una mejor gestión y optimización del proceso.

El trabajo se desarrolla en el taller de extrusión, y el problema consiste en que la nueva empresa, que funcionará con capital 100% venezolano, posee esta misma tecnología y se necesita conocer la temperatura adecuada de enfriamiento del agua helada que garantice la calidad de la tubería con el menor consumo energético del chiller.

Para solucionar la situación, se realizó un estudio de transferencia del calor en sistema de enfriamiento para buscar una temperatura adecuada de agua helada que permitirá conocer el mínimo costo energético con la máxima temperatura aportada por el chiller.

El presente trabajo incluye la descripción de conceptos básicos utilizados en el proceso de extrusión de tubería de policloruro de vinilo, así como el equipo utilizado en el proceso y los tipos de tubería PVC que se obtienen.

Además, se incluyen algunos de los problemas más comunes que se presentan durante el proceso y las posibles soluciones, las cuales se verificarán si fueron realizadas de manera correcta, al realizarse las pruebas e inspecciones de aseguramiento de la calidad.

Para abordar el problema se inició con un cálculo de transferencia de calor por convección forzada en estado estacionario para buscar un valor adecuado del coeficiente de la convección, utilizando varias correlaciones de número de Nusselt. Con el valor obtenido del coeficiente de convección, se realizaron los cálculos de los números de Biot y Fourier para los cálculos de transferencia de calor en estado no estacionario.

Luego, variando la temperatura del agua de enfriamiento de 10 a 30⁰C se determinó la variación de temperaturas en la tubería para distintos espesores, con enfriamiento en las dos bañeras de agua separadas por un espacio expuesto al aire.

Cuando la temperatura del agua es de 10⁰C se logra enfriar la tubería de 1mm de espesor con una bañera de 4m de longitud y la de 2 a 6mm se tienen que enfriar con aire después de haber pasado por la primera bañera a una distancia aproximada a 2m.

Los cálculos demostraron que cuando se suministra el agua de enfriamiento con una temperatura de 20⁰C, todas las tuberías de 1mm hasta 6mm de espesor pueden enfriarse solo con dos bañeras del agua separadas por una distancia en aire de 35 cm garantizándose el enfriamiento hasta el nivel de temperatura requerido.

El estudio realizado permite a la empresa, trabajando con agua de enfriamiento a una temperatura de 20⁰C, obtener un ahorro energético de 323.69 MWh/año y disminuir las emisiones de CO₂ en 294.56 Ton/año, resultando un aporte a los trabajos que por una mayor eficiencia energética se vienen realizando.

INDICE

INTRODUCCIÓN	9
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.....	12
1.1 Introducción a los plásticos.....	12
1.1.2 Clasificación de los plásticos	14
1.1.3 Propiedades de los plásticos.....	15
1.2 Policloruro de vinilo- P.V.C.....	16
1.3. Tubería de P.V.C.....	17
1.3.1. Tipos de Tubería PVC.....	18
1.4. Ventajas del uso de la tubería de P.V.C.	19
1.5. Limitaciones en el uso de Tubería de P.V.C.	20
1.6. Proceso de Fabricación de la tubería PVC.....	20
1.6.1. Flujo del proceso de producción de tubería P.V.C.	21
1.7 Problemas y soluciones del proceso de extrusión.....	27
1.7.1. Superficie opaca	27
1.7.2 Huellas de fluido y manchas en la superficie.....	28
1.7.3. Marcas discontinuas en la superficie.....	28
1.7.4. Burbujas.....	28
1.7.6 Contaminación.....	29
1.7.7 Porosidad.....	29
1.7.8 Degradación	30
1.7.9. Piel de tiburón y abambuamiento	30
1.7.10 Fractura del fundido.....	31
1.8. Sistema de Enfriamiento de Tubería PVC extruida.....	32
Conclusiones Parciales del Capitulo 1.....	34
CAPÍTULO II: Proceso de transferencia de calor durante el enfriamiento de PVC. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección. Caso en estudio: Petrocasas Cienfuegos	36
2.1. Empresa PETROCASAS.....	36
2.2. Introducción a la transferencia de calor.....	37
2.3. Análisis de Transferencia de calor en la bañera de enfriamiento.....	39
2.3.1. Caso en estudio.....	40
2.3.2. Cálculos del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada.....	41

Conclusiones parciales de capítulo 2	49
CAPITULO III: Transferencia de calor en estado no estacionario. Cálculo de la temperatura de enfriamiento de la tubería PVC.....	51
3.1 Transferencia de calor en estado no estacionario.	51
3.2. Utilizando el primer método.....	52
3.3. Utilizando el segundo método.	53
3.4. Cálculos de la distribución de temperaturas de la tubería de PVC utilizando el método de la aproximación del primer término cuando $Fo > 0.2$	54
3.5 Tercer método: Modelación matemática utilizando el método de la solución exacta.....	60
CAPITULO IV. ANALISIS DE LOS RESULTADOS.....	64
4.1. Enfriamiento con agua helada en la primera bañera	64
4.2. Enfriamiento con aire a temperatura ambiente.	67
4.3. Enfriamiento con agua helada en la segunda bañera.....	70
4.4 Propuesta de estrategia de utilización de las bañeras.....	73
4.5 Evaluación Energética – Ambiental.....	73
CONCLUSIONES	75
RECOMENDACIONES	77
BIBLIOGRAFÍA	78
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	81
ANEXO 1	82
ANEXO 2	92
ANEXO 3	94

INTRODUCCIÓN

El aumento del precio del petróleo y su posible agotamiento esta presionando social y económicamente a la humanidad. Es por eso que el ahorro y uso eficiente de la energía se ha convertido en los últimos años en uno de los temas más estudiados, pues tiene una alta influencia sobre la competitividad de las empresas y la mitigación del impacto ambiental. Ejemplo de ello es que en la industria del procesamiento de plástico se estima que una reducción de 10% en el consumo de energía del sector, reduciría las emisiones de CO₂ a la atmósfera en más de 3 millones de toneladas anuales.

Estudios realizados en estas industrias muestran que cerca del 60% de la energía es consumida por los equipos de procesamiento, 17% por los compresores del sistema de aire comprimido, 10% en acondicionamiento ambiental, 8% en iluminación y 5% en las aguas de refrigeración.

El trabajo de optimización y búsqueda de eficiencia en el mundo del plástico está enfocado en la disminución de los consumos energéticos por separados o por líneas de construcción, así pues se busca elevar la eficiencia y los rendimientos en motores eléctricos, compresores, chiller, en el caso de las máquinas en componentes más eficientes, tornillos, camisas, moldes, calibradores etc. pero no existen estudios y procedimientos para en procesos integrados alcanzar optimizarlos en conjugación con sus parámetros, no existiendo acciones concretas sobre las cuales actuar para mantener el funcionamiento eficiente del conjunto.

El segundo plástico más utilizado en el mundo es conocido comúnmente como PVC, siglas con que se designa al policloruro de vinilo. Es un material termoplástico que frecuentemente es seleccionado por encima de otros materiales, debido a su bajo costo, versatilidad y transformación por diversos procesos de manufactura. Este material constituye la materia prima fundamental de la Empresa PETROCASAS ubicada en la provincia de Cienfuegos, que se encuentra en la etapa de construcción y puesta en marcha y se dedicará a producir tuberías hidráulicas, sanitarias y eléctricas así como perfilería para la construcción de viviendas de PVC, madera artificial y elementos de carpintería

El presente trabajo forma parte de los estudios que se realizan en esa identidad con vistas a lograr una mejor eficiencia energética en sus producciones, en específico en el proceso de enfriamiento de la tubería durante su proceso de fabricación por extrusión.

El proceso de enfriamiento de la tubería ocurre por los procesos de transferencia de calor por convección entre la superficie de la tubería y el agua y conducción de calor a través de la tubería. El cálculo de la temperatura que alcanza la superficie cuando se varía la temperatura del agua helada nos permitirá determinar para los diferentes tipos de producciones cuales son las máximas temperaturas posibles a utilizar, sin que esto afecte la calidad del proceso de producción. De esta forma se logrará un ahorro energético asociado al funcionamiento del chiller.

Problema Científico

No existen en la empresa PETROCASAS estudios y procedimientos para determinar los valores de las temperaturas en la tuberías de distintos grosores, que permitan una estrategia operacional del sistema de enfriamiento, utilizando una temperatura del agua helada mayor a los 10°C sin afectar la calidad de las mismas que exige un enfriamiento entre 20 y 35°C

Hipótesis

Un procedimiento de cálculo basado en la utilización de las ecuaciones de transferencia de calor permite determinar la temperatura de la superficie de la tubería bajo las condiciones de operación establecidas, y establecer una estrategia de utilización de las bañeras, y así lograr un ahorro energético y económico.

Objetivo General.

Cálculo de la máxima temperatura del agua helada que garantiza un enfriamiento hasta $20\text{-}35^{\circ}\text{C}$ de la tubería de PVC de 114.3mm de diámetro exterior en el rango de espesores de 1 a 6 mm .

Objetivos Específicos.

- ✓ Revisión bibliográfica del estado del arte
- ✓ Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección (h) durante el proceso de enfriamiento de acuerdo a las condiciones de operación.
- ✓ Cálculo de la temperatura que alcanza el plástico variando la temperatura de agua helada de enfriamiento entre 10 y 30⁰C.
- ✓ Estrategia de utilización de las bañeras de enfriamiento.
- ✓ Cálculo estimado del ahorro energético y económico.

CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE.

1.1 Introducción a los plásticos. [1]

El primer plástico se origina como resultado de un concurso realizado en 1860 en los Estados Unidos, cuando se ofrecieron 10 000 dólares a quien produjera un sustituto del marfil (cuyas reservas se agotaban) para la fabricación de bolas de billar. Ganó el premio el inventor americano John Wesley Hyatt, quien inventó un tipo de plástico al que llamó celuloide.

El celuloide se fabricaba disolviendo celulosa, un hidrato de carbono obtenido de las plantas, en una solución de alcanfor y etanol. Con él se empezaron a fabricar distintos objetos como mangos de cuchillos, armazones de lentes y película cinematográfica. Sin su descubrimiento no hubiera podido iniciarse la industria cinematográfica a fines del siglo XIX.

El celuloide puede ser ablandado repetidamente y moldeado de nuevo mediante calor, por lo que recibe el calificativo de termoplástico.

En 1907, el químico americano, Leo Baekeland inventó la baquelita, el primer plástico calificado como termo fijo o termoestable: plásticos que pueden ser fundidos y moldeados mientras están calientes, pero que no pueden ser ablandados por el calor y moldeados de nuevo una vez que han fraguado. La baquelita es aislante y resistente al agua, a los ácidos y al calor moderado. Debido a estas características se extendió rápidamente a numerosos objetos de uso doméstico y componentes eléctricos de uso general.

Los resultados alcanzados por los primeros plásticos incentivaron a los químicos y a la industria a buscar otras moléculas sencillas que pudieran enlazarse para crear polímeros. En la década del 30, químicos ingleses descubrieron que el gas etileno polimerizaba bajo la acción del calor y la presión, formando un termoplástico al que llamaron polietileno (PE). Hacia los años 50 aparece el polipropileno (PP).

Al reemplazar en el etileno un átomo de hidrógeno por uno de cloruro se produjo el cloruro de polivinilo (PVC), un plástico duro y resistente al fuego, especialmente adecuado para tuberías de todo tipo. Al agregarles diversos aditivos se logra un

material más blando, sustitutivo del caucho, comúnmente usado para ropa impermeable, manteles, cortinas y juguetes.

Se puede decir que la industria de la tubería de P.V.C. es producto de la segunda guerra mundial (1942), ya que los sistemas de agua y alcantarillado fueron destruidos en su mayoría por los bombardeos en Alemania, debido a esto los científicos e ingenieros alemanes desarrollaron la industria de la tubería de P.V.C. Las primeras instalaciones hidráulicas con tubería de P.V.C. en México. (Con campana y anillo de hule) inician en 1964. (Ver anexo 1.1)

Un plástico parecido al PVC es el politetrafluoretileno (PTFE), conocido popularmente como teflón y usado para rodillos y sartenes antiadherentes. Otro de los plásticos desarrollados en los años 30 en Alemania fue el poliestireno (PS), un material muy transparente comúnmente utilizado para vasos, potes y hueveras.

El poliestireno expandido (EPS), una espuma blanca y rígida, es usado básicamente para embalaje y aislante térmico. También en los años 30 se crea la primera fibra artificial, el nylon. Su descubridor fue el químico Wallace Carothers, que trabajaba para la empresa Du Pont, el que descubrió que dos sustancias químicas como el hexametildiamina y ácido adípico podían formar un polímero que bombeado a través de agujeros y estirados podían formar hilos que podían tejerse.

Su primer uso fue la fabricación de paracaídas para las fuerzas armadas estadounidenses durante la Segunda Guerra Mundial, extendiéndose rápidamente a la industria textil en la fabricación de medias y otros tejidos combinados con algodón o lana.

Al nylon le siguieron otras fibras sintéticas como por ejemplo el orlón y el acrilán. En la presente década, principalmente en lo que tiene que ver con el envasado en botellas y frascos, se ha desarrollado vertiginosamente el uso del tereftalato de polietileno (PET), material que viene desplazando al vidrio y al PVC en el mercado de envases.

1.1.1 Identificación de los tipos de plásticos. [2]

Número	Abreviatura	Nombre completo
1	PET	Polietilén tereftalato
2	HDPE	Polietileno de alta densidad
3	V, PVC	Cloruro de polivinilo
4	LDPE	Polietileno de baja densidad
5	PP	Polipropileno
6	PS	Poliestireno
7	otros	

Tabla 1.-Clasificación de plásticos.

Los plásticos que encontramos en el mercado suelen diferenciarse mediante un número del "1" al "7", como se muestra en la Tabla 1. Esta es la clasificación de la Sociedad de Industrias del Plástico (SPI en inglés), que ha sido adoptada en todo el mundo. Dado que la calidad de un plástico se deteriora rápidamente al combinarlo con otro plástico diferente, la utilidad de este código es ayudar en la separación de los diferentes tipos de plástico y maximizar así el número de veces que pueden ser reciclados. El significado de este código se muestra a continuación:

1.1.2 Clasificación de los plásticos

Según su comportamiento frente al calor los plásticos pueden clasificarse en 2 grupos:

 Termoestables

 Termoplásticos.

1. Termoestables.

Estos es debido a la unión de sus cadenas, lo cual no se reblandecen al ser calentados por lo tanto no se pueden recuperar para ser nuevamente utilizados.

Ejemplos: Fenoles, Nylon, Aminas-Aplicación medica, Resina Epoxi.

2. Termoplásticos.

Un termoplástico es un plástico que se reblandece por la acción del calor y entonces se les puede dar forma por moldeo, compresión, extrusión. Es por eso que tiene la propiedad de ser procesado nuevamente. El nombre proviene de que son deformables a temperaturas lo suficientemente altas.

Ejemplos: Bolsas, Cajas de CD, Envases, Ventanas, Tuberías, Carcasas de televisores, impresoras.

1.1.3 Propiedades de los plásticos. [2]

Un material termoplástico tiene la propiedad de volverse a fundir, esto indica que puede recuperarse para diversas aplicaciones y con ayuda de aditivos se puede mejorar esta propiedad. (Ver anexo 1.4)

a) Propiedades Termoquímicas.

Los plásticos son generalmente malos conductores del calor, pero puede agregársela aditivos para mejorar la conductividad térmica. El coeficiente de dilatación térmica es alto en la mayoría de los plásticos. Se producen grandes deformaciones, en comparación en los metales con aumentos de temperatura relativamente pequeños. En general, los plásticos son resistentes a los ataques del agua y soportan bien los ataques atmosféricos pero son muy sensibles a la luz solar (rayos ultravioletas).

b) Propiedades Eléctricas.

Son malos conductores de la electricidad, es por eso que en casos particulares se utilizan como aislantes, su resistencia es alta pero al aumentar la temperatura esta disminuye.

c) Propiedades Mecánicas.

 Los termoplásticos, si se someten a esfuerzos suficientemente grandes, se deforman de manera similar a los metales dúctiles, cuando se ejerce sobre ellos esfuerzos superiores al límite de fluencia. Los termoestables, por ser frágiles, se deforman muy poco bajo la aplicación de cargas.

 El modulo de elasticidad de los plásticos rígidos es más bajo que el del concreto.

 Las cargas aplicadas durante largos periodos de tiempo, producen una deformación gradual de los plásticos, provocando fallas con cargas menores que las indicadas por las pruebas de corta duración. Este tipo de falla se denomina creep.

 Su baja estabilidad dimensional, es decir, se deforman con el tiempo; aun cuando no tengan cargas aplicadas

Trabajo de tesis realizado en la Universidad Metropolitana de México en Junio del 2005 refieren que las propiedades mecánicas más importantes a la hora de analizar la temperatura de enfriamiento a la que deben ser sometido el plástico son: elongación a la ruptura, esfuerzo de cedencia y modulo de Young. [2]

La elongación a la ruptura se refiere a la relación de longitud inicial de la muestra y la longitud que se alarga al ser sometida a una fuerza, el esfuerzo de cedencia es una medida de resistencia de un material y el modulo de Young es una propiedad importante de los plásticos, ya que es la relación entre el esfuerzo-deformación en el rango de la elasticidad de un material.

d) Propiedades ópticas

Los plásticos presentan una gama muy amplia de propiedades ópticas. Estas propiedades están en función de la transparencia del plástico, algunos son muy brillantes, otros no la reflejan y sus superficies son de tipo mate. Ya que esta caracterización es aplicable para el índice de refracción, es una medida. Esto es una capacidad del polímero de refractar o de desviar la luz.

e) Aditivos

Estos mejoran las propiedades de los plásticos, esto para reducir los costos y evitar una degradación del material.

1.2 Policloruro de vinilo- P.V.C. [3]

Con el nombre genérico de PVC se designa a toda una familia de resinas sintéticas, resinas que físicamente tienen el aspecto de un polvillo blanco y muy fino. No obstante, lo que se conoce como PVC en un artículo terminado no es el polímero puro. Estas resinas deben mezclarse con diversos aditivos para convertirse en lo que se denomina compuesto de PVC, material que de esta forma, incorpora todas las propiedades requeridas para poder ser transformado en productos útiles. La resina de PVC es la más versátil de la familia de los plásticos; ya que a partir de ella se pueden obtener productos rígidos y flexibles. La diferencia entre el PVC rígido y el flexible es que el PVC flexible incorpora en su formulación la resina y un plastificante, que es el producto que lo hace blando.

El Poli cloruro de Vinilo (P.V.C.), ($\text{CH}_2=\text{CH Cl}$), es un moderno, importante y conocido miembro de la familia de los termoplásticos. Es un polímero obtenido de dos materias primas naturales: Cloruro de sodio o sal común (NaCl) (57%) y petróleo o gas natural (43%), mediante un proceso químico denominado polimerización, siendo por lo tanto menos dependiente de recursos no renovables que otros plásticos.

Las propiedades físicas del PVC dependen principalmente del peso molecular. Cuanto mayor es el peso molecular, mejores son las propiedades físicas del compuesto y de los productos, pero habrá mayores dificultades de procesamiento. Se pueden hacer con ellos productos transparentes y opacos.

El PVC se utiliza en aplicaciones muy variadas, la mayoría de ellas con una larga vida. Es un material durable, económico, procesable por todas las técnicas para plásticos y reciclable, con una gama de propiedades y ventajas que lo han mantenido como el material líder en diversas industrias. Sus productos son ligeros, inertes, inodoros y completamente inofensivos.

1.3. Tubería de P.V.C. [3]

Se define tubería como el medio utilizado para transportar fluidos (líquidos y gases) a presiones significativas que causan esfuerzos de trabajo sobre las paredes. La tubería PVC pertenece a la clasificación de tuberías semi-rígidas las cuales poseen cierta capacidad de deformarse, lo cual es útil en su instalación y mantenimiento. Estas tuberías están en gran parte fabricadas de materiales termoplásticos. Las tuberías semi-rígidas son livianas y de un costo relativamente bajo, pueden soportar medios corrosivos y ligeros desplazamientos sin sufrir daños. La tubería PVC se puede clasificar según el sistema de dimensionamiento, la presión de trabajo y el tipo de unión a utilizar. (Ver Anexo 1)

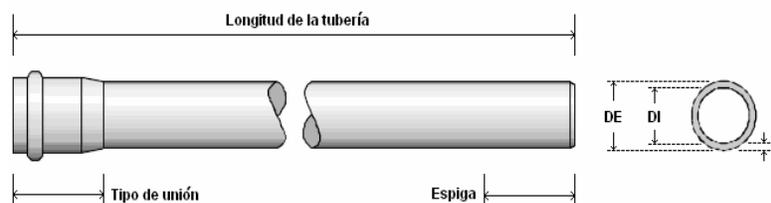


Figura 1.1 Tubería y sus partes principales.

1.3.1. Tipos de Tubería PVC. [3]

Hoy en día se fabrican varios tipos de tuberías PVC, para distintas aplicaciones; las cuales pueden agruparse fácilmente en tres tipos que son: la tubería PVC hidráulica, utilizada en instalaciones con presión, la tubería PVC sanitaria, para instalaciones sin presión; y la tubería PVC conduit, para conducción de cables eléctricos.(Ver anexos 1.5,1.6)

1.3.1.1. Tubería PVC hidráulica.

Conocidas como tubería SDR o tuberías de presión, se utilizan en instalaciones de fluidos a presión, especialmente en la conducción de agua potable, como se muestra en la figura siguiente.



Fig.1.2.Tuberías PVC hidráulicas.

1.3.1.2. Tubería PVC sanitaria.

Este tipo de tubería tiene su mayor aplicación en drenajes y redes de alcantarillado, así como en aplicaciones donde no exista presión alguna. Lo común para el mercado es encontrarlas en longitudes de 6 metros, en colores anaranjado y gris como se muestra en la figura siguiente.

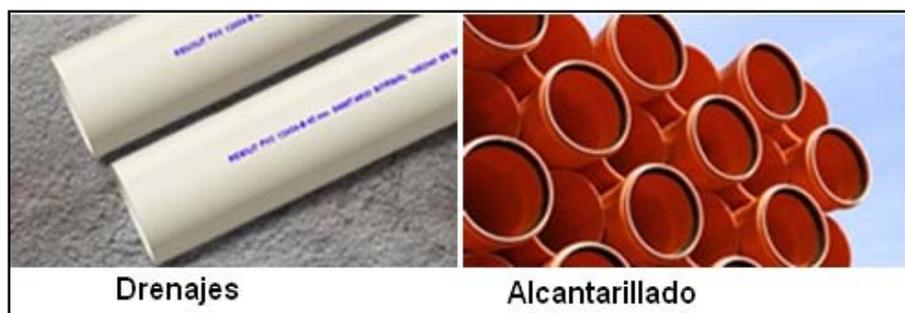


Fig.1.3.Tuberías PVC sanitarias.

1.3.1.3. Tubería PVC conduit.

Denominada también como tubería PVC ducto eléctrico, su aplicación es la protección de conductores eléctricos.



Fig.1.4. Tuberías PVC conduit.

1.4. Ventajas del uso de la tubería de P.V.C. [3]

Unión hermética:

El diseño de la unión espiga-campana no permite infiltración ni exfiltración, lo que impide la contaminación del agua.

Economía:

Por su superficie interna lisa las pendientes se reducen considerablemente, obteniendo menores volúmenes de excavación.

Mayor vida útil:

No se ve afectada por la agresividad de los suelos, no permite la entrada de raíces y además las sustancias propias de un alcantarillado sanitario no la atacan.

Flexibilidad:

Excelente comportamiento ante cargas vivas y muertas comparado con los materiales tradicionales, que le permite estar alojada en las profundidades de los proyectos sin problema alguno.

Baja rugosidad:

Coefficiente de rugosidad de Manning de 0.009, lo que significa una mayor eficiencia hidráulica.

Ligereza:

Por su peso por metro significativamente menor, el costo de manejo e instalación se reduce considerablemente, logrando altos rendimientos de mano de obra.

Resistencia mecánica:

La tubería de P.V.C. es muy resistente a golpes y al trato normal en obra, desde luego debe protegerse del manejo inadecuado y rudo.

1.5. Limitaciones en el uso de Tubería de P.V.C.

-  A temperaturas menores a 0° C el P.V.C. reduce su resistencia al impacto.
-  La tubería no debe quedar expuesta por periodos prolongados a los rayos solares, pues esto puede alterar sus propiedades mecánicas.
-  La tubería de P.V.C. es susceptible al daño al contacto con elementos punzo cortantes.

1.6. Proceso de Fabricación de la tubería PVC. [4]

A medida que la tecnología de fabricación de tubería de P.V.C. ha cambiado, se ha comenzado a utilizar equipos y maquinaria moderna, que han incrementado notablemente los volúmenes de producción al reducir los tiempos del proceso. Los procesos más comunes en la fabricación de tubería de P.V.C., son extrusión, inyección y formación manual de piezas.

Las escalas posibles de producción que se pueden lograr son como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla: 1.2 Escalas de producción de las tuberías de PVC según los tipos de las Empresas.

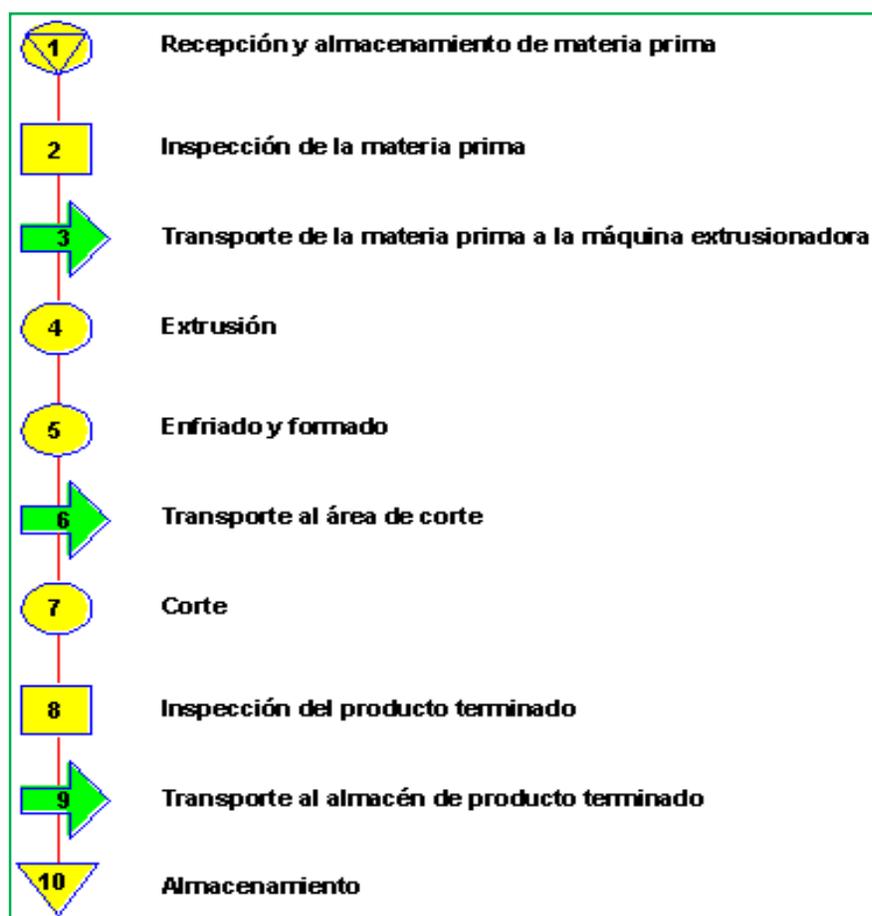
Empresas	Escala (rango de producción)
Microempresa/artesanal:	No aplicable
Pequeña empresa:	de 24 a 50 toneladas mensuales
Mediana empresa:	de 51 a 200 toneladas mensuales
Gran empresa:	de 201 toneladas mensuales en adelante

1.6.1. Flujo del proceso de producción de tubería P.V.C.

A continuación se presenta el gráfico de flujo del proceso de producción por extrusión a nivel general. Este puede ser similar para otros productos si el proceso productivo es homogéneo, o para variantes del mismo. Al respecto, se debe evaluar en cada caso la pertinencia de cada una de las actividades previstas, la naturaleza de la maquinaria y el equipo considerado, el tiempo y tipo de las operaciones a realizar y las formulaciones o composiciones diferentes que involucra cada producto o variante que se pretenda realizar. (Ver anexo 1.3)

Gráfico # 1.1

Flujo del Proceso de Producción por Extrusión



1. Recepción y Almacenamiento de Materia Prima.

La materia prima es el policloruro de vinilo (P.V.C.), la cual se presenta en forma granular uniforme o en polvo, su presentación puede ser en sacos o bolsas de plástico de 25kg. aunque puede variar según las necesidades del comprador. El lugar de almacenamiento tiene que ser fresco.

2. Inspección de la Materia Prima.

Se deben verificar las características de la materia prima como son la viscosidad, el contenido de plomo, estaño, entre otros.

3. Transporte de la Materia Prima a la Máquina extrusora.

Los sacos que contienen el PVC son transportados con un montacargas o una banda transportadora a la máquina extrusora.

4. Proceso de extrusión.

La fabricación de tubos plásticos se produce en máquinas extrusora, mediante un proceso continuo en el cual la materia prima o resina (en forma de gránulos sólidos) es transportada hasta la tolva para ser fundida a través de una cámara de calentamiento, debido a efectos de fricción y temperatura. El material fundido es forzado a pasar, mediante un tornillo sin fin giratorio, por un cabezal que le proporciona una forma definida. Luego el tubo pasa por un tanque de enfriamiento con agua para evitar deformaciones permanentes. A continuación el producto final, se marca, corta, bisela en la medida adecuada. Se fabrican por este proceso: tubos, perfiles, películas, manguera, láminas, filamentos y pellets.

El extrusor puede ser simple (un solo husillo) o de doble husillo, el cual tiene como función de mover toda la masa caliente hacia delante hasta llegar al cabezal el cual le da forma al material. Las máquinas de doble husillo mezclan mejor los materiales y tiñen mejor los materiales con pigmentos; el tratamiento de los elementos en forma de polvo o pasta resulta más homogéneo.

En la figura se muestra un esquema general del proceso de extrusión.

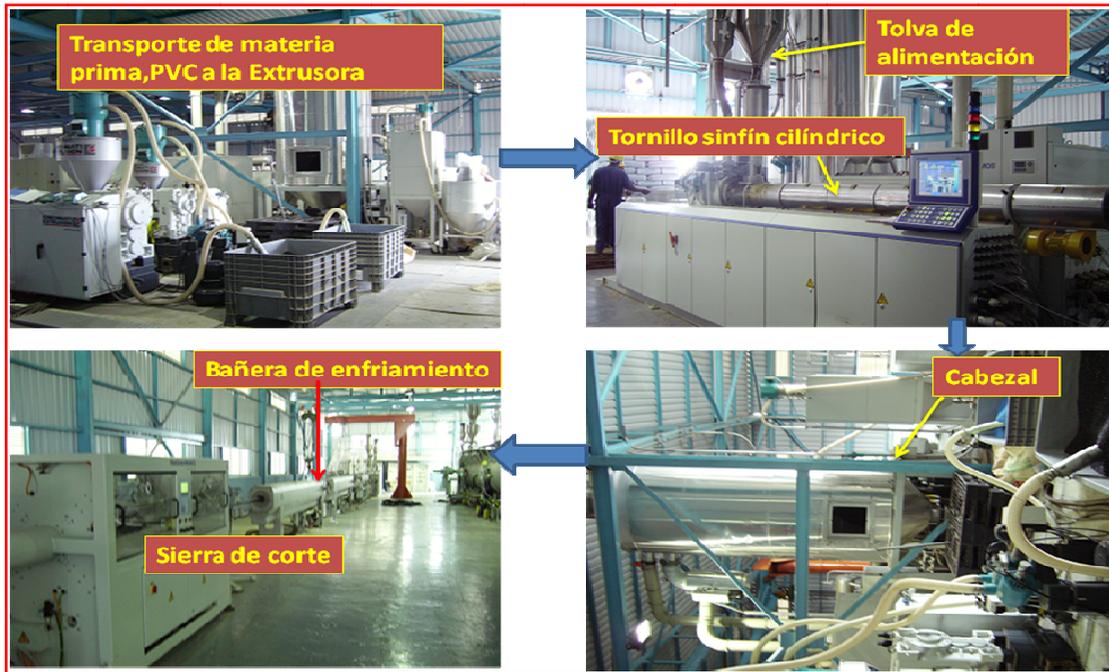


Figura 1.5. Proceso de extrusión

4.1. Ventajas y restricciones de proceso de extrusión.

Este tipo de proceso es de alta productividad y además es uno de los procesos más importantes para la obtención de formas plásticas en volumen de producción. Su operación es de las más sencillas, ya que una vez establecidas las condiciones de operación, la producción continúa sin problemas siempre y cuando no exista un disturbio de fuerza mayor.

El costo de la maquinaria de extrusión es moderado, en comparación con otros procesos como inyección y soplado y con una buena flexibilidad para cambios de productos sin necesidad de hacer inversiones mayores.

La restricción principal es que los productos obtenidos por extracción deben tener una sección transversal constante en cualquier punto de su longitud (tubo, lámina) o periódica (tubería corrugada); quedan excluidos todos aquellos con formas irregulares o no uniformes. La mayor parte de los productos obtenidos de unas líneas de extrusión requieren de procesos posteriores con el fin de habilitar adecuadamente el artículo, como en el caso del sellado y cortado, para la obtención de bolsas a partir de película tubular o la formación de la unión o socket en el caso de tubería.

4.2. Partes de una máquina extrusora.

Una máquina extrusora generalmente consta de los siguientes partes principales, como se muestra en la figura siguiente:

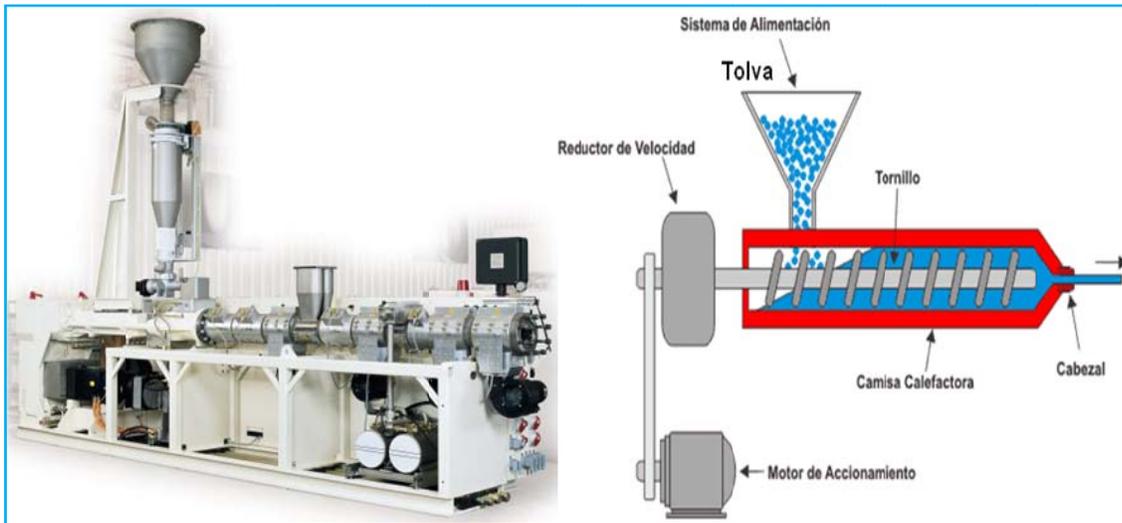


Figura.1.6.Máquina Extrusora y sus partes principales.(Ver anexo 1.2)

a. Tolva:

Los granos de PVC se vierten en la tolva de alimentación la cual tiene cierto ángulo de inclinación para facilitar su deslizamiento. El material baja por la tolva hasta la garganta de la misma, pasa a través de ésta y llega al cilindro de la máquina.

b. El Cilindro:

El cilindro aloja a un husillo que se divide en tres zonas: Transporte o alimentación, transición o compresión y descarga o dosificación.

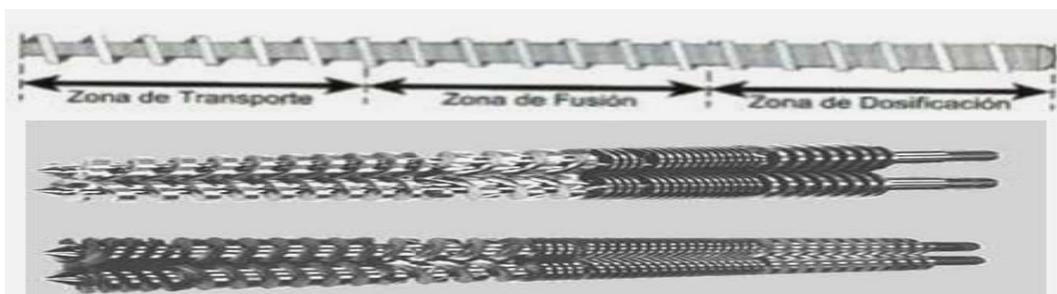


Figura.1.7.Zonas diferentes de husillo de la extrusora

c. Zona de Transporte:

En la zona de transporte o alimentación el husillo toma el material que se encuentra en forma de grano o polvo, lo transporta, lo compacta, lo precalienta a 140 ° C y lo envía a la zona de fusión.

d. Zona de fusión o transición:

La zona de transición o compresión es así llamada debido a que aquí se efectúa la transición del termoplástico sólido a su estado visco elástico. En esta zona no sólo se tiene que plastificar o fundir el material, sino que lo debe transportar a la zona de descarga como una masa fundida compacta y libre de burbujas de aire o de algún otro componente volátil. El calentamiento se produce por medio de resistencias eléctricas. En esta zona la temperatura debe ser de 170 °C.

e. Zona de dosificación o descarga:

La zona de descarga es la parte final del husillo que acepta el material plastificado proveniente de la zona de compresión, para homogeneizarlo, calentarlo eventualmente y enviarlo al cabezal, en esta área la temperatura varía entre 150 y 180 °C.

f. Cabezal.

En el cabezal es donde se le da forma al tubo; esto se hará mediante un dado que le da forma a la parte exterior del tubo y un mandril le da forma al interior, el cabezal también tiene calentamiento para mejorar la plastificación del material. Una vez que pasa el material plastificado por el cabezal, sale con la forma de tubo pasando por el calibrador el cual da las dimensiones específicas al tubo. Al salir de este dado el material está extremadamente caliente aproximadamente a 200°C flexible y deformable.

5. Enfriado y Formado.

Después del paso antes mencionado el tubo todavía caliente pasa por una tina de enfriamiento que tiene circulación de agua y enfría el material hasta hacerlo completamente rígido. Esta tina también contiene un formador que es el que le va a proporcionar la redondez definitiva al tubo.

6. Transporte a corte.

Una vez que sale el tubo de la tina de enfriamiento completamente rígido pasa por un sistema de tiraje para lo cual se utiliza un jalador o puller el cual hará la función de jalar al tubo hacia el sistema de corte. Existen varios tipos de jaladores, los más comunes son los de orugas y los de llantas. Este transporte jalador además tiene la función de controlar el espesor de la tubería mediante la regulación de velocidad con lo que se pueden obtener tubos con paredes de diferente espesor.

7. Corte:

El corte de los tubos se realiza una vez efectuada la medición de la longitud que tendrá el tubo, mediante la utilización de sierras de mano o eléctricas, que se van desplazando con el tubo mientras dura la operación y regresan manual o automáticamente al punto de medición una vez realizado el corte.

8. Inspección del producto terminado:

Aquí se realizan pruebas a una muestra del producto terminado, estas pruebas incluyen; peso, aplastamiento, impacto, espesor del cuerpo, presión mínima de reventamiento, longitud, presión sostenida a 1000 horas, absorción de agua, resistencia química, combustibilidad, deflexión por temperatura, etc. En el caso de que un lote no cumpla con las especificaciones requeridas el material puede molerse y reciclarse, recuperándolo en nuevos tubos.

9. Transporte al Almacén de Producto Terminado:

Si la tubería cumple con las especificaciones de control de calidad, entonces pasa al almacén de producto terminado. El producto se transporta por medio de montacargas, siendo amarrados los tubos previamente.

10. Almacenamiento:

El producto terminado es almacenado y dispuesto para su venta.

1.7 Problemas y soluciones del proceso de extrusión. [3]

El arte de procesar PVC consiste en usar temperaturas suficientemente altas para llevar el compuesto a un estado de fusión y así optimizar las propiedades físicas. Temperaturas insuficientes llevan al compuesto a un estado de gelación y aunque el producto terminado puede tener buen aspecto, no tendría las propiedades físicas óptimas que se requieren.

Para procesar a temperatura suficientemente alta sin causar degradación, es muy importante disponer de equipos adecuadamente diseñados y de un sistema de lubricación bien equilibrado. En relación a esto último, hay controversia en cuanto al orden de adición de los lubricantes al estar preparando el compuesto. Algunos obtienen resultados satisfactorios agregándolos al principio y otros insisten en que es mejor al final.

Si los lubricantes se incorporan a temperaturas muy altas, el equipo no será bien lubricado. Si se añaden al principio a temperatura baja, se corre el riesgo de dejar parte de los lubricantes en las paredes de los equipos de mezclado.

Es muy importante mantener un adecuado control de la temperatura y de la velocidad de corte (velocidad de rotación del tornillo) para lograr que el plástico fundido salga siempre del extrusor con la misma consistencia. Por otro lado, entre mayor sea la viscosidad mayor será el consumo de energía.

A continuación se trata de algunos defectos significativos que pueden presentarse en el moldeo de extrusión de tubería PVC.

1.7.1. Superficie opaca

El principal motivo en este caso, es una temperatura de expulsión demasiado baja. Si se desarrolla considerable arrastre en la boquilla antes de que el material salga al exterior, la acción cortante que sigue puede causar una superficie defectuosa. Este defecto suele producirse, igualmente, si el cabezal está a una temperatura demasiado baja.

La situación puede ser remediada rápidamente si se mantienen controles de temperatura en el cabezal separados de los del cilindro, en torno al tornillo alimentador.

1.7.2 Huellas de fluido y manchas en la superficie

Si las manchas aparecen alargadas y paralelas una a otras, como por ejemplo, una serie de canales, su origen esta en la boquilla, que quizás esté rayada, en cuyo caso nada en el proceso podrá eliminar este defecto.

Pero si las marcas son desiguales, pueden obedecer a la existencia de humedad o impurezas en el material de moldeo. La humedad contribuye también a la formación de burbujas y debe eliminarse por medio de secado previo.

1.7.3. Marcas discontinuas en la superficie

Si existe una mala homogenización del fluido y se desarrolla insuficiente presión posterior entre el final del tornillo y la boquilla de extrusión (condición que alivia el torpedo), aparecerán marcas de desigualdades cuya frecuencia dependerá del tiro del tornillo y la velocidad expulsora.

Un tomillo debidamente diseñado que ejerza mayor presión cuando el material se acerca a la boquilla, seguido por una mezcla de líneas de fluido, no dejara marcas discontinuas.

También aliviará la situación una alimentación uniforme de la tolva, y que no se produzcan interrupciones mientras el material circula hacia la entrada de la boquilla.

1.7.4. Burbujas

Generalmente, las burbujas pueden ser de origen gaseoso, debidas a insuficiente presión posterior del dado y excesiva temperatura de expulsión, seguida por una caída brusca de presión. También pueden obedecer a contracción volumétrica en las piezas gruesas moldeadas.

1.7.5 Dimensiones desiguales

El primer ajuste que debe examinarse es la velocidad del jalador o caterpillar. En general, se pueden aumentar o disminuir las dimensiones exteriores, de acuerdo con la velocidad del caterpillar. Con esta modificación se altera simultáneamente toda la sección moldeada. No es posible incrementar algunas dimensiones y disminuir otras a menos de rectificarse el dado. En el caso de la tubería, muchas boquillas para tubos tienen un dispositivo ajustador que permite una mejor concentricidad de diámetros internos y externos.

1.7.6 Contaminación

Si el material es retenido en el cilindro, en el tornillo, o alojado en una postura en la cual no pueda ser empujado por el material que sigue, pueden aparecer marcas indicadoras de descomposición de parte del mismo. La eliminación de material contaminado requiere una cuidadosa limpieza del tornillo, del cilindro y una comprobación general de los elementos de la maquina los cuales no han sido dañados de tal forma que den lugar a la acumulación de plásticos.

1.7.7 Porosidad

Algunos plásticos absorben pequeñas cantidades de agua y se dice que son higroscópicos. En un extrusor esta pequeña cantidad de agua se transformará en vapor; por lo tanto, los extruidos así obtenidos estarán llenos de pequeñas burbujas. Es importante que en estos casos el material plástico esté completamente seco antes de la extrusión.

En algunas ocasiones se obtienen extruidos que muestran porosidad debido a gases atrapados. Esto surge ya sea por aire atrapado en el plástico fundido por vaporización de aditivos o por productos gaseosos generados por la degradación o descomposición del material plástico. La porosidad se puede evitar utilizando husillos con zona de descompresión.

El patrón de fusión del material plástico dentro de un barril, ocurre de la siguiente manera; cuando el plástico está casi totalmente fundido aun quedan algunos gránulos de plástico envueltos en la masa ya fundida, el aire atrapado entre los gránulos de

plástico sin fundir solo pueden escapar hacia la parte de atrás del canal (hacia la tolva). Si la velocidad de extrusión hacia delante es mayor que la velocidad de flujo de aire hacia atrás, entonces el aire será llevado hacia delante y el extruido resultará con porosidad. Por lo tanto, la porosidad puede reducirse al disminuir la velocidad de extrusión.

1.7.8 Degradación

Todos los plásticos tienden a degradarse cuando están sujetos a altas temperaturas, aunque algunos son más resistentes que otros. Entre los plásticos más importantes comercialmente, el PVC es probablemente el más susceptible a la degradación. La temperatura a la cual se empieza a degradar es muy cercana a su propia temperatura de procesamiento. Así, cuando se trabaja con PVC es muy importante mantener un exacto control de la temperatura.

1.7.9. Piel de tiburón y abambuamiento

Este es un defecto de la superficie, asociado con las condiciones a la salida del dado. Este consiste en una serie de fisuras muy pequeñas (grietas), perpendiculares a la dirección de extrusión.

Se manifiesta inicialmente como una apariencia de acabado mate, y se agrava a medida que aumenta la velocidad de flujo.

Este defecto se debe a los esfuerzos de tracción, se genera cuando el material fundido, conforme avanza a lo largo del canal del dado, tiene un perfil de velocidad, con una velocidad máxima en el centro y una velocidad cero en la pared. Conforme abandona los bordes del dado, el material de la pared tiene que acelerarse hasta la velocidad a la cual el producto sale del dado. Esto genera esfuerzos a la tracción y, si el esfuerzo excede la resistencia a la tracción, la superficie se rompe, generando el defecto visual.

Si se favorecen las condiciones que causan la piel de tiburón, es decir, si se vuelve excesiva la presión en el extrusor o disminuye la temperatura del dado, el efecto provoca una apariencia de grano grueso, por lo común se conoce como cáscara de naranja. Poco a poco, la restitución de los esfuerzos de tracción se agrava y el material sometido a extrusión en su totalidad de pronto se retrae. El resultado es el

"abambuamiento", llamado así porque la pieza sometida a extrusión se asemeja en apariencia al bambú.

El calentamiento extra del dado ayuda con frecuencia a remediar estos defectos, al relajar térmicamente los esfuerzos y disminuir la viscosidad. Una idea errónea pero común es que la piel de tiburón es una especie de fractura de fundido suave, y es cierto que la formación de la piel de tiburón, al incrementarse la velocidad del extrusor, puede estar seguida por el rompimiento completo de la pieza sometida a extrusión que caracteriza a la fractura del fundido si aumenta la velocidad. Sin embargo, los dos fenómenos tienen diferentes orígenes, de tal manera que la acción que se tome para prevenir uno de ellos puede contrarrestar el otro.

1.7.10 Fractura del fundido

Si los esfuerzos de tracción son grandes, de manera que sobrepasaran la resistencia a la tracción del material fundido, las líneas de corriente dentro del dado no solo se vuelven caóticas sino también discontinúas. La suavidad del flujo laminar deseable se pierde completamente, como resultado el producto de extrusión que sale del dado será de forma irregular.

Este fenómeno se conoce como fractura del fundido o turbulencia elástica. Esta es otra manifestación del efecto elástico, asociado a la extrusión de polímeros como el PVC. Mientras que a bajas velocidades de corte (baja velocidad de flujo) se pueden obtener extruidos con superficie tersa, por encima de una velocidad de corte crítica el extruido empieza a aparecer con distorsiones de forma helicoidal. La forma de distorsión varía, sin embargo, se reconoce que la causa primaria de la distorsión del extruido es la elasticidad del compuesto.

Se ha encontrado con respecto a las condiciones de operación, la severidad de la distorsión aumenta al aumentar la velocidad de corte, y disminuye al aumentar la temperatura, al aumentar la longitud paralela del dado y disminuir el ángulo de entrada del dado.

1.8. Sistema de Enfriamiento de Tubería PVC extruida. [5]

Tiene por objeto remover el calor excedente que la tubería conserva a la salida del tanque de calibración. La importancia del enfriamiento radica en la estabilidad que adquiere el plástico para no deformarse al pasar por la unidad de tiro, en donde el tubo se somete a presiones que podría producir alteraciones en la forma circular requerida.

Se puede encontrar dos tipos de enfriamiento:

1. Enfriamiento por Espreado:

El tubo pasa por la unidad de enfriamiento, que consiste en una cámara donde numerosas boquillas instaladas rocían agua fría sobre la tubería. Este tipo de enfriamiento es usado para tubería de gran diámetro donde las velocidades de producción son bajas y la aspersion puede lograr un enfriamiento efectivo, por el tiempo de permanencia elevado del producto dentro de este equipo.

2. Enfriamiento por Inmersión:

El tubo pasa por una tina llena de agua en constante enfriamiento; la tina de enfriamiento consta de una bomba sumergible, la cual mantiene en constante recirculación el agua. Así se lleva acabo por un intercambio de calor también constante. A diferencia del enfriamiento por esperado, la inmersión es usada para tubería de menor diámetro, donde por las velocidades altas de extrusión se requiere de un enfriamiento intenso.

Una vez logradas las dimensiones del producto, el tubo se inmersa en una tina de agua a temperatura de 10-20°C para su enfriamiento y evitar cualquier deformación posterior del producto. Antes del proceso de enfriamiento, no debe aplicarse ningún esfuerzo o presión al producto para evitar el riesgo de provocarle una deformación permanente fuera de las medidas requeridas. Junto a la tina de enfriamiento, un elemento de arrastre mueve el tubo a una velocidad constante para aplicar un enfriamiento continuo y homogéneo.

A continuación se muestra la foto de la bañera para distintos diámetros:



Figura.1.8.Bañera de enfriamiento de tubería PVC.

Conclusiones Parciales del Capítulo 1

🖨 El PVC es un plástico de mucha utilidad y en el proceso de fabricación de las tuberías por extrusión se requiere un riguroso control de los parámetros de trabajo. El proceso de enfriamiento de las tuberías debe de ser a una temperatura que garantice que las propiedades mecánicas de las que depende la calidad de la misma no sufran variación, no obstante puede estudiarse la posibilidad de aumentar a la temperatura de agua helada a más de 10°C.

CAPITULO 2

CAPÍTULO II: Proceso de transferencia de calor durante el enfriamiento de PVC. Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección.

Caso en estudio: Petrocasas Cienfuegos

2.1. Empresa PETROCASAS. [1]

La Empresa PETROCASAS, surge como parte del proceso inversionista vinculado a la Refinería de Petróleo en las instalaciones de la antigua empresa Plastimec que fue inaugurada el 9 de abril de 1979, con tecnología búlgara, soviética y alemana. Entre sus producciones estaban: las tuberías de PVC, polietileno de alta, de media y de baja densidad y polipropileno de distintos diámetros y espesores con sus accesorios, tanto plásticos como metálicos no ferrosos y aspersores. La empresa introdujo en el periodo otras tecnologías, como, termo formado desechable y carpinterías plásticas de PVC y Aluminio.

En los momentos actuales se construye la fábrica PETROCASAS que producirá tuberías de PVC, hidráulicas, sanitarias y eléctricas así como perfilería para la construcción de viviendas de PVC, madera artificial y elementos de carpintería. Las tuberías pueden ser fabricadas, de diferentes colores pero el predominante es el gris y no es roscable sino pegada, también se construirán abocinadas con juntas de caucho, pero predomina el pegamento.

La materia prima a utilizar es el PVC. Sus costos varían en dependencia de cómo se encuentre el petróleo pero oscila entre 2000 y 2500 dólares la tonelada. Se puede importar de varios países entre ellos: Italia, Corea, Colombia México, Alemania, Rusia y otros. El mercado actual es con Venezuela.

El surtido de tuberías a fabricar se especifica en la siguiente tabla. Se basa en tuberías cuyas especificaciones originales son de EE.UU. Normalmente de la Asociación Americana para Pruebas de Materiales, ASTM (por sus siglas en inglés, SI). Una característica importante es que el diámetro nominal no corresponde al diámetro externo, ni al diámetro interno. Mantiene constante el diámetro externo para los diferentes espesores de pared, por lo que el diseño del tubo se basa en esta característica. Se mide en pulgadas.

Tamaño nominal	Diámetro exterior promedio, para todas las series SDR		Diámetro exterior máximo y mínimo, Ovalidad (desviación de la redondez)			
			Series SDR 64/41/32.5/26/21		Series SDR 17/13.5	
(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)	(mm)	(pulg)
½	21.34 ± 0.10	0.840 ± 0.004	21.34 ± 0.38	0.840 ± 0.015	21.34 ± 0.20	0.840 ± 0.008
¾	26.67 ± 0.10	1.050 ± 0.004	26.67 ± 0.38	1.050 ± 0.015	26.67 ± 0.25	1.050 ± 0.010
1	33.40 ± 0.13	1.315 ± 0.005	33.40 ± 0.38	1.315 ± 0.015	33.40 ± 0.25	1.315 ± 0.010
1 ¼	42.16 ± 0.13	1.660 ± 0.005	42.16 ± 0.38	1.660 ± 0.015	42.16 ± 0.30	1.660 ± 0.012
1 ½	48.26 ± 0.15	1.900 ± 0.006	48.26 ± 0.76	1.900 ± 0.030	48.26 ± 0.30	1.900 ± 0.012
2	60.32 ± 0.15	2.375 ± 0.006	60.32 ± 0.76	2.375 ± 0.030	60.32 ± 0.30	2.375 ± 0.012
2 ½	73.02 ± 0.18	2.875 ± 0.007	73.02 ± 0.76	2.875 ± 0.030	73.02 ± 0.38	2.875 ± 0.015
3	88.90 ± 0.20	3.500 ± 0.008	88.90 ± 0.76	3.500 ± 0.030	88.90 ± 0.38	3.500 ± 0.015
3 ½	101.60 ± 0.20	4.000 ± 0.008	101.60 ± 1.27	4.000 ± 0.050	101.60 ± 0.38	4.000 ± 0.015
4	114.30 ± 0.23	4.500 ± 0.009	114.30 ± 1.27	4.500 ± 0.050	114.30 ± 0.38	4.500 ± 0.015
6	168.27 ± 0.28	6.625 ± 0.011	168.27 ± 1.27	6.625 ± 0.050	168.27 ± 0.89	6.625 ± 0.035
8	219.07 ± 0.38	8.625 ± 0.015	219.07 ± 1.90	8.625 ± 0.075	219.07 ± 1.14	8.625 ± 0.045
10	273.05 ± 0.38	10.75 ± 0.015	273.05 ± 1.90	10.75 ± 0.075	273.05 ± 1.27	10.75 ± 0.050
12	323.85 ± 0.38	12.75 ± 0.015	323.85 ± 1.90	12.75 ± 0.075	323.85 ± 1.52	12.75 ± 0.060

2.2. Introducción a la transferencia de calor.

Transferencia de calor es un proceso por donde se intercambia energía en forma de calor entre distintos cuerpos, o entre diferentes partes de un mismo cuerpo que están a distinta temperatura. [6]

Existen tres mecanismos de transferencia de calor:

1. Conducción
2. Convección
3. Radiación.

Conducción:

Transferencia de calor en donde el calor pasa desde los puntos de mayor temperatura hacia los de menor temperatura en un mismo cuerpo o de un cuerpo a otro en contacto con él.

Radiación: es la forma de transmisión en la que el calor pasa de un cuerpo de mayor temperatura a otro de menor temperatura sin que entre ellos exista un vínculo material. Esto indica que el calor se transmite en el vacío, en forma de ondas electromagnéticas denominadas comúnmente radiación o energía radiante.

Convección:

La convección es el mecanismo de transferencia de calor de una superficie sólida a un fluido en movimiento (aire, agua).

La convección se clasifica en dos tipos según el movimiento del fluido:

1. Natural
2. Forzada.

Convección Natural.

La convección será natural cuando el movimiento del fluido se debe a diferencias de densidad que resultan de las diferencias de temperatura.

Convección Forzada.

La convección será forzada cuando el movimiento de fluido que está en contacto con la superficie del sólido es provocado por medios mecánicos o fuerzas externas, por ejemplo el aire con un ventilador o el agua con una bomba.

La convección forzada se clasifica a su vez en externa e interna dependiendo de si el flujo de fluido es interno o externo. El flujo de un fluido se clasifica como interno o externo dependiendo de si se fuerza al fluido a fluir por un canal confinado (superficie interior) o por una superficie abierta. El flujo de un fluido no limitado por una superficie (placa, alambre, exterior de un tubo) es flujo externo. El flujo por un tubo o ducto es flujo interno si ese fluido está limitado por completo por superficies sólidas.

Cuanto mayor es la velocidad del fluido mayor es la intensidad de la transferencia de calor. La transferencia de calor por convección depende de las propiedades del fluido, de la superficie en contacto con el fluido y del tipo de flujo. Entre las propiedades del fluido se encuentran: la viscosidad dinámica μ , la conductividad térmica k , la densidad ρ . También se podría considerar que depende de la viscosidad cinemática. Entre las propiedades de la superficie que intervienen en la convección están la geometría y la aspereza. El tipo de flujo, laminar o turbulento, también influye en la intensidad de la

transferencia de calor por convección. En cualquier caso, la velocidad de transferencia de calor por convección siempre es proporcional a la diferencia de temperatura entre la superficie y el fluido.

Este mecanismo de transferencia de calor por convección, se explica mediante la **ley de enfriamiento de Newton**, que describe flujo de calor como:

$$q_c = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty): [W]$$

Donde:

q = El calor transferido por la superficie de la tubería cilíndrica; {Wat}

h = Coeficiente conectivo de transferencia de calor. {W/m².K}

A = Área superficial del cilindro {m²}, la parte que emite calor.

$$A = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot l$$

T_s = Temperatura superficial de la tubería cilíndrica. {K}

T_∞ = Temperatura del agua de enfriamiento. {K}

La influencia de las propiedades del fluido, de la superficie y del flujo se cuantifican en el coeficiente de película o coeficiente de transferencia de calor por convección (h).

2.3. Análisis de Transferencia de calor en la bañera de enfriamiento. [2]

Se hará un análisis de la transferencia de calor en la tina de enfriamiento para analizar como varía el coeficiente de transferencia de calor por convección cuando varía la temperatura del agua de enfriamiento.

Como se comentó en el acápite anterior, en el extrusor sale la tubería de PVC caliente, la cual se enfría en una tina de enfriamiento que mantiene agua helada por medio de una motobomba que se hace recircular por una unidad de enfriadora o chiller.

El enfriamiento del plástico ocurre por un proceso de transferencia de calor entre la tubería de PVC caliente y el agua helada de bañera como se muestra en la figura 2.1.

Analizando la interfase sólido-liquido del sistema, se tiene que el sólido es enfriado por convección forzada.

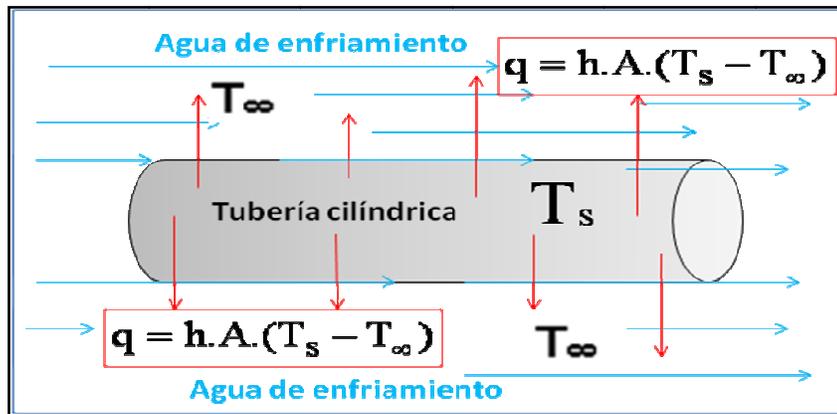


Figura.2.1. Calor transferido por la tubería por convección.

2.3.1. Caso en estudio.

Tubería de PVC de 114.3mm de diámetro y espesor de 1 a 6mm que sale de la extrusora a 190°C y se enfría en una bañera mediante agua helada a 10°C.

Datos de la bañera:

Forma: rectangular.

Ancho: $l_1 = 40 \text{ cm} = 0.4 \text{ m}$

Atura: $l_2 = 40 \text{ cm} = 0.4 \text{ m}$

Longitud: $l = 4 \text{ m}$

Por lo tanto área de la bañera será: $A_b = l_1 * l_2 = 0.4 \text{ m} * 0.4 \text{ m} = 0.16 \text{ m}^2$

Flujo de agua: $Q = 1.4 \text{ m}^3/\text{h} = 3.88 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$

Cálculo de velocidad de agua:

Área de flujo de agua, $A_a = \text{Área de bañera} - \text{Área de tubería}$

Área de tubería = $\pi \cdot (D/2)^2 = \pi \cdot (0.1143/2)^2 = 0.01 \text{ m}^2$

$A_a = 0.16 - 0.01 = 0.15 \text{ m}^2$

$Q = A_a * V$

$V = Q/A_a$

$V = 3.88 * 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s} / 0.15 \text{ m}^2$

$V = 0.0026 \text{ m/s}$

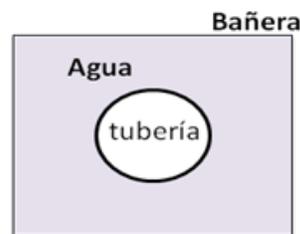


Figura. 2.2. Corte de bañera.

2.3.2. Cálculos del coeficiente de transferencia de calor por convección forzada.

A continuación se desarrolla el cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección variando la temperatura del agua helada de 10⁰C hasta 30⁰C utilizando las correlaciones de Nusselt correspondientes para convección forzada tomando como referencia la bibliografía consultada de la Universidad Autónoma Metropolitana, Facultad de Ingeniería Química donde se analiza el proceso de enfriamiento para el estudio de las propiedades reológicas de un plástico.

El algoritmo de cálculo de coeficiente convectivo, h: [7]

1. Calcular el número de Reynolds para saber si el régimen del fluido es laminar o turbulento.
2. Utilizar las correlaciones de Nusselt correspondientes. Su valor varía al variar la temperatura del fluido.

Los valores de coeficiente de calor por convección forzada en líquido deben estar en el rango de 50 a 20000 W/m².K como se muestra en la tabla de referencia.

Tabla: 2.2. Valores típicos de coeficiente de convección (h).

Convección Libre	h (W/m².K)
Gases	2 - 25
Líquidos	50 - 1000
Convección Forzada	
Gases	25 - 250
Líquidos	50 - 20000

Suposiciones:

Estado estacionario

Flujo externo

Transferencia de calor por convección forzada con flujo transversal al tubo

Propiedades constantes del agua para cada una de las temperaturas fijas.

Despreciable la transferencia de calor por conducción como el diámetro >> espesor.

2.3.2.1. Primer caso: Utilizando Correlación de Hilpert.

1. Cálculo del número de Reynolds:

$$Re_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} : \text{Ecuación I}$$

Donde:

ρ = Densidad de agua: {kg/m³}

V = Velocidad de agua: {m/s}

D = Diámetro de tubería: {m}

μ = Viscosidad dinámica de agua: {N.s/m²}

Propiedades de agua. Ver Anexo 2. Tabla 2.1

2. Cálculo de número de Nusselt:

$$\overline{Nu} = C \cdot Re_D^m \cdot Pr^{1/3} : \text{Ecuación II}$$

Régimen aplicable para:

$$0.4 < Re < 4 \cdot 10^5; Pr \geq 0.7$$

Donde:

C y m son constantes que se toman de la tabla 2.2 de Anexo.2. Según el valor de Reynolds.

Todas las propiedades están evaluadas a la temperatura promedio:

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2}$$

Donde:

T_s = Temperatura de superficie

T_a = Temperatura de agua.

3. Cálculo del coeficiente promedio de transferencia de calor por convección.

$$\bar{h} = \overline{Nu} \cdot \frac{k}{D} : \text{Ecuación III}$$

4. Cálculo del calor transferido por convección.

$$q = \bar{h} \cdot \pi \cdot D \cdot L \cdot \Delta T : \text{Ecuación IV}$$

Tabla: 2.3.Las propiedades del agua buscadas a la temperatura de referencia para la ecuación se muestran a continuación:

Temperatura de agua	Propiedades de Agua a Temperatura promedio. (T_f)				
	Conductividad Térmica Agua	Densidad Agua	Viscosidad Dinámica	Viscosidad Cinemática	Numero Prandtl
($^{\circ}\text{C}$)	K (W/m.K)	ρ (kg/m^3)	μ (N.s/m^2)	ν (m^2/s)	Pr
10	0.68	958.4	2.84E-04	2.96E-07	1.76
15	0.681	956.93	2.74E-04	2.86E-07	1.7
20	0.682	955.11	2.66E-04	2.79E-07	1.65
25	0.683	953.29	2.60E-04	2.73E-07	1.61
30	0.684	951.11	2.53E-04	2.66E-07	1.562

4. Cálculos utilizando las propiedades del agua de la tabla 2.3.

Para $T = 10^{\circ}\text{C}$

$$\text{Re}_D = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} = \frac{958.4 \cdot 0.0026 \cdot 0.1143}{2.84 \cdot 10^{-4}}$$

$$= 1002.89 < 4 \cdot 10^5$$

$$\overline{\text{Nu}} = C \cdot \text{Re}_D^m \cdot \text{Pr}^{\frac{1}{3}}$$

$$= 0.683 \cdot 1002.89^{0.466} \cdot 1.76^{\frac{1}{3}}$$

$$= 20.6463 \approx 20.65$$

$$\overline{h} = \overline{\text{Nu}} \cdot \frac{k}{D}$$

$$= \frac{20.6463 \cdot 0.68}{0.1143}$$

$$= 122.83 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$q = \overline{h} \cdot \pi \cdot D \cdot l \cdot \Delta T$$

$$= 122.83 \cdot \pi \cdot 0.1143 \cdot 4 \cdot (190 - 10)$$

$$= 31740.43 \text{ W}$$

El mismo procedimiento se sigue para el cálculo variando la temperatura de agua a: 15, 20,25 y 30°C. lo que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla: 2.4 Los resultados al sustituir los valores en las ecuaciones (I, II, III y IV) son los siguientes:

	Constante de ecuación Hilpert		CÁLCULOS		
Numero Reynolds	C	M	Número Nusselt	Coefficiente convectivo	Calor transferido
Re	C	M	Nu	h (W/m ² .K)	q (W)
1002.9	0.683	0.466	20.65	122.83	31740.29
1037.9	0.683	0.466	20.74	123.56	31041.12
1067.1	0.683	0.466	20.80	124.11	30288.34
1089.6	0.683	0.466	20.83	124.48	29486.64
1118.1	0.683	0.466	20.87	124.94	28698.70

Como se observa el agua se mueve siempre en régimen laminar y el coeficiente de transferencia de calor por convección varía desde 122.83 W/m².K hasta 124.94 W/m².K o sea aumenta en 2.11 W/m².K lo que representa un 1.69 % lo cual se muestra en el siguiente grafico:

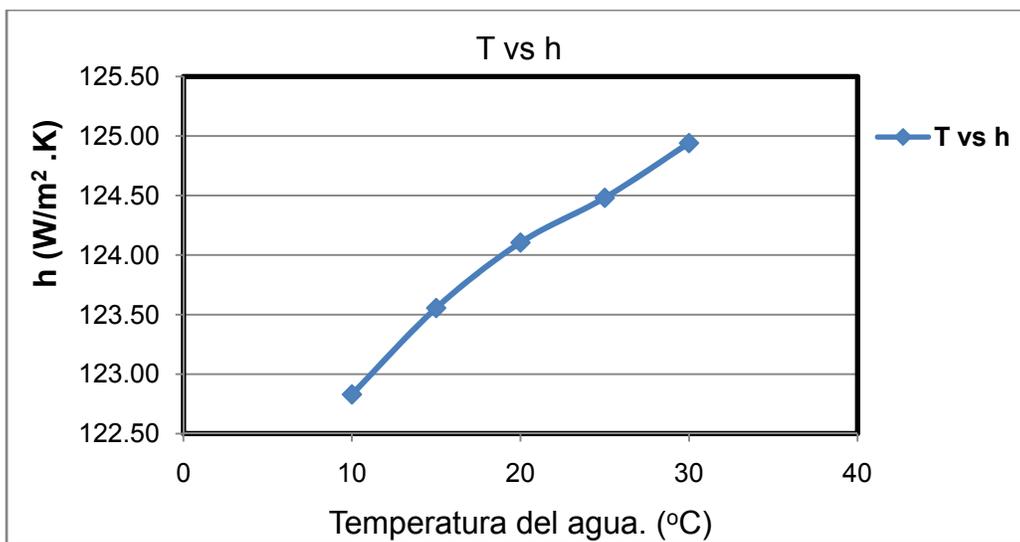


Grafico.2.1 Variación de h con la temperatura del agua

El calor transferido varía de 31740.29 Watt a 28698.70Watt, disminuyendo en un 9.6% cuando se varía la temperatura del agua.

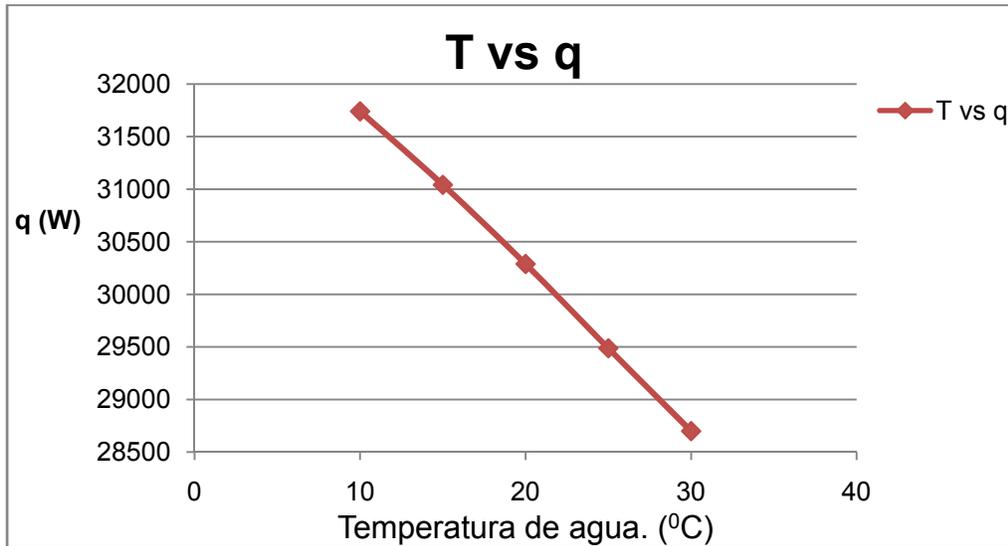


Grafico 2.2 Variación del calor transferido con la temperatura del agua

2.3.2.2. Segundo caso: utilizando la correlación de Churchill y Bernstein.

Siguiendo el mismo procedimiento con los valores de Reynolds ya calculados y utilizándose el número de Nusselt calculado como:

$$\overline{Nu}_D = 0.3 + \frac{0.62 * Re_D^{0.5} * Pr^{1/3}}{[1 + (0.4/Pr)^{2/3}]^{0.25}} * \left[1 + \left(\frac{Re_D}{282000}\right)^{5/8}\right]^{0.8}; \text{Ecuación V}$$

Régimen aplicable para: $Re * Pr > 0.2$

Todas las propiedades están evaluadas a la temperatura promedio:

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2};$$

Se obtienen los siguientes resultados:

Tabla: 2.5 Los resultados al sustituir los valores en las ecuaciones (III, IV y V) son los siguientes:

CÁLCULOS		
Numero Nusselt	Coefficiente convectivo	Calor transferido
Nu	h (W/m ² .K)	q (W)
22.72	135.15	34923.44
22.82	135.95	34154.88
22.88	136.54	33324.26
22.92	136.94	32437.43
22.96	137.42	31564.52

Como se observa el coeficiente h aumenta en un 1.65% siendo al igual que en el caso anterior no significativa y el calor transferido a mayor temperatura representa un 90.38 % del calor que se transfiere cuando el agua esta a 10⁰C.

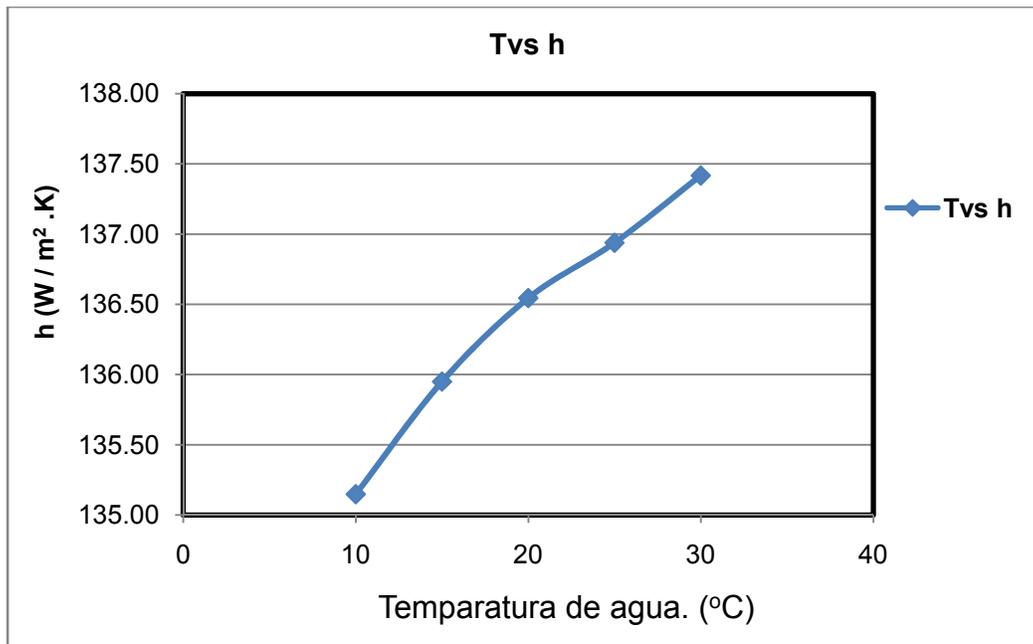


Grafico.2.3. Variación de h con la temperatura del agua

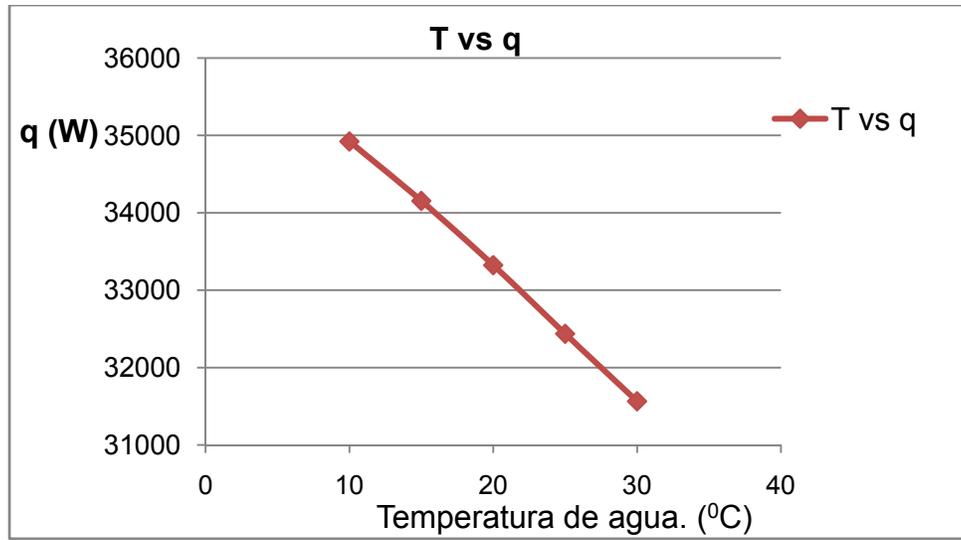


Grafico 2.4. Variación del calor transferido con la temperatura del agua

2.3.2.3. Tercer caso: utilizando la correlación de Dittus-Boelter.

Siguiendo el mismo procedimiento con los valores de Reynolds ya calculados y utilizándose el número de Nusselt calculado como:

$$\overline{Nu}_D = Pr^{0.3} * (0.35 + 0.47 * Re^{0.52}): \text{Ecuacion VI}$$

Régimen aplicable para: $Re > 200$ y $Pr > 0.7$

Todas las propiedades están evaluadas a la temperatura promedio:

$$T_f = \frac{T_s + T_a}{2} : \text{Se obtienen los siguientes resultados:}$$

Tabla: 2.6 Los resultados al sustituir los valores en las ecuaciones (III, IV y VI) son los siguientes:

CÁLCULOS		
Número Nusselt	Coefficiente convectivo	Calor transferido
Nu	h (W/m ² .K)	q (W)
20.7	122.9	31767.0
20.8	124.0	31149.8
20.9	124.8	30461.6
21.0	125.4	29706.9
21.1	126.1	28975.2

Observación:

h: aumenta por 2.54%

q: disminuye por 8.8%

Se mantiene casi el mismo comportamiento que cuando se usaron las correlaciones anteriores.

Ver Anexo.2.3 y 2.4 Los gráficos de T vs h y T vs q de esta correlación.

En el siguiente capítulo se analiza la conducción en estado no estacionario.

Conclusiones parciales de capítulo 2

1. El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada aumenta a la vez que aumenta la temperatura de enfriamiento de agua de 10 a 30⁰C, utilizándose las tres correlaciones de Número de Nusselt.
2. La variación de coeficiente no es significativa ya que mientras varía la temperatura en 20⁰C solo varía h en 2.11W/m².K por la correlación de Hilpert, 2.27W/m².K por la correlación de Churchill y Bernstein y 3.2W/m².K por la correlación de Dittus-Boelter.
3. El calor transferido de la tubería hacia el agua de enfriamiento disminuye al aumentar la temperatura del agua.

CAPITULO 3

CAPITULO III: Transferencia de calor en estado no estacionario. Cálculo de la temperatura de enfriamiento de la tubería PVC.

3.1 Transferencia de calor en estado no estacionario. [8]

La conducción de calor en el estado no estacionario ocurre cuando se produce una variación de la temperatura del cuerpo con el tiempo durante el transcurso del proceso. Un proceso de transferencia térmica es transitorio siempre que la temperatura correspondiente al interior del sistema varíe a lo largo del tiempo; existen muchos ejemplos prácticos en los que intervienen fenómenos de transferencia de calor transitorios, como, los procesos de fabricación en los que el producto que se está manufacturando se tiene que calentar o enfriar para transformarlo en un producto adecuado para ser utilizable, o los hornos industriales que se encienden y apagan de modo cíclico y periódico, en los que se realizan procesos que originan variaciones de temperaturas, tanto en su interior como en sus paredes; los aceros y algunas aleaciones, suelen calentarse y enfriarse para modificar sus propiedades físicas de interés industrial, mediante tratamientos térmicos; los motores térmicos funcionan en régimen transitorio tanto durante el arranque, como en otros momentos, relativamente cortos, etc. Si las variaciones de la temperatura en el sólido a estudiar se consiguen poniéndole en contacto con un medio exterior (líquido o gas), se origina un fenómeno de convección; según sea el valor del coeficiente de convección del fluido y la conductividad térmica del sólido.

Los cálculos de conducción en estado no estacionario se recomienda resolver por tres métodos: [9]

1. Método de la Resistencia Interna Despreciable para Número de Biot, $Bi < 0.1$.
2. Método de la aproximación del primer termino (gráfico de HEISSLER) cuando Biot, $Bi > 0.1$ y el número de Fourier $F_o > 0.2$.
3. Método de la solución exacta.

3.2. Utilizando el primer método.

Se utiliza la siguiente expresión para realizar los cálculos de temperatura o tiempo, de acuerdo a lo que se requiera:

$$\frac{T_t - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-b \cdot t}: \text{Ecuación 3.1}$$

Donde:

$T_{(t)}$ = Temperatura a un tiempo determinado, ($^{\circ}\text{C}$)

T_i = Temperatura inicial de la superficie, ($^{\circ}\text{C}$)

T_∞ = Temperatura del fluido, ($^{\circ}\text{C}$)

$$b = \frac{h \cdot A_s}{\rho \cdot V \cdot c_p}$$

Para poder utilizar este método se requiere que la resistencia a la convección sea mucho mayor que la resistencia a la conducción o sea que el número de Biot debe ser mucho menor que 0.1

Algoritmo de cálculo:

1. Cálculo de número de Biot. (Bi) y comprobación de la condición.

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k} \ll 0.1: \text{Ecuación 3.2}$$

Donde:

h = Coeficiente convectivo para el agua. $\{W/m^2 \cdot K\}$

L_c = longitud característica

k = conductividad térmica de la tubería de PVC. $\{W/m \cdot K\}$

En caso de tubería cilíndrica de poco espesor y sin considerar los efectos de la convección interior se va a asumir tratarla como una pared plana ya que $d_2/d_1 < 2$ por lo que se asume $L_c = L/2$ = espesor de la tubería.

Datos:

$h = 136 W/m^2 \cdot K$

$D = 0.1143m$

$L_c = 0.006m$

$k_{PVC} = 0.19 W/m \cdot K$

Sustituyendo en la ecuación anterior 3.2

$$\text{Bi} = \frac{136 * 0.003}{0.19}$$

$$= 2.15 \gg 0.1$$

Como Biot >> 0.1, no se puede aplicar este método porque no cumple con la condición

3.3. Utilizando el segundo método.

Se utiliza la siguiente expresión para la aproximación del 1er término o sea sería aproximar la serie de Fourier de la solución exacta:

$$\theta^* = \sum C_1 \cdot e^{-(\zeta_1^2 \cdot F_0)} \cdot \cos(\zeta_1 \cdot x^*) \text{ para } n = 1: \text{Ecuación 3.3}$$

La temperatura de diámetro medio se determina a partir del cálculo del coeficiente adimensional de temperatura: [17]

$$\theta_0^* = \frac{T_0 - T_\infty}{T_i - T_\infty} = C_1 * \exp(-\zeta_1^2 * F_0) : \text{Ecuacion 3.4}$$

Donde:

θ_0^* = Temperatura adimensional cuando $x = 0$

T_0 = Temperatura de diámetro medio, ($^{\circ}$ C)

T_∞ = Temperatura del agua, ($^{\circ}$ C)

T_i = Temperatura inicial de la tubería, ($^{\circ}$ C)

C_1 y ζ_1 son coeficiente de la aproximación del primer término y se buscan según el valor de número de Biot. Ver Tabla 2. Anexo 3.

La temperatura superficial de la tubería se determina despejando T_s de esta expresión:

$$\theta^* = \frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \theta_0^* * \cos(\zeta_1) : \text{Ecuacion 3.5}$$

Algoritmo de cálculo según el método de la aproximación del primer término

Para su solución hay que calcular el número de Fourier y comprobar con la condición para su aplicación:

1. Cálculo de número de Fourier y comprobación de la condición

$$F_0 = \frac{\alpha * t}{L_c^2} > 0.2: \text{Ecuacion 3.6}$$

Donde:

α = difusividad térmica del material. (m^2/s)

$$\alpha = \frac{k}{\rho * C_p} : \text{Ecuacion 3.7}$$

ρ = densidad del material. (kg/m³)

C_p = calor específico del material. (J/kg^oC)

t = tiempo de enfriamiento. (s) (Ver anexo 3.1)

En caso de tubería cilíndrica:

L_c = espesor

Datos:

$t = 164\text{s}$ (es el tiempo que demorar enfriar la tubería en la bañera de la longitud de 4m)

$L_c = 0.006\text{m}$

$\rho_{\text{PVC}} = 1400 \text{ kg/m}^3$

$C_{\text{PVC}} = 1250 \text{ J/kg}^{\circ}\text{C}$

$$\begin{aligned}\alpha &= \frac{k}{\rho * C_p} \\ &= \frac{0.19}{1400 * 1250} \\ &= 1.09 * 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}\end{aligned}$$

Por lo tanto;

$$\begin{aligned}F_0 &= \frac{1.09 * 10^{-7} * 164}{0.006^2} \\ &= 0.497 > 0.2\end{aligned}$$

Como $F_0 > 0.2$. se puede aplicar este método.

3.4. Cálculos de la distribución de temperaturas de la tubería de PVC utilizando el método de la aproximación del primer término cuando $F_0 > 0.2$ [9]

Suposiciones:

- ✓ La pared de la tubería se considera como pared plana, por que el espesor \ll diámetro.
- ✓ Convección forzada por fuera de la tubería.
- ✓ Longitud característica $L_c =$ espesor.

Estudio del caso de enfriamiento de la tubería PVC de diámetro 114.3mm y espesor de 6mm a una temperatura de 190°C que se enfría en una primera bañera con agua helada a 10°C.

$$T_i = 190^\circ\text{C}$$

$$T_\infty = 10^\circ\text{C}$$

$$Bi = \frac{h \cdot L_c}{k} = \frac{136 \cdot 0.006}{0.19} = 4.3$$

$$L_c = 0.006\text{mm}$$

$$F_o = 0.497$$

$$C_1 = 1.2318$$

$$\zeta_1 = 1.2779 \text{ radian.}$$

Sustituyendo los valores en la ecuación 3.4:

$$\theta_o^* = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty} = C_1 \cdot \exp(-\zeta_1^2 \cdot F_o)$$

$$\begin{aligned} \theta_o^* &= C_1 \cdot \exp(-\zeta_1^2 \cdot F_o) = 1.2318 \cdot \exp(-1.2779^2 \cdot 0.497) \\ &= 0.547 \end{aligned}$$

Igualando

$$0.547 = \frac{T_o - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

Despejando

$$T_o = 0.547 \cdot (190 - 10) + 10$$

$$T_o = 108.55^\circ\text{C}$$

Es decir, después de 164 segundos la temperatura alcanza a 108.55°C en el diámetro medio de la tubería.

Ahora sustituyendo los valores en la ecuación:

$$\theta^* = \frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty} = \theta_o^* \cdot \cos(\zeta_1)$$

$$\begin{aligned} \theta^* &= \theta_o^* \cdot \cos(\zeta_1) = 0.547 \cdot \cos(1.2779) \\ &= 0.1581 \end{aligned}$$

Por lo tanto, despejando T_s

$$\theta^* = \frac{T_s - T_\infty}{T_i - T_\infty}$$

$$T_s = 0.1581*(190-10)+10$$

$$T_s = 38.45^{\circ}\text{C}$$

Es decir, después de 164 segundos la temperatura llega a 38.45°C en la superficie de la tubería a la salida de la primera bañera.

Este mismo procedimiento de cálculo se utiliza para los distintos valores de espesores aparecen tabulada en la hoja de Excel en anexo 3.2

Los resultados de las temperaturas alcanzadas cuando el agua helada se encuentra a la temperatura de 10°C , para los distintos espesores se muestran en la Tabla 3.1 y el Grafico 3.1 donde se puede apreciar que las temperaturas superficiales varían de 25.3°C a 38.45°C mientras la temperatura en el centro varían de 31.01°C a 108.55°C siendo en este último caso es mucho más significativo la diferencia de temperaturas entre el plano medio y la superficie.

Tabla: 3.1. Temperaturas alcanzadas de tuberías de distintos espesores después de salir de la primera bañera de enfriamiento.

Espesor (m)	Temperatura salida extrusora($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura del agua helada ($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura en medio espesor($^{\circ}\text{C}$)	Temperatura superficial ($^{\circ}\text{C}$)
0.001	190	10	31.01	25.30
0.002	190	10	48.51	32.36
0.003	190	10	63.25	34.53
0.004	190	10	79.51	36.79
0.005	190	10	94.60	38.05
0.006	190	10	108.55	38.45

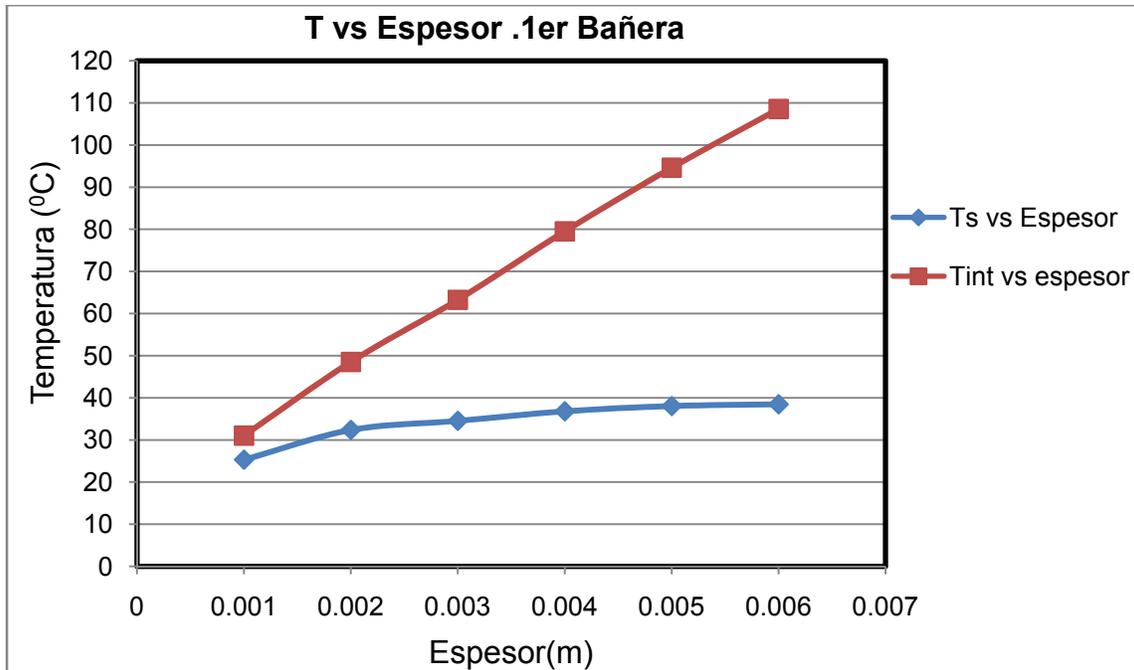


Grafico: 3.1 Comportamiento de temperaturas contra los espesores de la tubería.

En el proceso de enfriamiento, a continuación de las bañeras las tuberías que no alcancen el enfriamiento requerido se van a continuar enfriando por convección forzada con aire a temperatura ambiente en una distancia de 0.35 m antes de entrar a una segunda bañera.

Los cálculos aparecen tabulados en hojas de Excel. Los resultados de las temperaturas obtenidos se muestran a continuación y reflejan que la variación de temperatura entre la superficie y el plano medio varían de forma menos significativa que durante el enfriamiento con agua, no obstante en la tubería de 6 mm de espesor, la temperatura en el plano medio es mayor en un 7.3 % que en la superficie mientras en la tubería de 2 mm es solamente un 0.8 % mayor.

Las tuberías se enfrían con aire a la salida de la primera bañera. Los cálculos se realizan utilizando las mismas expresiones de cálculo anteriores como se muestra en la hoja de Excel del anexo 3.2 Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla: 3.2 Temperaturas alcanzadas de tuberías de distintos espesores después de que enfriado por el aire.

Espesor (m)	Temperatura salida de primera bañera Ts (°C)	Temperatura del aire (°C)	Temperatura en medio espesor (°C)	Temperatura superficial (°C)
0.002	32.36	30	32.36	32.1
0.003	34.53	30	34.61	33.7
0.004	36.79	30	37.06	35.5
0.005	38.05	30	38.51	36.3
0.006	38.45	30	39.07	36.4

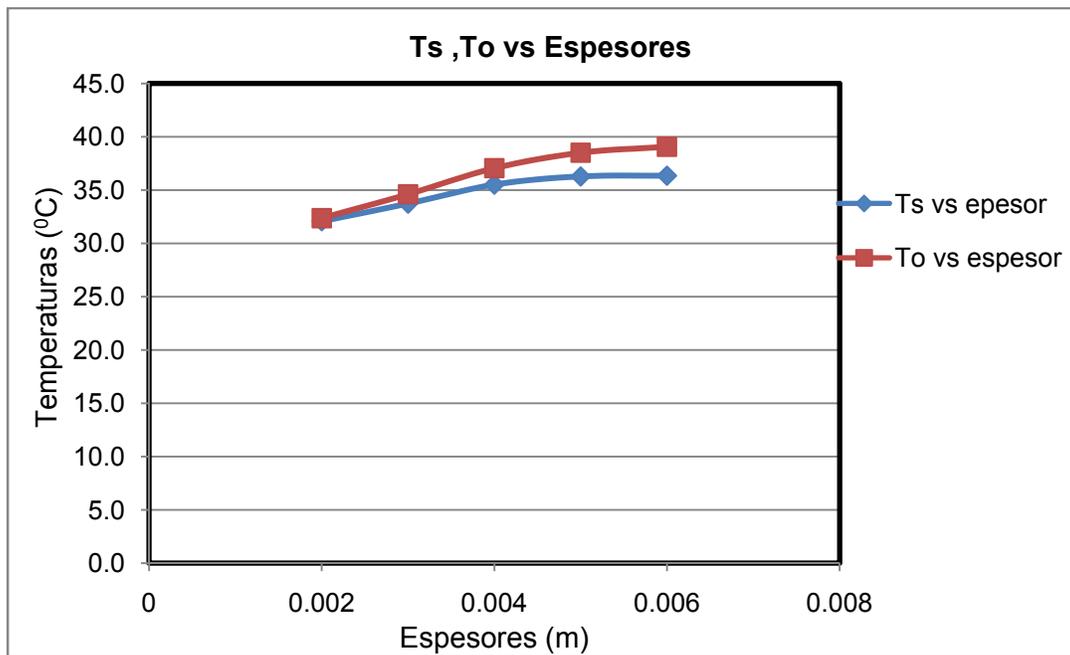


Grafico: 3.2 Variaciones de las temperaturas cuando se enfría por el aire.

Después de que la tubería se ha enfriado con aire puede continuar el enfriamiento en una segunda bañera con agua helada a la misma temperatura (10°C). Los resultados de los cálculos se muestran en hojas de Excel y se muestran en la tabla y gráfico siguiente:

Tabla: 3.3 Temperaturas alcanzadas de tuberías de distintos espesores después de enfriadas en la segunda bañera.

Espesores (m)	Temperatura entrada a la segunda bañera Ts (°C)	Temperatura del agua (°C)	Temperatura en medio espesor (°C)	Temperatura superficial salida (°C)
0.002	32.1	10	15.69	13.6
0.003	33.7	10	18.26	14.3
0.004	35.5	10	20.91	14.8
0.005	36.3	10	23.21	15.0
0.006	36.4	10	25.21	15.1

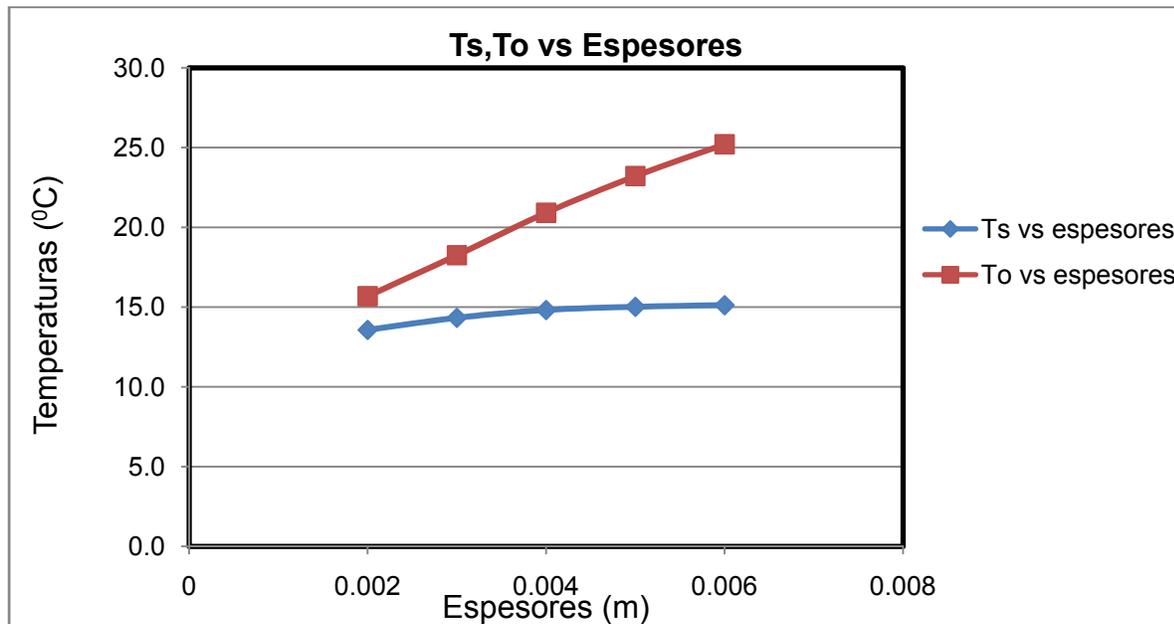


Gráfico: 3.3 Comportamiento de temperaturas contra los espesores de la tubería.

La variación de las temperaturas se comporta similar al que se obtuvo en el enfriamiento en la primera bañera con agua a temperatura similar. (Ver anexo 3.2)

Todos los cálculos anteriores se realizaron con temperatura de agua 10°C . Como el objetivo es el posible uso de agua a otras temperaturas se realizan los cálculos con temperaturas de agua helada a 15 y 20°C . Los mismos se muestran los anexos 3.3 y 3.4

Hasta aquí los resultados de los cálculos de transferencia de calor en estado no estacionario utilizando el segundo método que corresponde al aproximación de primer termino.

3.5 Tercer método: Modelación matemática utilizando el método de la solución exacta. [10]

Un tercer método correspondería al análisis de la transferencia de calor en estado no estacionario con la solución exacta para obtener las soluciones analíticas de la expresión general de la ecuación de la conducción en régimen transitorio, en un sistema en el que se producen variaciones de su temperatura, tanto espacial como temporal. La solución de este método sería la solución al modelo matemático.

La modelación matemática es el proceso de creación de una representación matemática de algún fenómeno en razón de conseguir un mejor entendimiento del mismo. Es un proceso en el cual se cambia la observación con el establecimiento simbólico. Durante la construcción de un modelo se deberá decidir qué factores serán relevantes para el fenómeno y cuales podrán dejar de enfatizarse. En la construcción de un modelo matemático, un proceso real es reducido a sus bases esenciales, y el esquema resultante es descrito por un formulismo matemático seleccionado de acuerdo a la complejidad del proceso. Entonces un modelo matemático de un fenómeno (proceso) real es una descripción matemática

El objetivo final de un modelo matemático es la predicción del comportamiento del proceso. Aunque los problemas pueden requerir métodos de solución muy diferentes, las siguientes etapas son una aproximación general para construir un modelo:

1. Establecer una definición clara de los objetivos.
2. Analizar el sistema real.
3. Dividir el problema del sistema en problemas simples.
4. Buscar analogías.
5. Considerar un ejemplo numérico específico del problema.
6. Determinar las variables de interés.
7. Escribir los datos obvios.
8. Escribir las ecuaciones teóricas o empíricas que describen los fenómenos presentes y relacionan las variables de interés

Como resultado de la modelación matemática aparecen en los libros de texto la ecuación resultante que describe el proceso de la transferencia de calor por conducción, a utilizar para conocer el perfil de temperaturas del plástico durante su enfriamiento considerando en este caso la figura geométrica de una pared plana. Se utiliza en este caso la propuesta de Incropera, Tomo I epígrafe 5.5.

$$\theta^* = \sum C_n \exp(-\zeta_n^2 F_0) \cos(\zeta_n x^*) \text{ desde } n=1 \text{ hasta } n=\alpha$$

Donde:

C_n = es un coeficiente que se determina como:

$$C_n = (4 \operatorname{sen} \zeta_n) / (2 \zeta_n + \operatorname{sen} 2 \zeta_n)$$

y ζ_n son las raíces positivas de la ecuación transcendental

$$\zeta_n \tan \zeta_n = Bi$$

La solución del mismo no está entre los objetivos de este trabajo a este nivel de enseñanza. El análisis de los resultados obtenidos para cada una de las tuberías suponiendo se someten a diferentes temperaturas de enfriamiento se realizan en el siguiente capítulo.

CAPITULO 4

CAPITULO IV. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Los resultados del proceso de enfriamiento de la tubería de PVC de 114.3mm de diámetro exterior con espesores de desde 1 hasta 6mm en una primera bañera, aire y la segunda bañera con temperatura de agua helada con valores de 10,15 y 20°C se muestran a continuación:

4.1. Enfriamiento con agua helada en la primera bañera.

a. Temperatura promedio del agua de 10 °C

La tubería de 1 mm de espesor alcanza una temperatura superficial de 25.3°C y en el plano medio de la pared una temperatura de 31.01°C, por lo que se considera ya en condiciones de enfriamiento o sea con la rigidez necesaria para pasar al otro proceso (transportación para el corte).

En el caso de las tuberías de 2 a 6 mm de espesor, la temperatura superficial alcanzada varia desde 32.36°C para 2 mm, hasta 38.45°C para 6 mm y la temperatura en el centro de 48.51 C a 108.55° C, no obteniéndose el enfriamiento requerido.

b. Temperatura promedio del agua de 15 °C

Los valores de temperatura alcanzados por la tubería de 1 mm es de 29.7 °C y 35.18 °C en la superficie y en el plano medio respectivamente, garantizándose también las condiciones para concluir la etapa de enfriamiento.

Para las tuberías de 2 a 6 mm los valores de temperaturas alcanzadas van de 36.5°C a 42.5° C con temperaturas mayores en el centro.

c. Temperatura promedio del agua de 20 °C

Cuando se eleva la temperatura del agua hasta 20 °C se alcanza para la tubería de 1 mm una temperatura en el plano medio de 39.47 °C y en la superficie de 34.14 °C, enfriándose también en el rango establecido, concluyendo aquí su etapa de enfriamiento. Para espesores de 2, 3, 4, 5 y 6 mm los valores de temperatura en la superficie que se alcanzan son mayores al rango de 20 °C a 35 °C, resultando los siguientes:

Tabla # 4.1 Temperaturas en primera bañera con agua a 20°C

Espesor (mm)	Temperatura superficie (°C)	Temperatura en el plano medio (°C)
2	40.76	55.93
3	42.88	69.94
4	45.00	85.32
5	46.22	99.64
6	46.63	112.87

A continuación se muestra la tabla resumen de las temperaturas alcanzadas para todos los espesores en la primera bañera y una representación grafica de las mismas.

Tabla: 4.2 Temperaturas de las tuberías a la salida de la primera bañera

Enfriamiento en la primera bañera: Temperatura inicial de 190°C							
Espesores (m)	Tiempo enfriamiento (Segundos)	Temperatura Agua = 10°C		Temperatura Agua = 15°C		Temperatura Agua = 20°C	
		To	Ts	To	Ts	To	Ts
0.001	36	31.01	25.30	35.18	29.67	39.47	34.14
0.002	68	48.51	32.36	52.15	36.50	55.93	40.76
0.003	96	63.25	34.53	66.54	38.66	69.94	42.88
0.004	121	79.51	36.79	82.43	40.90	85.32	45.00
0.005	144	94.60	38.05	97.11	42.12	99.64	46.22
0.006	164	108.55	38.45	110.70	42.53	112.87	46.63

Grafico: 4.1 Variación de las temperaturas superficiales a la salida de la primera bañera para diferentes espesores de la tubería y diferentes temperaturas del agua.

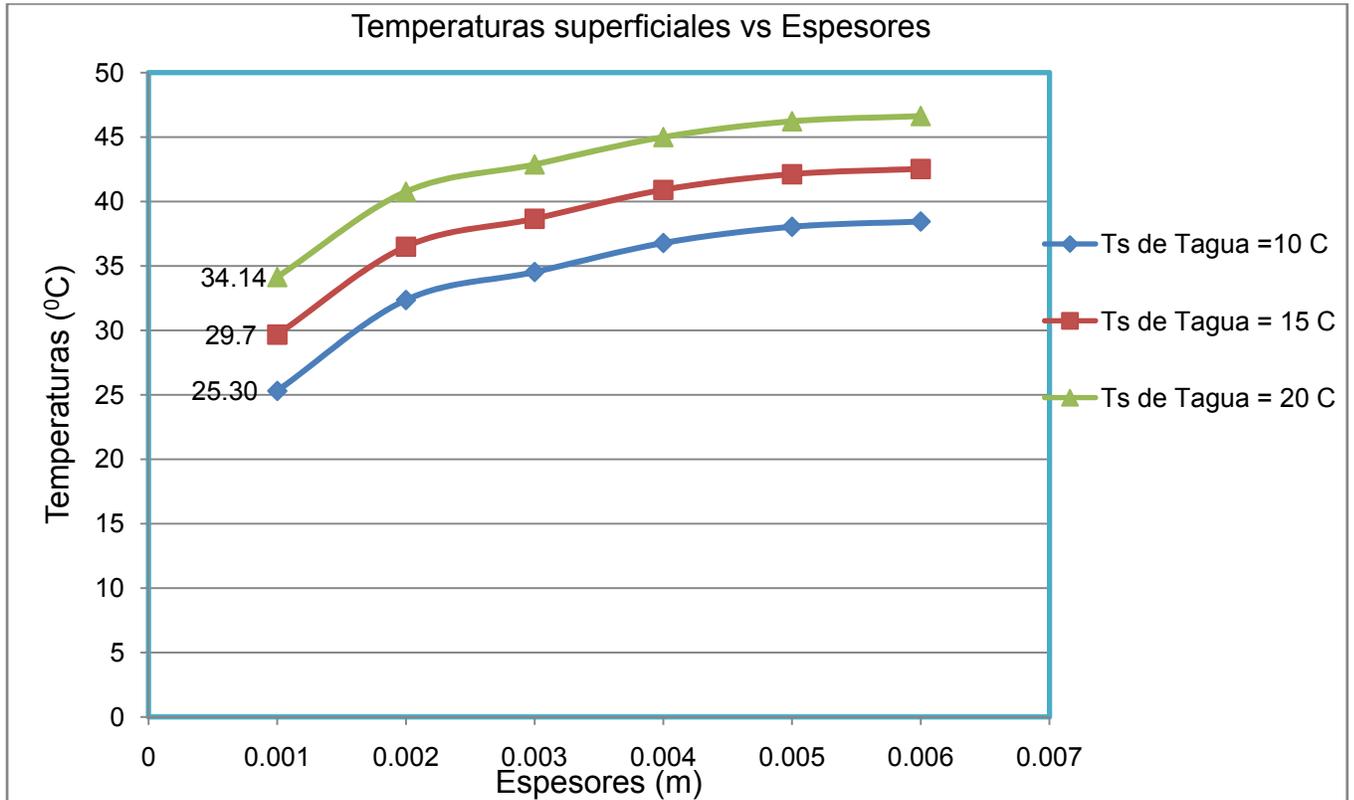
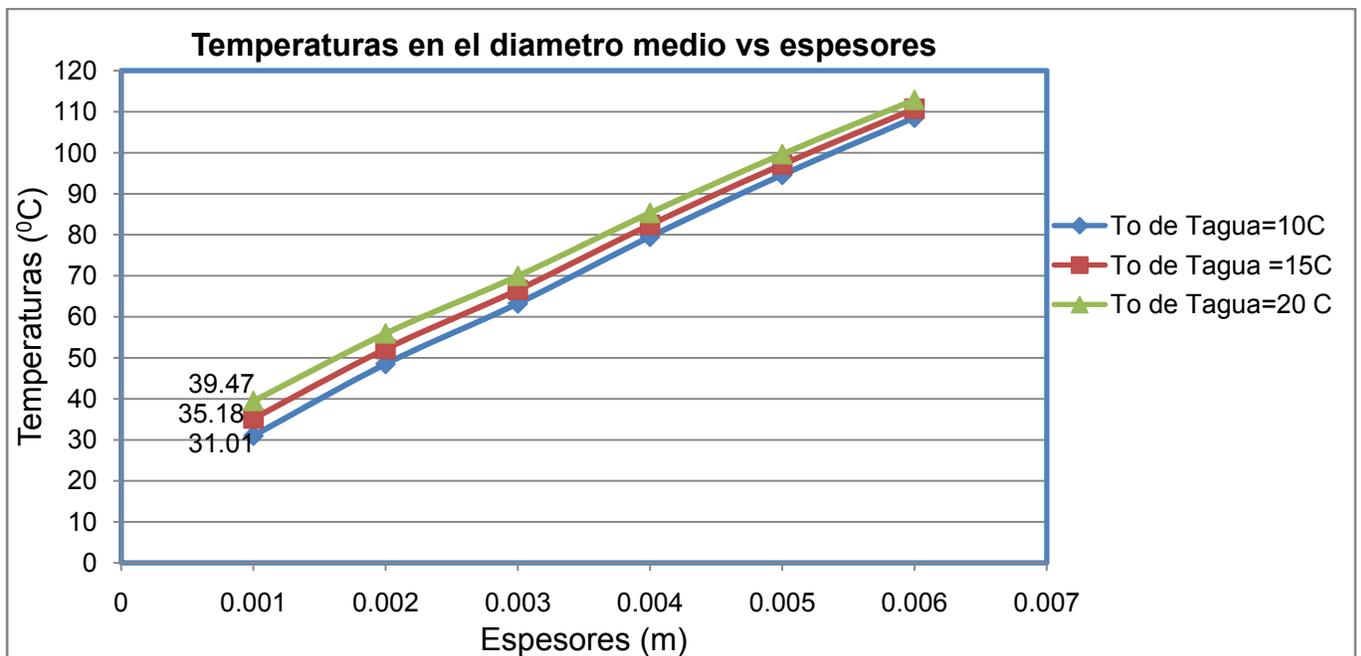


Grafico: 4.2 Variación de temperaturas en el diámetro medio a la salida de la primera bañera para diferentes espesores.



4.2. Enfriamiento con aire a temperatura ambiente.

Se estudia el comportamiento de las tuberías de 2 a 6 mm de espesor. Cuando las tuberías de estos espesores se enfriaron en la primera bañera con agua a temperatura promedio de 10⁰C, las tuberías de 2 a 4 mm de espesor alcanzan enfriarse con aire hasta el rango establecido, por lo que aquí terminaría su etapa de enfriamiento, con temperaturas de:

Tabla# 4.3. Temperaturas en enfriamiento con aire después de agua a 10⁰ C

Espesor (mm)	Temperaturas superficiales (°C)	Temperatura en el plano medio °C
2	32.1	32.36
3	33.7	34.61
4	35.5	37.06

Las tuberías de 5 y 6 mm no alcanzan valores de temperatura en el rango de 20⁰C a 35⁰C, obteniéndose los siguientes valores:

Tabla # 4.4. Temperaturas en enfriamiento con aire después de agua a 10⁰C

Espesor (mm)	Temperaturas superficiales (°C)	Temperatura en el diámetro medio °C
5	36.3	38.51
6	36.4	39.07

Las tuberías de 2 a 6 mm de espesor que no alcanzaron el rango de temperaturas recomendado durante el enfriamiento en la primera bañera con agua a 15⁰C, expuestas al aire alcanzaron temperaturas en el rango de:

2mm----- $T_s = 35.7^{\circ}C$ y $T_0 = 36.5^{\circ}C$

3mm----- $T_s = 37.3^{\circ}C$ y $T_0 = 38.84^{\circ}C$

6 mm---- $T_s = 39.4^{\circ}C$ y $T_0 = 43.44^{\circ}C$

Por lo que se considera que se enfría solo la de 2mm.

Si la temperatura promedio del agua en el primer baño fue de 20°C, en este enfriamiento con aire alcanzan las temperaturas siguientes, todas las mayores a 2mm no alcanzan enfriarse, solo la de 1mm.

Tabla # 4.5 Temperaturas de enfriamiento con aire después de agua a 20°C

Espesor (mm)	Temperaturas superficiales (°C)	Temperatura en el diámetro medio (°C)
1	33.8	34.05
2	39.5	40.77
3	40.9	43.17
4	42.2	45.61
5	42.7	47.16
6	42.5	47.85

Los valores de las temperaturas alcanzadas durante enfriamiento con aire se resumen a continuación.

Tabla: 4.6 Temperaturas de las tuberías después de que enfriado por el aire.

Enfriamiento por Aire: Temperatura de aire a 30°C							
Espesores (m)	Tiempo enfriamiento (Segundos)	Temperatura Agua = 10°C		Temperatura Agua = 15°C		Temperatura Agua = 20°C	
		To	Ts	To	Ts	To	Ts
0.001	3.13	1 ^{er} B	1 ^{er} B	1 ^{er} B	1 ^{er} B	34.1	33.8
0.002	5.91	32.4	32.1	36.5	35.7	40.8	39.5
0.003	8.39	34.6	33.7	38.8	37.3	43.2	40.9
0.004	10.60	37.1	35.5	41.3	38.9	45.6	42.2
0.005	12.58	38.5	36.3	42.8	39.5	47.2	42.7
0.006	14.36	39.1	36.4	43.4	39.6	47.8	42.8

Grafico: 4.3 Comportamiento de las temperaturas superficiales con la tuberías de distintos espesores enfriados por el aire.

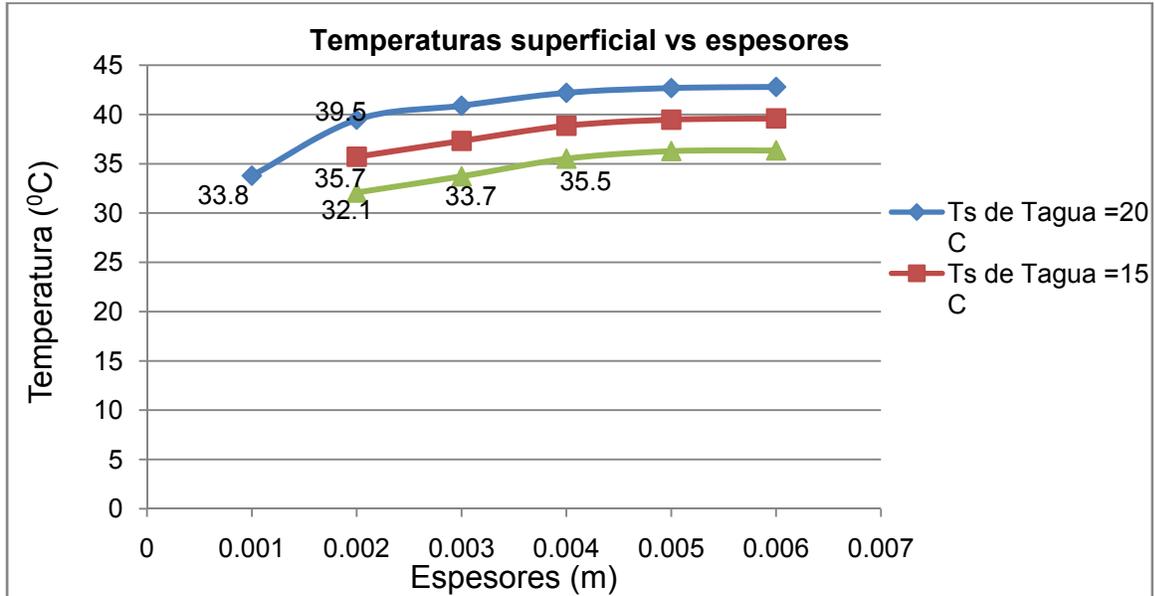
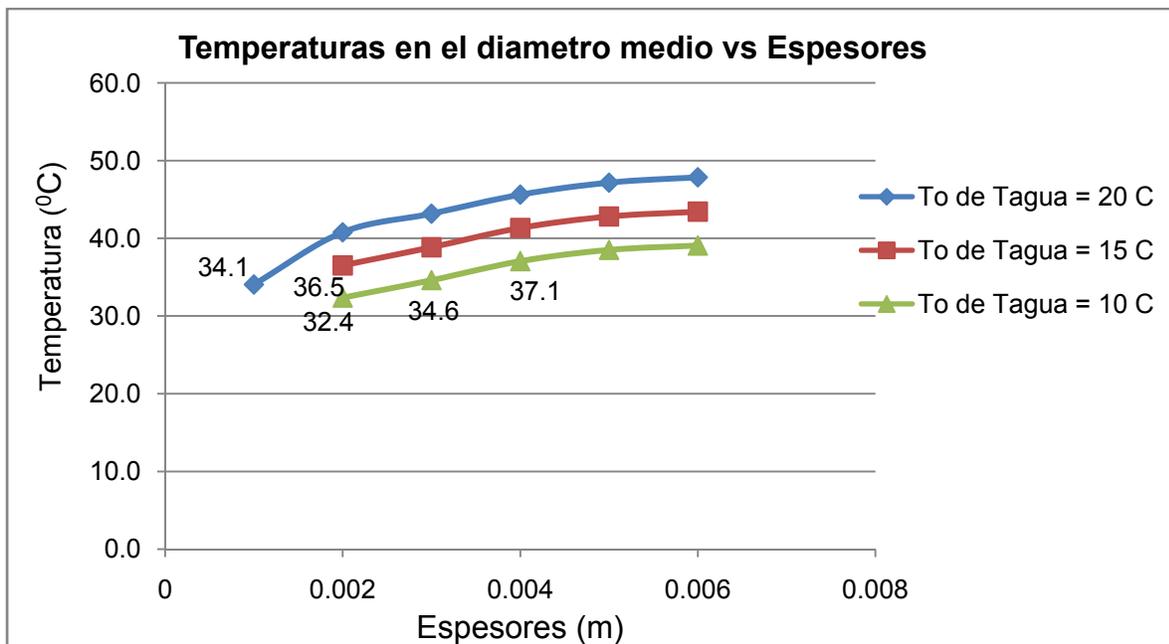


Grafico: 4.4 Comportamiento de las temperaturas en el diámetro medio para las tuberías de distintos espesores enfriados por el aire.



4.3. Enfriamiento con agua helada en la segunda bañera.

1. Temperatura promedio del agua de 10 °C

Las tuberías de 5 y 6 mm que son las que se requieren enfriar, logran en esta bañera temperaturas por debajo de los 25 °C, lo que resultaría innecesario, debiéndose en ese caso buscar otra solución, como pudiera ser el aumento de la distancia de enfriamiento con aire.

2. Temperatura promedio del agua de 15 °C

Las tuberías de 2 a 6 mm, se enfrían a temperaturas menores que 25 °C, lo que no resultaría factible económicamente.

3. Temperatura promedio del agua de 20 °C

Se garantiza para los espesores de 2 a 6 mm, temperaturas superficiales en el rango establecido como se muestra en la tabla, concluyendo aquí su etapa de enfriamiento.

Tabla # 4.7 Temperaturas alcanzadas después de que enfriadas por la segunda bañera con agua a 20°C

Espesor (mm)	Temperaturas superficiales (°C)	Temperatura en el diámetro medio (°C)
2	23.2	25.14
3	23.8	27.36
4	24.2	29.62
5	24.3	31.54
6	24.36	33.13

Tabla: 4.8 Temperaturas de las tuberías a la salida de a segunda bañera para diferentes temperaturas del agua.

Enfriamiento en la segunda bañera							
Espesores (m)	Tiempo enfriamiento (Segundos)	Temperatura Agua = 10°C		Temperatura Agua = 15°C		Temperatura Agua = 20°C	
		To	Ts	To	Ts	To	Ts
0.001	3.13					22.4	21.8
0.002	5.91	15.7	13.6	20.3	18.3	25.1	23.2
0.003	8.39	18.3	14.3	22.8	19.1	27.4	23.8
0.004	10.60	20.9	14.8	25.2	19.5	29.6	24.2
0.005	12.58	23.2	15.0	27.3	19.7	31.5	24.3
0.006	14.36	25.2	15.1	29.1	19.8	33.1	24.4

Grafico: 4.4 Comportamiento de las temperaturas superficiales de las tuberías de distintos espesores a la salida de la segunda bañera

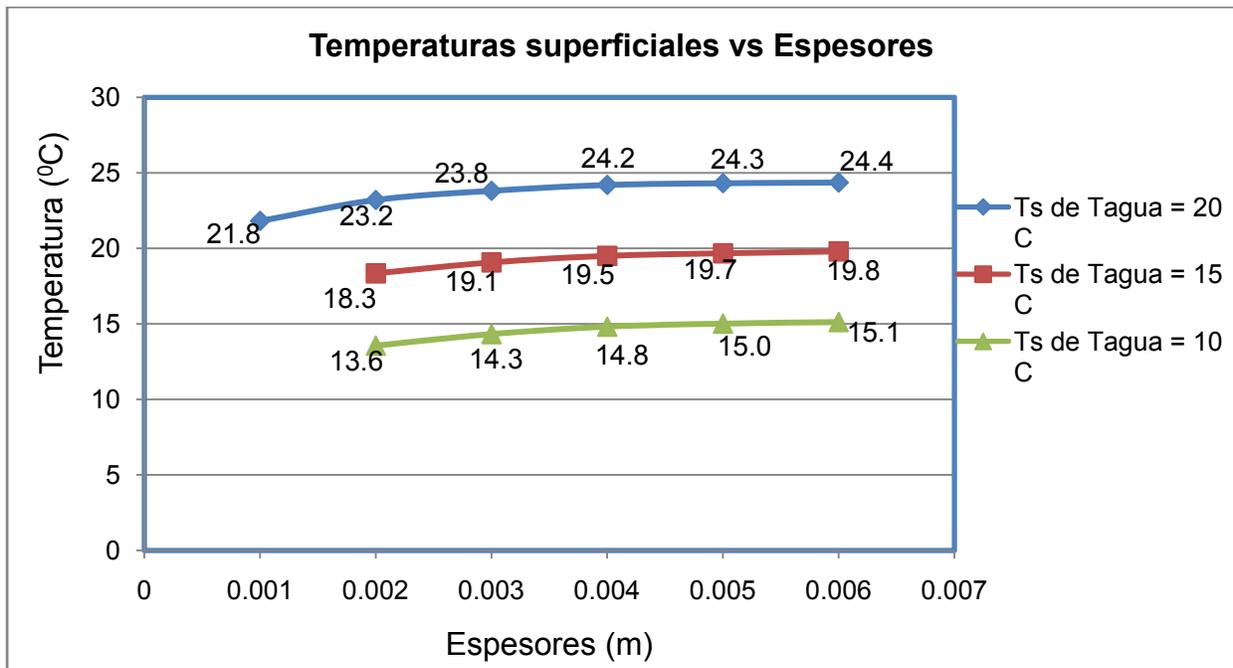
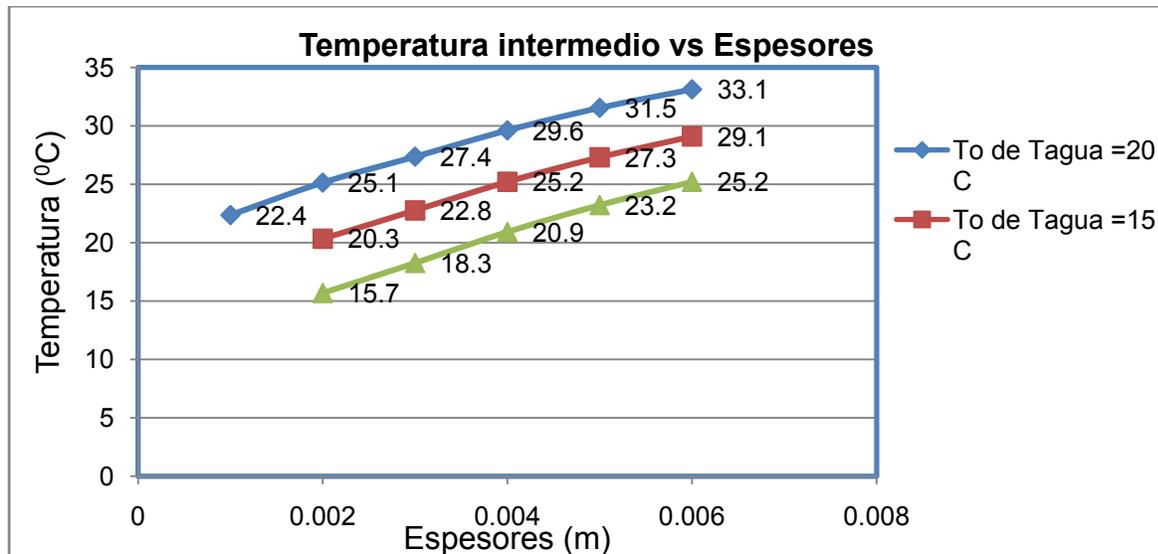


Grafico: 4.5 Comportamiento de las temperaturas intermedio de las tuberías de distintos espesores a la salida de la segunda bañera.



De este análisis se concluye que utilizando el sistema de enfriamiento con agua helada a 10⁰C se garantiza que se enfríe la tubería de 1mm durante su recorrido por la primera bañera. Las tuberías de 2 y 4 mm se enfriarían en la etapa siguiente (enfriamiento con aire) mientras que las tuberías de 5 y 6 mm no obtendrían los valores requeridos de temperatura durante el enfriamiento con aire en las condiciones normales de operación pero no resultaría económico enfriarlas en una segunda bañera con agua a 10⁰C ya que ambas saldrían a temperaturas muy bajas.

Si se alarga la distancia para el enfriamiento con aire alrededor de 2 m la temperatura en la superficie de las tuberías de 5 y 6 mm alcanzan entonces las temperaturas de 35.5⁰C y 35.6⁰C respectivamente por lo que el sistema de enfriamiento resultaría ser: bañera-aire.

Se puede predecir que es posible utilizar el sistema de enfriamiento: bañera- aire- bañera y elevar hasta 20⁰C la temperatura del agua en ambas bañeras, lo que garantiza el enfriamiento de todas las tuberías en el rango de 20⁰C – 35⁰C en la superficie. Resulta necesario realizar una evaluación económica de los costos de inversión en esta variante y compararla con los gastos de llevar la temperatura del agua helada a 10⁰C.

4.4 Propuesta de estrategia de utilización de las bañeras

1. Para agua a temperatura de 10⁰C:

- ✓ Tubería de 1mm de espesor con enfriamiento en la primera bañera.
- ✓ Tubería de 2 a 6mm terminan su enfriamiento con aire a una distancia aproximada a 2m

2. Para agua a temperatura de 20⁰C:

Tuberías de 1 a 6mm se propone enfriar mediante dos bañeras con agua a 20⁰ C con un enfriamiento intermedio con aire en un espacio de 35cm como se muestra en la siguiente figura.



Figura 4.1. Proceso de Enfriamiento de tubería PVC

La propuesta del trabajo por lo expuesto en el análisis de los resultados, es utilizar la segunda estrategia.

4.5 Evaluación Energética – Ambiental [11]

Tomando como referencia el documento MAXIMIZING BUILDING ENERGY EFFICIENCY CONFORT. CONTINUOUS COMMISSIONING GUIDEBOOK FOR FEDERAL ENERGY MANAGER, una regla práctica general que permite determinar la cuantía del ahorro a obtener se puede enunciar como:

Por cada grado Fahrenheit de disminución de temperatura corresponde un incremento del consumo de electricidad del compresor en un 1.7 %

Se deduce entonces que un aumento de 10⁰C de temperatura representa una disminución del consumo de electricidad del compresor de un 30 %.

Cálculos:

Potencia del compresor (P_c)= 156.10 kW

Horas de Operación (h_0) = 6912 h/año

Costos promedio (C_p) = \$ 0.20/kWh

Factor de emisión de CO₂ en Cuba (F_e) = 0.91kgCO₂/kWh

Consumo Anual = $P_c * h_0$

$$= 6912\text{h/año} * 156.10\text{kW}$$

$$= 1078963.2 \text{ kWh/año}$$

Ahorro Energético anual = $0.30 * 1078963.2$

$$= 323688.96 \text{ kWh/año}$$

$$= 323.69\text{MWh/año}$$

Ahorro Económico anual = $323688.96 \text{ kWh/año} * \$0.20/\text{kWh}$

$$= 64737.79 \text{ \$/año}$$

Cantidad de CO₂ dejado de emitir = $323688.96 \text{ kWh/año} * 0.91\text{kgCO}_2/\text{kWh}$

$$= 294556.95\text{kgCO}_2/\text{año}$$

$$= 294.56\text{TonCO}_2/\text{año}$$

CONCLUSIONES

1. Sin dudas, trabajar en buscar soluciones para disminuir el consumo de electricidad en el proceso de enfriamiento en la fábrica PETROCASAS, productora de tuberías de PVC por el método de extrusión, es una línea acorde con el desarrollo sostenible. Aunque en la literatura consultada se aprecian trabajos inclusive de otras universidades en este sentido, estos han estado limitados a la búsqueda del coeficiente de transferencia de calor por convección y al cálculo del calor transferido pero no se encontraron trabajos relacionados con la variación de temperatura del agua de enfriamiento.
2. El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada aumenta a la vez que aumenta la temperatura de enfriamiento de agua de 10 a 30⁰C, utilizándose las tres correlaciones de Número de Nusselt. El coeficiente está en el rango recomendado por la literatura y la variación del mismo no es significativa ya que mientras varía la temperatura en 20⁰C solo varia h en 2.11W/m².K por la correlación de Hilpert, 2.27W/m².K por la correlación de Churchill y Bernstein y 3.2W/m².K por la correlación de Dittus-Boelter, tomándose un valor fijo para utilizar en los cálculos de conducción en estado no estacionario de 136W/m².K
3. El cálculo de las temperaturas por el método de la solución aproximada del primer término es válido para los objetivos de este trabajo donde se requiere conocer el perfil de temperaturas a medida que varía el espesor de una superficie cilíndrica, asumida por similitud, como una pared plana aislada en su cara interior, al obtenerse un valor de Fo de 0.497
4. Los métodos analíticos de solución se limitan a problemas fuertemente simplificados en configuraciones geométricas simples. Es probable que un modelo matemático destinado a una solución numérica represente mejor la situación real ya que los problemas de conducción de calor llevan a ecuaciones diferenciales parciales y las soluciones a las mismas requieren un método

matemático que tenga en cuenta transformaciones de Fourier y Laplace, funciones de Bessel, entre otras, lo que resulta una solución compleja.

5. En el análisis de los resultados se demuestra la efectividad técnica y económica del aumento de la temperatura del agua helada de 10°C a 20°C sin afectar el rango de temperatura superficial de la tubería, que se requiere obtener durante el enfriamiento, para que no afecte la calidad de la misma, obteniéndose valores de temperatura para los espesores de 1 a 6 mm en el rango de 21.8°C a 24.4°C lo que permitiría un ahorro energético aproximado de 323.69 MWh/año en la utilización del chiller, un ahorro económico de 64737.79\$/año dejándose de emitir por este concepto a la atmósfera una cantidad aproximada de 294.56Ton CO_2 /año.

6. Constituye un aporte del trabajo la propuesta de estrategias de enfriamiento: una primera estrategia de una bañera de 4 m de longitud con agua a 10°C seguido de un enfriamiento con aire en un tramo aproximado de 2 m y una segunda estrategia de 2 bañeras de enfriamiento de 4 m de longitud cada una, con agua a 20°C , separadas por un espacio de enfriamiento de 0.35 m con aire. Proponiendo se utilice la segunda por las argumentaciones realizadas en la conclusión anterior, no obstante es necesario evaluar su costo y compararlo con el ahorro energético.

RECOMENDACIONES

1. Analizar con el personal técnico de la empresa PETROCASAS los resultados obtenidos en esta tesis, sugiriéndole realizar una evaluación de los costos económicos y ambientales de aplicación de las dos variantes posibles para el enfriamiento: la primera utilizando una bañera a 10°C con el aumento de la distancia de enfriamiento con aire y una segunda variante de utilizar dos bañeras a 20°C .
2. Realizar los cálculos a 10°C y a 20°C de las propiedades mecánicas y analizar su comportamiento.
3. Realizar cálculos de temperaturas en conducción en estado no estacionario por el método de la aproximación del primer término para la figura geométrica de un cilindro hueco (tubería).
4. En próximos trabajos sobre la temática se propone llegar a un modelo matemático para una tubería y a la solución del mismo.

BIBLIOGRAFÍA

356001_glob. (2011). Retrieved from.

http://www.tecnologiaslimpias.org/html/central/.../356001_glob.htm.

6.2 Extrusión. (2011). Retrieved from

http://www.mater.upm.es/polimeros/Documentos/Cap6_2Extrusion.pdf.

Aseguramiento de la calidad de extrusión de tubería de policloruro de vinilo. (2011).Retrieved from

http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0524_M.pdf.

Clasificación de los plásticos. (2011).Retrieved from <http://www.aniq.org.mx/cipres/clasificacion.asp>.

Conducción transitoria. Contorno Conveccion. (2011).Retrieved from

<http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=17>.

Corace, Juan J. (2009). Mecanismos de Transferencia del Calor (5° ed.).

Correlación de numero Nusselt convección forzada flujo longitudinal por cilindro. (2011).Retrieved

from http://publicaciones.uclm.es/files/.../ebook_chapter_pdf_00335_07_Tema7.pdf.

Diseño de Plantas Químicas. Modelación y Simulación de Procesos (2011) .Retrieved from

<http://www.plantasquimicas.com/index.htm>

Ejemplos termoplásticos. (2011).Retrieved from

<http://es.answers.yahoo.com/question/index?qid=20071005080404AAWUrm>.

Escuela superior politécnica del litoral. (2011).Retrieved from

<http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/8315/3/8273.pdf-tesis>.

Estudio comparativo. (2011).Retrieved from

<http://www.uo.edu.cu/ojs/index.php/tq/article/viewFile/2247/1788>.

Extrusión de polímero. (2011).Retrieved from http://es.wikipedia.org/wiki/Extrusi3n_de_pol3mero.

Guías Empresariales. (2011). Retrieved from

<http://www.contactopyme.gob.mx/guiasempresariales/guias.asp?s=14&guia=104&giro=10&ins=985>.

Incropera, Paul. (n.d.). Fundamentals of Heat and Mass Transfer I (3° ed.). Inc.of New Brunswick.

Incropera, Paul. (n.d.). Fundamentals of Heat and Mass Transfer II (3° ed.). Inc.of New Brunswick.

- Ing. Jiménez Ramos, Antonio. (2009). Implementación del sistema de gestión total eficiente de la energía en la empresa Plastimec y control energético en la línea de extrusión de plástico. Plastimec.
- Instituto tecnológico de Costa Rica.pdf. (2011).Retrieved from <http://bibliodigital.itcr.ac.cr:8080/dspace/bitstream/.../Proyecto+de+Graduacion.pdf>.
- J. P, Holman. (1999). Holman Transferencia de Calor McGraw Hill (Octava.). Universidad Politécnica de Madrid: Concepción Fernández Madrid.
- Maximizing building energy efficiency confort. (2011). Retrieved from <http://www1.cere.energy.gov>
- Memorias. IV. Congreso Interamericano sobre el medio ambiente Róger J. Carrillo Castellanos (Comp.) 2 Tomos. (2011).Retrieved from <http://books.google.com/books?isbn=9802371777>.
- Número de Nusselt. (2011).Retrieved from http://es.wikipedia.org/wiki/N%C3%BAmero_de_Nusselt.
- Perfil de temperatura de enfriamiento de cilindro estado transitorio. (2011).Retrieved from <http://www.scielo.cl/pdf/infotec/v19n4/art06.pdf>.
- Plásticos. (2011).Retrieved from <http://es.wikipedia.org/wiki/Pl%C3%A1stico>.
- Practico. (2011).Retrieved from <http://www.fing.edu.uy/iimpi/academica/grado/tc1/.../Practico2-2006.pdf>.
- Producción química: El mundo de los plásticos. (2011).Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos13/plasti/plasti.shtml>.
- Propiedades Plásticos. (2011).Retrieved from <http://mx.answers.yahoo.com/question/index?qid=20070604170344AA17yXi>.
- Sumario memoria 2.pdf. (2011).Retrieved from http://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/10273/6/Part_2.pdf.
- Tablas con características técnicas y propiedades de PVC. (2011).Retrieved from <http://www.plasticbages.com/caracteristicaspvc.html>.
- Transferencia de calor. Conveccion. (2011).Retrieved from http://www.telecable.es/personales/albatros1/calor/transferencia_de_calor_05_conveccion.htm.
- Tubería de PVC. (2011).Retrieved from <http://avdiaz.files.wordpress.com/2008/10/tuberia-de-pvc.ppt>.

Tuberías de PVC-Tuberías Hidráulicas de PVC. (2011).Retrieved from <http://www.tuberiadepvc.mx/>

Tuberías PVC. (2011).Retrieved from <http://www.maquinariapro.com/materiales/tuberias-pvc.html>.

Universidad Autónoma Metropolitana. (2011). Retrieved from

<http://148.206.53.231/UAMI12215.PDF-introduccion>.

Universidad, Ciencia y Tecnología-Conveccion. (2011).Retrieved from

http://www.scielo.org.ve/scielo.php?pid=S1316-48212005000400007&script=sci_arttext.

Velocidad de aire. (2011).Retrieved from

<http://www.emc.uji.es/asignatura/obtener.php?letra=9&codigo=29>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Ing. Jiménez Ramos, Antonio. (2009). Implementación del sistema de gestión total eficiente de la energía en la empresa Plastimec y control energético en la línea de extrusión de plástico. Plastimec.
- [2] Universidad Autónoma Metropolitana. (2011).
Retrieved from <http://148.206.53.231/UAMI12215.PDF-introduccion>
- [3] Aseguramiento de la calidad de extrusión de tubería de policloruro de vinilo. (2011) Retrieved from http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0524_M.pdf
- [4] Guías Empresariales. (2011). Retrieved from <http://www.contactopyme.gob.mx/guiasempresariales/guias.asp?s=14&guia=104&giro=10&ins=985>
- [5] Producción química: El mundo de los plásticos. (2011). Retrieved from <http://www.monografias.com/trabajos13/plasti/plasti.shtml>.
- [6] Corace, Juan J. (2009). Mecanismos de Transferencia del Calor (5º ed.).
- [7] Incropera, Paul. (n.d.) Fundamentals of Heat and Mass Transfer II (3º ed.). Inc. of New Brunswick
- [8] Conducción transitoria. Contorno Conveccion. (2011). Retrieved from <http://es.libros.redsauce.net/index.php?pageID=17>.
- [9] Incropera, Paul. (n.d.) Fundamentals of Heat and Mass Transfer I (3º ed.). Inc. of New Brunswick.
- [10] Diseño de Plantas Químicas. Modelación y Simulación de Procesos (2011) Retrieved from <http://www.plantasquimicas.com/index.htm>.
- [11] Maximizing building energy efficiency confort. (2011). Retrieved from <http://www1.cere.energy.gov>

ANEXO 1

1.1 Historia del PVC.

1835: Justus Von Liebig (Alemania) Sintetiza el cloruro de vinilo en un laboratorio.

1839: Victor Regnault (Francia) Describe la formación de un polvo blanco cuando una ampolleta de cristal sellado de cloruro de vinilo líquido se exponía al sol.

1860: Roald Hoffman (Polonia) Publica un informe sobre la obtención de poli bromuro de vinilo.

1872: Eugene Baumann (Alemania) Relató como se convertía el VCM en una masa sólida blanca: “no siendo afectada por los disolventes ni por los ácidos”.

1912: Fritz Klatte (Alemania) Estableció los principios de la fabricación industrial.

1928: Waldo Semon (EUA) Extiende una parecida a un caucho en la mesa de un laboratorio. El solo estaba buscando un adhesivo sintético para la marca B.F. Goodrich.

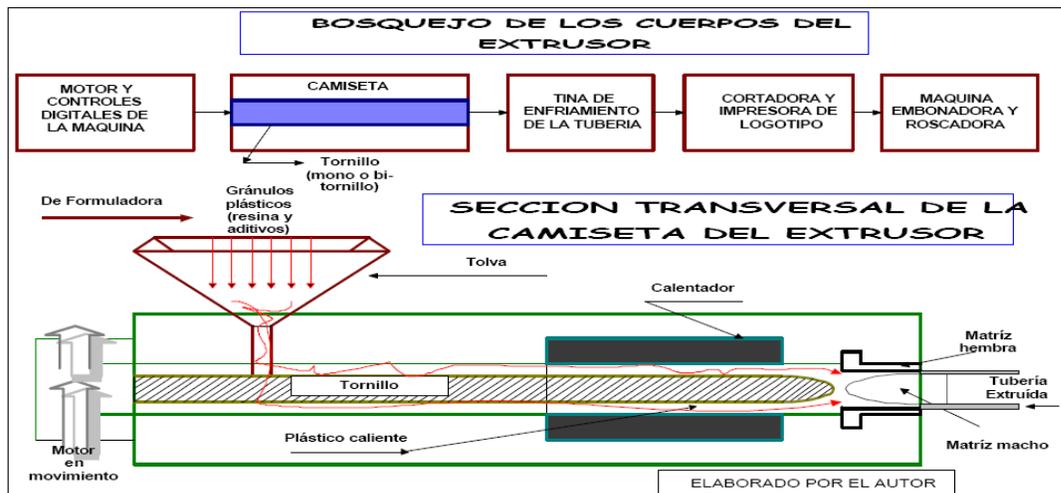
1932: B.F. Goodrich y General Electric desarrollan una formulación de PVC plastificado para utilizarlo como aislante eléctrico en cable y alambre.

1938: Inicia la producción de PVC a gran escala.

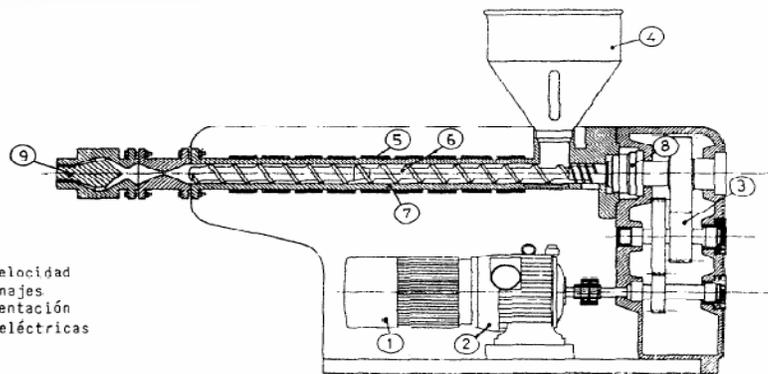
1950: Cinco compañías principales competían en la fabricación de PVC.

1980: Veinte compañías producían PVC. Se da el mayor desarrollo tecnológico y de comercialización del PVC a nivel mundial.

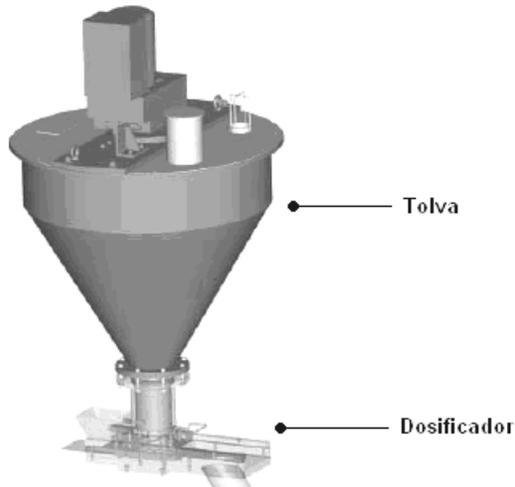
1.2. Máquina Extrusora y sus partes principales.



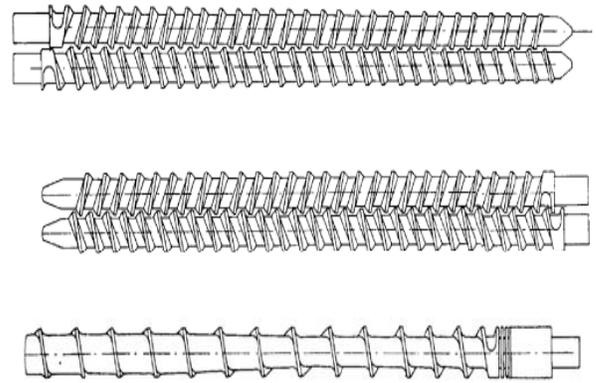
Elaboración y diseño en formato Pdf, por la Oficina General de Sistema de Bibliotecas y Biblioteca Central.



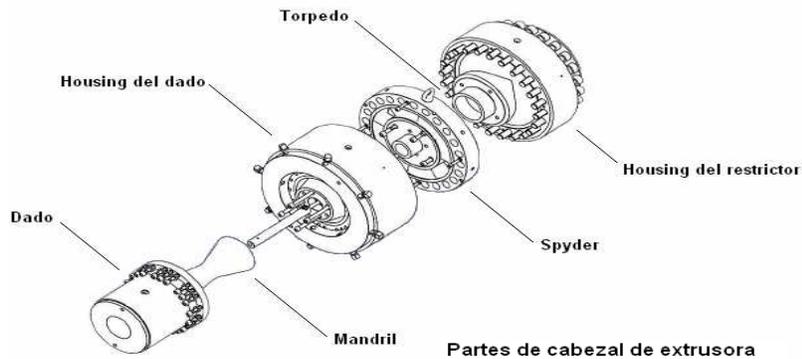
1. Motor
2. Variador de velocidad
3. Caja de engranajes
4. Tolva de alimentación
5. Resistencias eléctricas
6. Husillo
7. Cilindro
8. Cojinetes de empuje
9. Tubería y Macho de extrusión para tubo



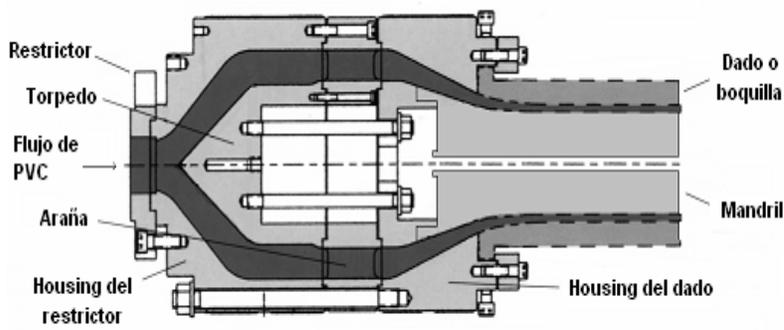
Tolva y dosificador de Extrusora



Diversos tipos de tornillo para extrusora de tubería PVC



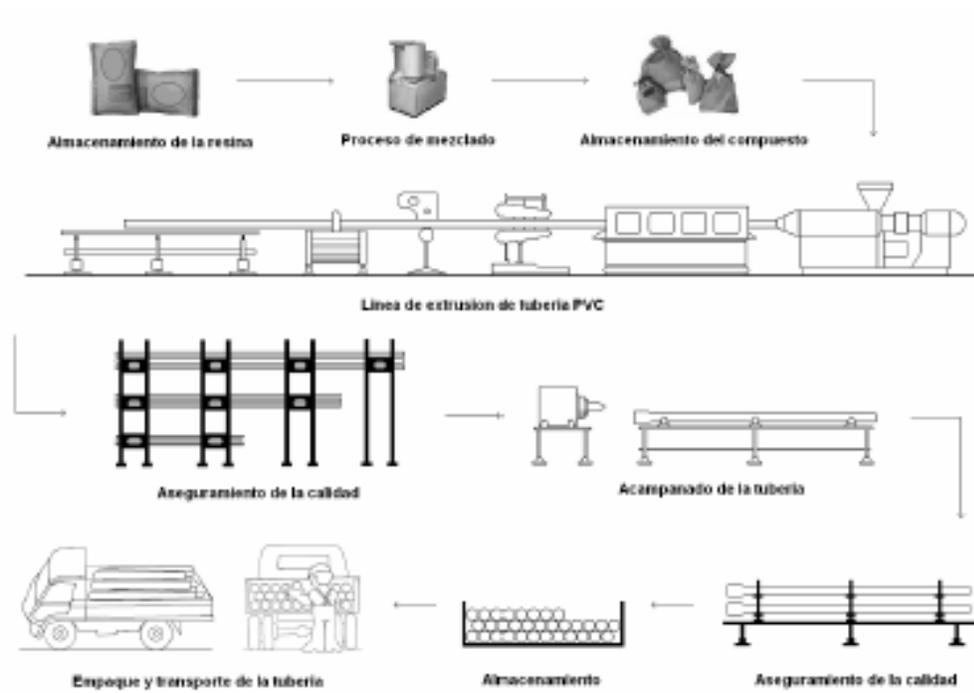
Partes de cabezal de extrusora



Vista interna del cabezal de extrusora

1.3 Esquema de producción de Tuberías PVC

Diagrama del proceso de fabricación de tubería PVC



1.4 Características Técnicas del P.V.C

Propiedades Térmicas	
Calor Específico (J K ⁻¹ kg ⁻¹)	1000-1500
Coeficiente de Expansión Térmica (x10 ⁻⁶ K ⁻¹)	75-100
Conductividad Térmica (W m ⁻¹ K ⁻¹)	0,12-0,25
Temperatura Máxima de Utilización (°C)	50-75
Temperatura Mínima de Utilización (°C)	-30
Temperatura de Deflación en Caliente - 0.45MPa (C)	70
Temperatura de Deflación en Caliente - 1.8MPa (C)	67
Propiedades Físicos.	
Densidad (kg/m ³)	1300 -1450
Coeficiente de dilatación lineal. (mm/m ⁰ C)	0.06 – 0.08
Temperatura de ablandamiento (°C).(Punto Vicat)	65- 100
Coeficiente de fricción.(Manning Hazen – Williams)	n = 0.009 c =150
Propiedades Mecánicas	
Tensión de trabajo admisible/diseño.(MPa)	10
Resistencia a la tracción.(MPa)	45- 55.(>50)
Resistencia a la compresión.(MPa)	61
Modulo de elasticidad.(MPa)	3000
Resistencia superficial. (Ω)	10 ¹² – 10 ¹⁴ .
Elongación hasta la rotura. (%)	15
Dureza shore	D85
Dureza Rockwell.	R107-R122

1.5. Características Tuberías de PVC

Tabla
Características de Tubería Blanca

TUBERÍA BLANCA		
Medidas (en pulgadas)	Características	Peso (en gramos) *
3/8"	Mediano	120 gr.
1/2"	Liviano	150 gr.
1/2"	Mediano	220 gr.
1/2"	Pesado	260 gr.
1/2"	Pesado Especial	390 gr.
3/4"	Mediano	330 gr.
3/4"	Pesado	360 gr.
1"	Mediano	430 gr.
1"	Pesado	500 gr.
1" ¼	Estándar	640 gr.
2"	Estándar	960 gr.
3"	Estándar	1400 gr.
4"	Estándar	2350 gr.

* El peso en gramos corresponde a un tubo de 3 metros de largo

Tabla
Características de Tubería Gris

TUBERÍA GRIS		
Medidas (en pulgadas)	Características	Peso (en gramos) *
1/2"	Liviano	180 gr.
3/4"	Liviano	240 gr.
1"	Liviano	360 gr.
1" ¼	Estándar	640 gr.
2"	Estándar	960 gr.
3"	Estándar	1400 gr.
4"	Estándar	2350 gr.
6"	Estándar	4800 gr.

* El peso en gramos corresponde a un tubo de 3 metros de largo

Tabla
Características de Tubería Roscable

TUBERÍA ROSCABLE		
Medidas (en pulgadas)	Características	Peso (en gramos) *
1/2"	Roscable	1600 gr.
3/4"	Roscable	2200 gr.
1"	Roscable	3250 gr.

* El peso en gramos corresponde a un tubo de 3 metros de largo

1.6 Clasificación de Tubería PVC.

La tubería PVC se puede clasificar según el sistema de dimensionamiento, la presión de trabajo y el tipo de unión a utilizar.

1.1. Sistema de dimensionamiento

La base de esta clasificación depende del sistema a utilizar, puede ser serie inglesa o serie métrica.

1.1.1 Serie inglesa (SI)

Se basa en tuberías cuyas especificaciones originales son de EE.UU. normalmente de la Asociación Americana para Pruebas de Materiales, ASTM (por sus siglas en inglés). Una característica importante es que el diámetro nominal no corresponde al diámetro externo, ni al diámetro interno. Mantiene constante el diámetro externo para los diferentes espesores de pared, por lo que el diseño del tubo se basa en esta característica. Este tipo de tubería PVC es la más comercializada en Guatemala. Se mide en pulgadas.

1.1.2. Serie métrica (SM)

Las especificaciones originales para este tipo de tubería proceden de la Organización Internacional de Normas, ISO (por sus siglas en inglés). En este caso el diámetro nominal corresponde al diámetro externo. Al igual que la tubería de serie inglesa mantiene constante el diámetro externo a diferentes espesores de pared. Se mide en milímetros.

Los diámetros de los dos tipos de tuberías no coinciden dimensionalmente por lo que no se pueden hacer uniones directamente, sino mediante el uso de una transición.

1.2. Presión de trabajo

Una segunda clasificación muy utilizada depende de la presión recomendable de trabajo y según el sistema de dimensionamiento se pueden clasificar en clases, para la serie métrica, RD's y cédulas para la serie inglesa.

1.2.1. Relación de dimensiones (RD)

El RD o SDR (relación de dimensión estándar o normal, por sus siglas en inglés) se define como el cociente de dividir el diámetro externo promedio entre el espesor mínimo de pared. La ASTM en su norma D-2241 reconoce siete tipos de RD (13.5, 17, 21, 26, 32.5, 41 y 64) los cuales, definen una presión de trabajo para distintos

diámetros nominales de tubería. Esta unidad de clasificación es utilizada en las tuberías de PVC de la serie inglesa.

Tabla I. Presiones de trabajo para RD's estándar

RD	PRESIÓN DE TRABAJO (a 23° C)		
	(kg/cm ²)	(Psi)	(MPa)
13.5	22.14	315	2.17
17	17.6	250	1.72
21	14.0	200	1.38
26	11.2	160	1.10
32.5	8.8	125	0.86
41	7.0	100	0.69

1.2.2 Cédulas

La tubería clasificada por cédulas cumple con las dimensiones de la tubería de hierro galvanizado y es designada por la norma ASTM D-1785. La presión recomendable de trabajo es variable, dependiendo del diámetro, ya que depende de la relación entre el diámetro y el espesor. Las cédulas existentes son: cédula 40, cédula 80 y cédula 120.

Tabla II. Tipos de cédulas y su presión recomendable de trabajo

Diámetro nominal	DE promedio		PRESIÓN DE TRABAJO (PSI)		
	(pulg)	(mm)	CÉDULA 40	CÉDULA 80	CÉDULA 120
½	0.840	21.3	600	850	1010
¾	1.050	26.7	480	690	770
1	1.315	33.4	450	630	720
1 ¼	1.660	42.2	370	520	600
1 ½	1.900	48.3	330	470	540
2	2.375	60.3	280	400	470
3	3.500	88.9	260	370	440
4	4.500	114.3	220	320	430
6	6.625	168.3	180	280	370
8	8.625	219.1	160	250	380

2. Detalles de la tubería PVC hidráulica



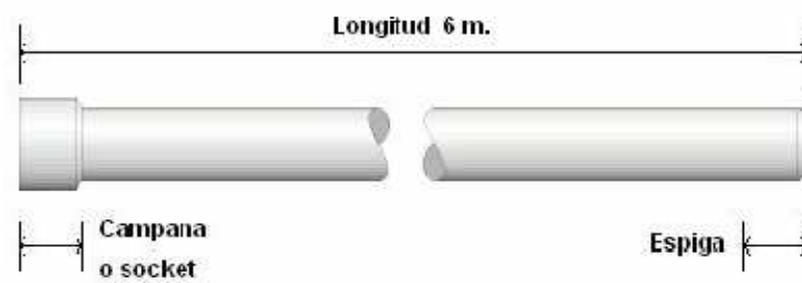
3. Tabla III. Especificaciones de la tubería PVC para drenaje (SDR 64)

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior promedio		Espesor de pared mínimo			
	(pulg)	(mm)	Tolerancia		(pulg)	Tolerancia +/- (pulg)
			+/- (pulg)	+/- (mm)		
4	4.500	114.30	0.009	0.23	0.070	0.020
5	5.563	141.30	0.010	0.25	0.087	0.020
6	6.625	168.28	0.011	0.28	0.104	0.020
8	8.625	219.08	0.015	0.38	0.135	0.020
10	10.750	273.05	0.015	0.38	0.168	0.020
12	12.750	323.85	0.015	0.38	0.199	0.024

4. Tabla IV. Especificaciones de la tubería PVC para alcantarillado

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior promedio		Espesor de pared mínimo			
	(pulg)	Tolerancia +/- (pulg)	RD 41	RD 35	RD 26	RD 23.5
4	4.215	0.009		0.120	0.162	0.178
6	6.275	0.011	0.153	0.180	0.241	0.265
8	8.400	0.012	0.205	0.240	0.323	
9	9.440	0.014	0.230			
10	10.500	0.015	0.256	0.300	0.404	
12	12.500	0.018	0.305	0.360	0.481	
15	15.300	0.023	0.375	0.437	0.588	

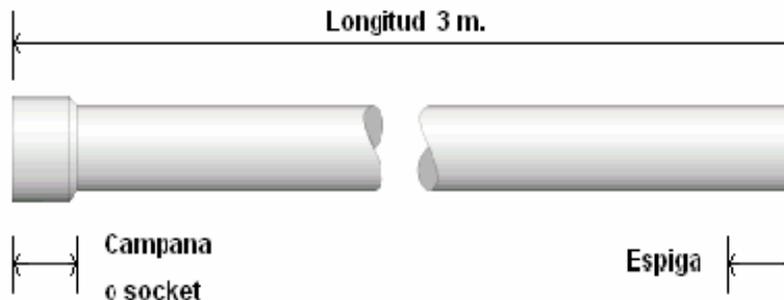
5. Detalles de la tubería PVC sanitaria



6. Tabla V. Especificaciones de la tubería PVC conducto eléctricos.

Diámetro nominal (pulg)	Diámetro exterior (pulg)			Espesor de pared (pulg)	
	Mínimo	Promedio	Máximo	Mínimo	Máximo
1/2	0.721	0.725	0.729	0.044	0.048
3/4	0.921	0.925	0.929	0.048	0.055
1	1.168	1.175	1.182	0.054	0.062
1 1/4	1.491	1.498	1.505	0.059	0.069

7. Detalles de la tubería PVC conductos eléctricos.



ANEXO 2

2.1. Tablas de Propiedades del Agua.

Table F. Agua - $\rho = 998 \text{ kg/m}^3$

Table A.6 Thermophysical Properties of Saturated Water

Temperature, T (K)	Pressure, P (bar)	Specific Volume (m ³ /kg)		Heat of Vaporization, h _{fg} (kJ/kg)	Specific Heat (kJ/kg·K)		Viscosity (N·s/m ²)		Thermal Conductivity (W/m·K)		Prandtl Number		Surface Tension, σ _s (N/m)	Expansion Coeff., β _l (1/K)	Temperature, T (K)
		v _f · 10 ³	v _g		c _{p,f}	c _{p,g}	μ _f · 10 ⁴	μ _g · 10 ⁴	k _f · 10 ³	k _g · 10 ³	Pr _f	Pr _g			
273.15	0.0001	1.000	206.2	2502	4.217	1.884	1790	0.02	560	18.2	12.99	0.815	75.5	0.000	273.15
273	0.00001	1.000	185.7	2489	4.211	1.897	1810	0.020	574	18.3	12.22	0.817	75.5	0.000	273
280	0.00000	1.000	170.4	2465	4.196	1.919	1832	0.020	582	18.6	10.26	0.827	74.8	0.000	280
288	0.00007	1.000	156.4	2431	4.169	1.961	1872	0.020	590	19.0	8.81	0.833	74.3	0.000	288
296	0.00017	1.000	143.7	2387	4.134	1.994	1920	0.020	596	19.3	7.56	0.841	73.7	0.000	296
304	0.00037	1.000	132.4	2340	4.091	2.020	1970	0.020	600	19.5	6.52	0.849	73.2	0.000	304
312	0.00074	1.000	122.3	2290	4.039	2.041	2020	0.020	603	19.6	5.63	0.857	72.7	0.000	312
320	0.00139	1.000	113.3	2238	4.000	2.057	2070	0.020	605	19.6	4.86	0.864	72.2	0.000	320
328	0.00234	1.000	105.2	2184	3.974	2.068	2120	0.020	606	19.6	4.20	0.870	71.7	0.000	328
336	0.00363	1.000	97.8	2128	3.959	2.074	2170	0.020	606	19.6	3.64	0.875	71.2	0.000	336
344	0.00530	1.000	91.1	2070	3.954	2.076	2220	0.020	605	19.5	3.16	0.879	70.7	0.000	344
352	0.00740	1.000	85.0	2010	3.958	2.074	2270	0.020	603	19.4	2.74	0.881	70.2	0.000	352
360	0.01000	1.000	79.4	1949	3.970	2.068	2320	0.020	600	19.2	2.37	0.882	69.7	0.000	360
368	0.01317	1.000	74.3	1887	3.988	2.058	2370	0.020	596	18.9	2.04	0.881	69.2	0.000	368
376	0.01699	1.000	69.6	1824	4.011	2.044	2420	0.020	590	18.5	1.74	0.878	68.7	0.000	376
384	0.02154	1.000	65.3	1760	4.038	2.026	2470	0.020	582	18.0	1.46	0.872	68.2	0.000	384
392	0.02691	1.000	61.4	1695	4.069	2.004	2520	0.020	572	17.4	1.19	0.863	67.7	0.000	392
400	0.03319	1.000	57.9	1629	4.103	1.978	2570	0.020	560	16.7	0.93	0.851	67.2	0.000	400
408	0.04047	1.000	54.8	1562	4.139	1.948	2620	0.020	546	15.9	0.68	0.836	66.7	0.000	408
416	0.04874	1.000	52.0	1494	4.176	1.914	2670	0.020	530	15.0	0.44	0.818	66.2	0.000	416
424	0.05809	1.000	49.4	1425	4.213	1.876	2720	0.020	512	14.0	0.21	0.797	65.7	0.000	424
432	0.06851	1.000	47.0	1355	4.249	1.834	2770	0.020	492	12.9	0.00	0.773	65.2	0.000	432
440	0.08001	1.000	44.7	1284	4.284	1.788	2820	0.020	470	11.7	0.00	0.746	64.7	0.000	440
448	0.09259	1.000	42.5	1212	4.317	1.738	2870	0.020	446	10.5	0.00	0.717	64.2	0.000	448
456	0.10625	1.000	40.4	1139	4.349	1.684	2920	0.020	420	9.2	0.00	0.686	63.7	0.000	456
464	0.12100	1.000	38.4	1065	4.379	1.626	2970	0.020	392	7.8	0.00	0.653	63.2	0.000	464
472	0.13684	1.000	36.5	990	4.407	1.564	3020	0.020	362	6.3	0.00	0.618	62.7	0.000	472
480	0.15378	1.000	34.7	914	4.433	1.498	3070	0.020	330	4.7	0.00	0.581	62.2	0.000	480
488	0.17183	1.000	33.0	837	4.457	1.428	3120	0.020	296	3.0	0.00	0.542	61.7	0.000	488
496	0.19099	1.000	31.4	760	4.478	1.354	3170	0.020	260	1.3	0.00	0.501	61.2	0.000	496
504	0.21127	1.000	30.0	682	4.497	1.276	3220	0.020	222	0.0	0.00	0.458	60.7	0.000	504
512	0.23267	1.000	28.7	604	4.513	1.194	3270	0.020	182	0.0	0.00	0.413	60.2	0.000	512
520	0.25519	1.000	27.5	526	4.527	1.108	3320	0.020	140	0.0	0.00	0.366	59.7	0.000	520
528	0.27883	1.000	26.4	448	4.538	1.019	3370	0.020	96	0.0	0.00	0.317	59.2	0.000	528
536	0.30350	1.000	25.4	370	4.547	0.927	3420	0.020	50	0.0	0.00	0.267	58.7	0.000	536
544	0.32921	1.000	24.5	292	4.554	0.832	3470	0.020	0	0.0	0.00	0.216	58.2	0.000	544
552	0.35597	1.000	23.7	214	4.559	0.735	3520	0.020	0	0.0	0.00	0.164	57.7	0.000	552
560	0.38379	1.000	23.0	136	4.562	0.637	3570	0.020	0	0.0	0.00	0.112	57.2	0.000	560
568	0.41257	1.000	22.4	58	4.563	0.538	3620	0.020	0	0.0	0.00	0.060	56.7	0.000	568
576	0.44232	1.000	21.9	0	4.562	0.438	3670	0.020	0	0.0	0.00	0.008	56.2	0.000	576
584	0.47305	1.000	21.5	0	4.559	0.337	3720	0.020	0	0.0	0.00	0.000	55.7	0.000	584
592	0.50477	1.000	21.2	0	4.554	0.236	3770	0.020	0	0.0	0.00	0.000	55.2	0.000	592
600	0.53749	1.000	21.0	0	4.547	0.135	3820	0.020	0	0.0	0.00	0.000	54.7	0.000	600
608	0.57121	1.000	20.8	0	4.538	0.034	3870	0.020	0	0.0	0.00	0.000	54.2	0.000	608
616	0.60594	1.000	20.7	0	4.527	0.000	3920	0.020	0	0.0	0.00	0.000	53.7	0.000	616
624	0.64168	1.000	20.6	0	4.513	0.000	3970	0.020	0	0.0	0.00	0.000	53.2	0.000	624
632	0.67844	1.000	20.6	0	4.497	0.000	4020	0.020	0	0.0	0.00	0.000	52.7	0.000	632
640	0.71622	1.000	20.6	0	4.478	0.000	4070	0.020	0	0.0	0.00	0.000	52.2	0.000	640
648	0.75503	1.000	20.6	0	4.457	0.000	4120	0.020	0	0.0	0.00	0.000	51.7	0.000	648
656	0.79487	1.000	20.6	0	4.433	0.000	4170	0.020	0	0.0	0.00	0.000	51.2	0.000	656
664	0.83575	1.000	20.6	0	4.407	0.000	4220	0.020	0	0.0	0.00	0.000	50.7	0.000	664
672	0.87767	1.000	20.6	0	4.379	0.000	4270	0.020	0	0.0	0.00	0.000	50.2	0.000	672
680	0.92063	1.000	20.6	0	4.349	0.000	4320	0.020	0	0.0	0.00	0.000	49.7	0.000	680
688	0.96464	1.000	20.6	0	4.317	0.000	4370	0.020	0	0.0	0.00	0.000	49.2	0.000	688
696	1.00971	1.000	20.6	0	4.284	0.000	4420	0.020	0	0.0	0.00	0.000	48.7	0.000	696
704	1.05584	1.000	20.6	0	4.249	0.000	4470	0.020	0	0.0	0.00	0.000	48.2	0.000	704
712	1.10303	1.000	20.6	0	4.213	0.000	4520	0.020	0	0.0	0.00	0.000	47.7	0.000	712
720	1.15128	1.000	20.6	0	4.176	0.000	4570	0.020	0	0.0	0.00	0.000	47.2	0.000	720
728	1.20059	1.000	20.6	0	4.138	0.000	4620	0.020	0	0.0	0.00	0.000	46.7	0.000	728
736	1.25097	1.000	20.6	0	4.099	0.000	4670	0.020	0	0.0	0.00	0.000	46.2	0.000	736
744	1.30242	1.000	20.6	0	4.059	0.000	4720	0.020	0	0.0	0.00	0.000	45.7	0.000	744
752	1.35494	1.000	20.6	0	4.018	0.000	4770	0.020	0	0.0	0.00	0.000	45.2	0.000	752
760	1.40853	1.000	20.6	0	3.976	0.000	4820	0.020	0	0.0	0.00	0.000	44.7	0.000	760
768	1.46320	1.000	20.6	0	3.933	0.000	4870	0.020	0	0.0	0.00	0.000	44.2	0.000	768
776	1.51895	1.000	20.6	0	3.889	0.000	4920	0.020	0	0.0	0.00	0.000	43.7	0.000	776
784	1.57578	1.000	20.6	0	3.844	0.000	4970	0.020	0	0.0	0.00	0.000	43.2	0.000	784
792	1.63369	1.000	20.6	0	3.798	0.000	5020	0.020	0	0.0	0.00	0.000	42.7	0.000	792
800	1.69269	1.000	20.6	0	3.751	0.000	5070	0.020	0	0.0	0.00	0.000	42.2	0.000	800

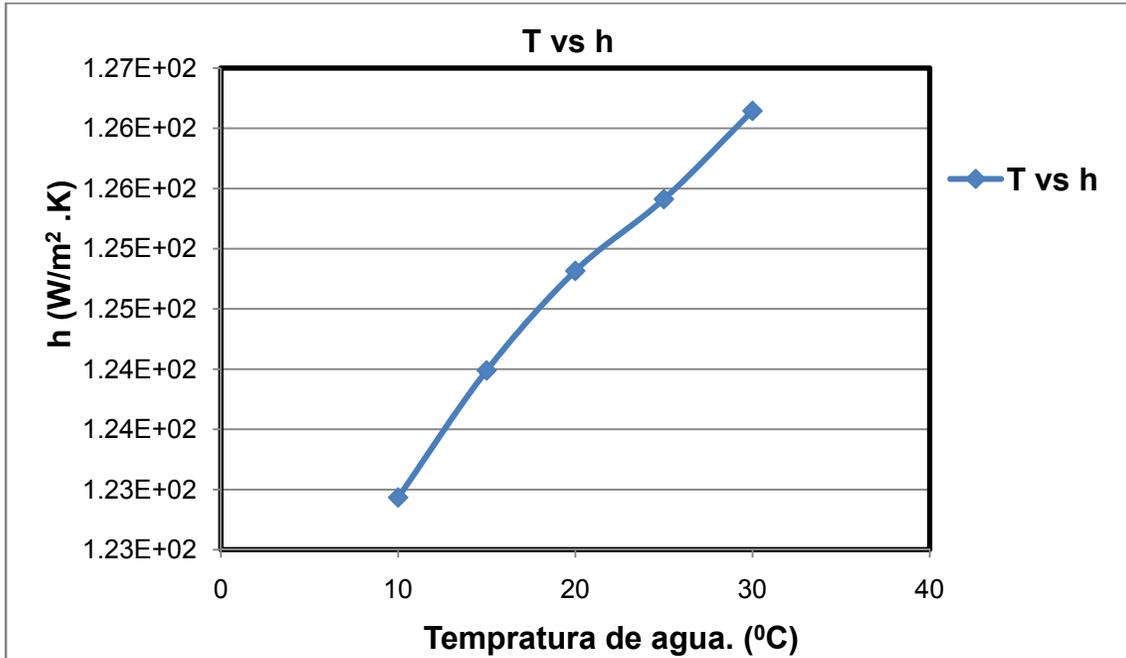
2.2. Tablas de constante de correlación de Hilpert.

Chapter 7 ■ External Flow

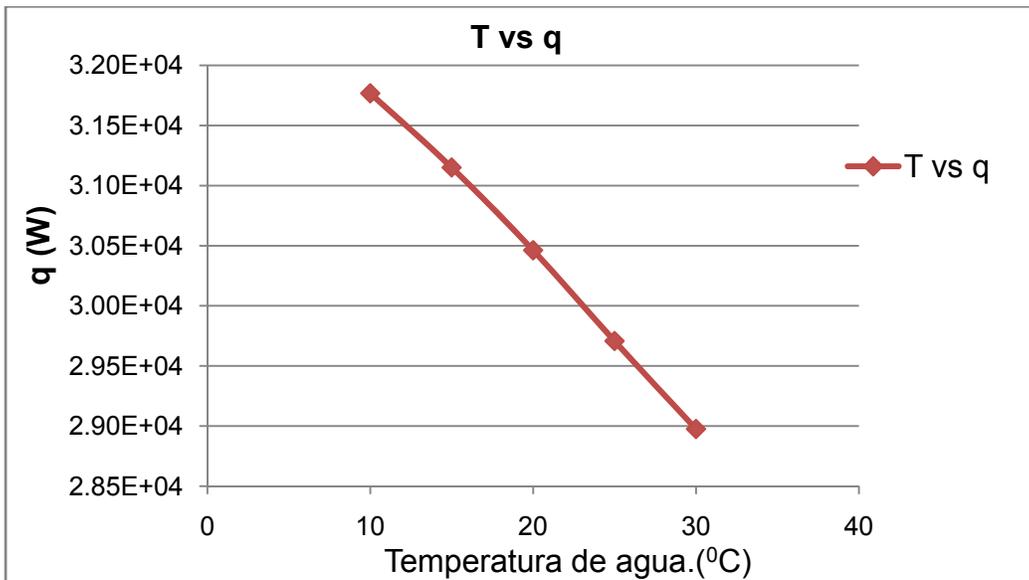
TABLE 7.2 Constants of Equation 7.55b for the circular cylinder in cross flow [13, 14]

Re_D	C	m
0.4–4	0.989	0.330
4–40	0.911	0.385
40–4000	0.683	0.466
4000–40,000	0.193	0.618
40,000–400,000	0.027	0.805

2.3. Gráficos obtenido por la correlación de Dittus –Boelter. Grafico de variación de coeficiente convectivo contra temperatura de agua.



2.4 Gráfico variación de calor transferido contra temperatura de agua.



ANEXO 3

3.1. Cálculos de tiempo de enfriamiento de tuberías PVC de distintos espesores en la bañera de 4m de longitud y un espacio de 0.35m en aire. La producción de tuberías es de 200kg/h hasta 250kg/h.

Cálculo de tiempo de enfriamiento en bañera de 4 metros+ aire de 0.35m					
Volumen	M	Flujo	Velocidad tubería	Tiempo	Tiempo tubería en aire
V (m ³)	M (kg/m)	Q (kg/s)	V (m/s)	t (segundos)	t (segundos)
0.0004	0.497	0.056	0.1118	36	3.13
0.0007	0.985	0.058	0.0592	68	5.91
0.0010	1.465	0.061	0.0417	96	8.39
0.0014	1.935	0.064	0.0330	121	10.60
0.0017	2.397	0.067	0.0278	144	12.58
0.0020	2.850	0.069	0.0244	164	14.36

3.1.1 Coeficiente de aproximación de primer término para el cálculo de estado transitorio. Según el número de Biot.

3.2 • The Biot-Wo number Convention

TABLE 3.1 Coefficients used in the one-term approximation to the series solutions for transient one-dimensional conduction

$Biot$	Plane Wall		Infinite Cylinder		Sphere	
	C_1 (rad)	C_2	C_1 (rad)	C_2	C_1 (rad)	C_2
0.02	0.2098	0.3013	0.1422	1.0225	0.1738	1.3003
0.022	0.1420	1.0013	0.1995	1.0050	0.2445	0.3063
0.03	0.1732	1.0069	0.2438	1.0079	0.2689	1.0090
0.04	0.1987	1.0066	0.2834	1.0109	0.2940	1.0120
0.05	0.2227	1.0062	0.3242	1.0124	0.3182	1.0148
0.06	0.2422	1.0058	0.3658	1.0148	0.3427	1.0178
0.07	0.2512	1.0054	0.4092	1.0167	0.3675	1.0209
0.08	0.2791	1.0049	0.4542	1.0187	0.3926	1.0239
0.10	0.2896	1.0045	0.4992	1.0202	0.4180	1.0268
0.15	0.3113	1.0040	0.6441	1.0222	0.4436	1.0298
0.20	0.3378	1.0035	0.7887	1.0232	0.4694	1.0328
0.25	0.4228	1.0031	0.9332	1.0242	0.4954	1.0358
0.30	0.4811	1.0027	1.0777	1.0252	0.5216	1.0388
0.35	0.5214	1.0023	1.2222	1.0262	0.5480	1.0418
0.40	0.5552	1.0019	1.3667	1.0272	0.5746	1.0448
0.45	0.6233	1.0015	1.5112	1.0282	0.6014	1.0478
0.50	0.6751	1.0011	1.6557	1.0292	0.6284	1.0508
0.55	0.7204	1.0007	1.8002	1.0302	0.6556	1.0538
0.60	0.7612	1.0003	1.9447	1.0312	0.6830	1.0568
0.65	0.8274	1.0000	2.0892	1.0322	0.7106	1.0598
0.70	0.8683	1.0000	2.2337	1.0332	0.7384	1.0628
0.75	1.0059	1.0000	2.3782	1.0342	0.7664	1.0658
0.80	1.1325	1.0000	2.5227	1.0352	0.7946	1.0688
0.85	1.2546	1.0000	2.6672	1.0362	0.8230	1.0718
0.90	1.3738	1.0000	2.8117	1.0372	0.8516	1.0748
0.95	1.4896	1.0000	2.9562	1.0382	0.8804	1.0778
1.00	1.6028	1.0000	3.1007	1.0392	0.9094	1.0808
1.05	1.7140	1.0000	3.2452	1.0402	0.9386	1.0838
1.10	1.8232	1.0000	3.3897	1.0412	0.9680	1.0868
1.15	1.9304	1.0000	3.5342	1.0422	0.9976	1.0898
1.20	2.0356	1.0000	3.6787	1.0432	1.0274	1.0928
1.25	2.1388	1.0000	3.8232	1.0442	1.0574	1.0958
1.30	2.2400	1.0000	3.9677	1.0452	1.0876	1.0988
1.35	2.3392	1.0000	4.1122	1.0462	1.1180	1.1018
1.40	2.4364	1.0000	4.2567	1.0472	1.1486	1.1048
1.45	2.5316	1.0000	4.4012	1.0482	1.1794	1.1078
1.50	2.6248	1.0000	4.5457	1.0492	1.2104	1.1108
1.55	2.7160	1.0000	4.6902	1.0502	1.2416	1.1138
1.60	2.8052	1.0000	4.8347	1.0512	1.2730	1.1168
1.65	2.8924	1.0000	4.9792	1.0522	1.3046	1.1198
1.70	2.9776	1.0000	5.1237	1.0532	1.3364	1.1228
1.75	3.0608	1.0000	5.2682	1.0542	1.3684	1.1258
1.80	3.1420	1.0000	5.4127	1.0552	1.4006	1.1288
1.85	3.2212	1.0000	5.5572	1.0562	1.4330	1.1318
1.90	3.2984	1.0000	5.7017	1.0572	1.4656	1.1348
1.95	3.3736	1.0000	5.8462	1.0582	1.4984	1.1378
2.00	3.4468	1.0000	5.9907	1.0592	1.5314	1.1408

Fig. 9.4.1 Coefficients used in the one-term approximation to the series solutions for transient one-dimensional conduction. See Figure 9.4.

3.2. Cálculos realizados de Enfriamiento de tuberías en Primera bañera.

1. temperatura de agua 10⁰C

Coeficiente convectivo	Espesor	Conductividad térmica	Número de Biot	Tiempo enfriamiento	Disfusividad térmica	Número de Fourier
h (W/m2.K)	Lc (m)	Kpvc (W/m.k)	Bi	t (seg)	α (m ² /s)	Fo
135.15	0.001	0.19	0.711	36	1.09E-07	3.924
135.15	0.002	0.19	1.423	68	1.09E-07	1.853
135.15	0.003	0.19	2.134	96	1.09E-07	1.163
135.15	0.004	0.19	2.845	121	1.09E-07	0.824
135.15	0.005	0.19	3.557	144	1.09E-07	0.628
135.15	0.006	0.19	4.268	164	1.09E-07	0.497

Continuación.

Coeficiente de primer aproximación		Tempt inicial	Tempt de agua	Temperatura A dimensional		Tempt de diámetro medio	Tempt superficial
C1	ξ	Ti ($^{\circ}$ C)	Ta($^{\circ}$ C)	Θ_0	Θ	To	Ts ($^{\circ}$ C)
1.093	0.755	190	10	0.117	0.0850	31.01	25.30
1.1444	0.9513	190	10	0.214	0.1242	48.51	32.36
1.1835	1.092	190	10	0.296	0.1363	63.25	34.53
1.2056	1.1752	190	10	0.386	0.1488	79.51	36.79
1.2206	1.2329	190	10	0.470	0.1558	94.60	38.05
1.2318	1.2779	190	10	0.547	0.1581	108.55	38.45

2. Temperatura de agua 15 $^{\circ}$ C.

h (W/m 2 .K)	Lc (m)	Kpvc (W/m.k)	Biot	t (seg)	α (m 2 /s)	Fo	C1	ξ	Ti ($^{\circ}$ C)	Ta ($^{\circ}$ C)	Θ_0	Θ	To ($^{\circ}$ C)	Ts ($^{\circ}$ C)
135.95	0.001	0.19	0.716	36	1.09E-07	3.924	1.094	0.757	190	15	1.15E-01	8.38E-02	35.18	29.7
135.95	0.002	0.19	1.431	68	1.09E-07	1.853	1.145	0.954	190	15	2.12E-01	1.23E-01	52.15	36.5
135.95	0.003	0.19	2.147	96	1.09E-07	1.163	1.184	1.094	190	15	2.95E-01	1.35E-01	66.54	38.7
135.95	0.004	0.19	2.862	121	1.09E-07	0.824	1.206	1.177	190	15	3.85E-01	1.48E-01	82.43	40.9
135.95	0.005	0.19	3.578	144	1.09E-07	0.628	1.221	1.234	190	15	4.69E-01	1.55E-01	97.11	42.1
135.95	0.006	0.19	4.293	164	1.09E-07	0.497	1.232	1.279	190	15	5.47E-01	1.57E-01	110.70	42.5

3. Temperatura del agua 20°C

Bi	Fo	C1	ξ	Ti (°C)	Ta(°C)	Θ_o	Θ	To(°C)	Ts (°C)
0.7	3.9	1.0937	0.7583	190	20	1.15E-01	8.32E-02	39.47	34.14
1.4	1.9	1.1455	0.955	190	20	2.11E-01	1.22E-01	55.93	40.76
2.2	1.2	1.1843	1.095	190	20	2.94E-01	1.35E-01	69.94	42.88
2.9	0.8	1.2064	1.1781	190	20	3.84E-01	1.47E-01	85.32	45.00
3.6	0.6	1.2212	1.2353	190	20	4.68E-01	1.54E-01	99.64	46.22
4.3	0.5	1.2323	1.2800	190	20	5.46E-01	1.57E-01	112.87	46.63

4. Temperatura del agua de 25°C

Bi	Fo	C1	ξ	Ti (°C)	Ta(°C)	Θ_o	Θ	To(°C)	Ts (°C)
0.72	3.92	1.0939	0.7591	190	25	1.14E-01	8.27E-02	43.81	38.65
1.44	1.85	1.1457	0.9558	190	25	2.11E-01	1.22E-01	59.78	45.07
2.16	1.16	1.1845	1.0956	190	25	2.93E-01	1.34E-01	73.41	47.15
2.88	0.82	1.2066	1.179	190	25	3.84E-01	1.46E-01	88.30	49.17
3.60	0.63	1.2214	1.236	190	25	4.68E-01	1.54E-01	102.23	50.38
4.32	0.50	1.2324	1.2805	190	25	5.46E-01	1.56E-01	115.08	50.78

5. Temperatura del agua de 30°C

Bi	Fo	C₁	ξ	Ti (°C)	Ta (°C)	Θ_o	Θ	To (°C)	Ts (°C)
0.72	3.92	1.09	0.76	190	30	0.11	0.08	48.16	43.16
1.45	1.85	1.15	0.96	190	30	0.21	0.12	63.59	49.34
2.17	1.16	1.18	1.10	190	30	0.29	0.13	76.83	51.38
2.89	0.82	1.21	1.18	190	30	0.38	0.15	91.27	53.33
3.62	0.63	1.22	1.24	190	30	0.47	0.15	104.80	54.51
4.34	0.50	1.23	1.28	190	30	0.55	0.16	117.38	54.94

3.3. Cálculos de coeficiente convectivo de aire utilizando la correlación de Churchill y Bernstein.

1. Tagua = 10°C

Ts de 1 bañera	Temp Aire	Velocidad de aire	Temp promedio	espacio	Diámetro PVC
T1 (° C)	T2 (° C)	m/s	Tf	l(m)	(m)
32.36	30	5	304.18	0.35	0.1143
34.53	30	5	305.27	0.35	0.1143
36.79	30	5	306.39	0.35	0.1143
38.05	30	5	307.02	0.35	0.1143
38.45	30	5	307.23	0.35	0.1143

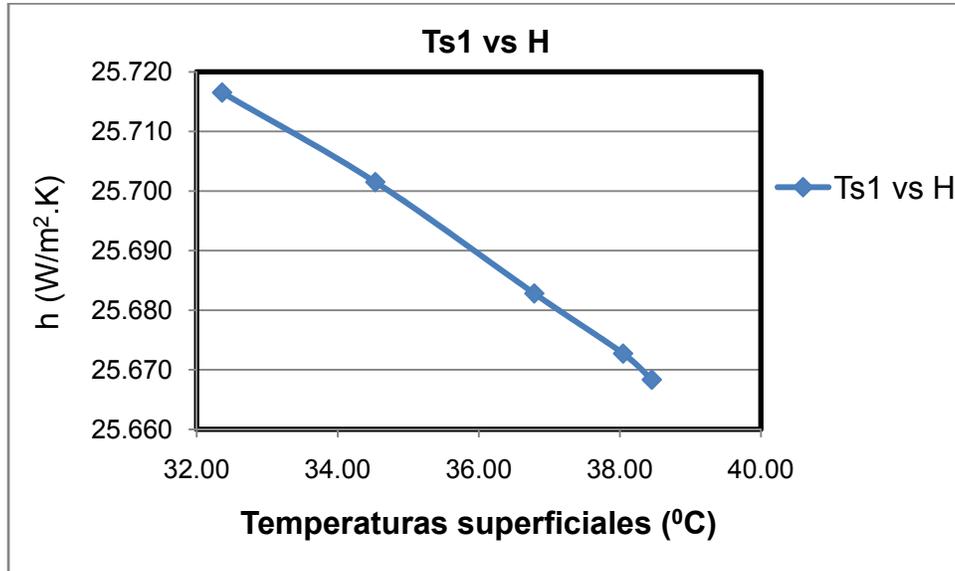
Continuación

Propiedades de Aire a Temperatura promedio.			
Conductividad Térmica Aire	Densidad Aire	Viscosidad Dinámica	Numero Prandtl
K (W/m.K)	ρ (kg/m ³)	μ (N.s/m ²)	Pr
2.66E-02	1.1475	1.87E-05	0.7064
2.67E-02	1.1439	1.87E-05	0.7063
2.68E-02	1.1401	1.88E-05	0.7061
2.68E-02	1.138	1.88E-05	0.706
2.68E-02	1.1373	1.88E-05	0.7059

Continuación.

CÁLCULOS			
Numero Reynolds	Numero Nusselt	Coefficiente convectivo	Calor transferido
Re	Nus	h (W/m ² .K)	q (W)
35149.58	110.466	25.717	7.624
34942.97	110.067	25.702	14.634
34728.74	109.646	25.683	21.894
34609.93	109.413	25.673	25.947
34570.32	109.331	25.668	27.257

3.3.1. Comportamiento de coeficiente convectivo del aire contra temperaturas superficiales de las tuberías



3.4. Así mismo se buscan valores de coeficiente convectivo del aire para y se obtienen los siguientes resultados. Tagua 15 y 20°C

Espesores	Tagua =15°C	Tagua =20°C
d (m)	h (W/m².K)	h (W/m².K)
0.002	25.709	25.703
0.003	25.668	25.651
0.004	25.650	25.636
0.005	25.640	25.618
0.006	25.635	25.609

3.5 Tablas de propiedades del aire.

Appendix A • Thermophysical Properties of Matter

TABLE A.4 Thermophysical Properties of Gases at Atmospheric Pressure*

T (K)	ρ (kg/m ³)	ρ_c (kg/m ³)	ν (m ² /s)	ν (cm ² /s)	λ (W/m·K)	μ (Pa·s)	μ (poise)	β
Air								
100	1.2922	1.2932	21.1	2.11	24.8	1.84	0.186	
150	1.2464	1.2474	23.3	2.33	25.8	1.94	0.174	
200	1.2006	1.2016	25.6	2.56	26.8	2.03	0.162	
250	1.1548	1.1558	28.0	2.80	27.8	2.12	0.150	
300	1.1090	1.1100	30.4	3.04	28.8	2.21	0.138	
350	1.0632	1.0642	32.8	3.28	29.8	2.30	0.126	
400	1.0174	1.0184	35.2	3.52	30.8	2.39	0.114	
450	0.9716	0.9726	37.6	3.76	31.8	2.48	0.102	
500	0.9258	0.9268	40.0	4.00	32.8	2.57	0.090	
550	0.8800	0.8810	42.4	4.24	33.8	2.66	0.078	
600	0.8342	0.8352	44.8	4.48	34.8	2.75	0.066	
650	0.7884	0.7894	47.2	4.72	35.8	2.84	0.054	
700	0.7426	0.7436	49.6	4.96	36.8	2.93	0.042	
750	0.6968	0.6978	52.0	5.20	37.8	3.02	0.030	
800	0.6510	0.6520	54.4	5.44	38.8	3.11	0.018	
850	0.6052	0.6062	56.8	5.68	39.8	3.20	0.006	
900	0.5594	0.5604	59.2	5.92	40.8	3.29	0.000	
950	0.5136	0.5146	61.6	6.16	41.8	3.38	0.000	
1000	0.4678	0.4688	64.0	6.40	42.8	3.47	0.000	
1050	0.4220	0.4230	66.4	6.64	43.8	3.56	0.000	
1100	0.3762	0.3772	68.8	6.88	44.8	3.65	0.000	
1150	0.3304	0.3314	71.2	7.12	45.8	3.74	0.000	
1200	0.2846	0.2856	73.6	7.36	46.8	3.83	0.000	
1250	0.2388	0.2398	76.0	7.60	47.8	3.92	0.000	
1300	0.1930	0.1940	78.4	7.84	48.8	4.01	0.000	
1350	0.1472	0.1482	80.8	8.08	49.8	4.10	0.000	
1400	0.1014	0.1024	83.2	8.32	50.8	4.19	0.000	
1450	0.0556	0.0566	85.6	8.56	51.8	4.28	0.000	
1500	0.0098	0.0108	88.0	8.80	52.8	4.37	0.000	
1550	0.0000	0.0010	90.4	9.04	53.8	4.46	0.000	
1600	0.0000	0.0020	92.8	9.28	54.8	4.55	0.000	
1650	0.0000	0.0030	95.2	9.52	55.8	4.64	0.000	
1700	0.0000	0.0040	97.6	9.76	56.8	4.73	0.000	
1750	0.0000	0.0050	100.0	10.00	57.8	4.82	0.000	
1800	0.0000	0.0060	102.4	10.24	58.8	4.91	0.000	
1850	0.0000	0.0070	104.8	10.48	59.8	5.00	0.000	
1900	0.0000	0.0080	107.2	10.72	60.8	5.09	0.000	
1950	0.0000	0.0090	109.6	10.96	61.8	5.18	0.000	
2000	0.0000	0.0100	112.0	11.20	62.8	5.27	0.000	
2050	0.0000	0.0110	114.4	11.44	63.8	5.36	0.000	
2100	0.0000	0.0120	116.8	11.68	64.8	5.45	0.000	
2150	0.0000	0.0130	119.2	11.92	65.8	5.54	0.000	
2200	0.0000	0.0140	121.6	12.16	66.8	5.63	0.000	
2250	0.0000	0.0150	124.0	12.40	67.8	5.72	0.000	
2300	0.0000	0.0160	126.4	12.64	68.8	5.81	0.000	
2350	0.0000	0.0170	128.8	12.88	69.8	5.90	0.000	
2400	0.0000	0.0180	131.2	13.12	70.8	5.99	0.000	
2450	0.0000	0.0190	133.6	13.36	71.8	6.08	0.000	
2500	0.0000	0.0200	136.0	13.60	72.8	6.17	0.000	
2550	0.0000	0.0210	138.4	13.84	73.8	6.26	0.000	
2600	0.0000	0.0220	140.8	14.08	74.8	6.35	0.000	
2650	0.0000	0.0230	143.2	14.32	75.8	6.44	0.000	
2700	0.0000	0.0240	145.6	14.56	76.8	6.53	0.000	
2750	0.0000	0.0250	148.0	14.80	77.8	6.62	0.000	
2800	0.0000	0.0260	150.4	15.04	78.8	6.71	0.000	
2850	0.0000	0.0270	152.8	15.28	79.8	6.80	0.000	
2900	0.0000	0.0280	155.2	15.52	80.8	6.89	0.000	
2950	0.0000	0.0290	157.6	15.76	81.8	6.98	0.000	
3000	0.0000	0.0300	160.0	16.00	82.8	7.07	0.000	
Ammonia (NH ₃)								
300	0.6304	2.158	101.2	10.12	24.7	16.6	0.007	
320	0.6448	2.174	106	10.6	25.2	16.8	0.007	
340	0.6592	2.190	111.2	11.12	25.7	17.1	0.007	
360	0.6736	2.206	116.4	11.64	26.2	17.4	0.007	
380	0.6880	2.222	121.6	12.16	26.7	17.7	0.007	

3.6 Enfriamiento por aire a una temperatura de 30°C después de salir de la primera bañera de enfriamiento.

1. Tagua = 10°C

h (W/m ² .K)	Lc (m)	Kpvc (W/m.k)	Bi	t (seg)	α (m ² /s)	Fo	C1	ξ	Ti (°C)	Ta (°C)
25.717	0.002	0.19	0.271	5.91	1.09E-07	0.161	1.0411	0.4976	32.36	30
25.702	0.003	0.19	0.406	8.39	1.09E-07	0.102	1.05873	0.6293	34.53	30
25.683	0.004	0.19	0.541	10.60	1.09E-07	0.072	1.0746	0.6745	36.79	30
25.673	0.005	0.19	0.676	12.58	1.09E-07	0.055	1.0893	0.7397	38.05	30
25.668	0.006	0.19	0.811	14.36	1.09E-07	0.043	1.1028	0.7946	38.45	30

Continuación.

Θ_0	Θ	T_0 ($^{\circ}\text{C}$)	T_s ($^{\circ}\text{C}$)
1.000	0.88	32.36	32.1
1.017	0.82	34.61	33.7
1.040	0.81	37.06	35.5
1.057	0.78	38.51	36.3
1.073	0.75	39.07	36.4

2. Tagua = 15°C

h ($\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$)	L_c (m)	K_{pvc} ($\text{W}/\text{m}\cdot\text{k}$)	Bi	t (seg)	α (m^2/s)	Fo	C_1	ξ
25.709	0.002	0.19	0.271	5.91	1.09E-07	0.161	1.04092	0.4968
25.668	0.003	0.19	0.405	8.39	1.09E-07	0.102	1.0585	0.5956
25.65	0.004	0.19	0.540	10.60	1.09E-07	0.072	1.0745	0.6735
25.64	0.005	0.19	0.675	12.58	1.09E-07	0.055	1.0891	0.7383
25.635	0.006	0.19	0.810	14.36	1.09E-07	0.043	1.10233	0.7939

Continuación.

Ti (°C)	Ta(°C)	Θ_0	Θ	To (°C)	Ts (°C)
36.5	30	1.000	0.88	36.50	35.7
38.66	30	1.021	0.85	38.84	37.3
40.9	30	1.040	0.81	41.33	38.9
42.12	30	1.057	0.78	42.81	39.5
42.53	30	1.073	0.75	43.44	39.4

3. Tagua =20°C

h (W/m ² .K)	Lc (m)	Kpvc (W/m.k)	Bi	t (seg)	α (m ² /s)	Fo	C1	ξ
25.703	0.001	0.19	0.135	3.13	1.09E-07	0.341	1.0214	0.3579
25.651	0.002	0.19	0.270	5.91	1.09E-07	0.161	1.04092	0.49678
25.636	0.003	0.19	0.405	8.39	1.09E-07	0.102	1.05905	0.5962
25.618	0.004	0.19	0.539	10.60	1.09E-07	0.072	1.0745	0.6735
25.609	0.005	0.19	0.674	12.58	1.09E-07	0.055	1.0892	0.7388
25.605	0.006	0.19	0.809	14.36	1.09E-07	0.043	1.10242	0.7943

Continuación

Ti (°C)	Ta(°C)	Θ_0	Θ	To (°C)	Ts (°C)
34.14	30	0.978	0.916	34.0	33.8
40.76	30	1.000	0.879	40.8	39.5
42.88	30	1.021	0.845	43.2	40.9
45.00	30	1.040	0.813	45.6	42.2
46.22	30	1.057	0.781	47.1	42.7
46.63	30	1.073	0.752	47.8	42.5

3.7. Los resultados de temperaturas del Enfriamiento en la segunda bañera.

Enfriamiento en la segunda bañera							
Espesores (m)	Tiempo enfriamiento (Segundos)	Temperatura Agua = 10 ⁰ C		Temperatura Agua = 15 ⁰ C		Temperatura Agua = 20 ⁰ C	
		To	Ts	To	Ts	To	Ts
0.001	3.13	1B	1B	1B	1B	1B	1B
0.002	5.91	15.7	13.6	20.3	18.3	25.1	23.2
0.003	8.39	18.3	14.3	22.8	19.1	27.4	23.8
0.004	10.60	20.9	14.8	25.2	19.5	29.6	24.2
0.005	12.58	23.2	15.0	27.3	19.7	31.5	24.3
0.006	14.36	25.2	15.1	29.1	19.8	33.1	24.4

Nota: 1B, quiere decir que las tuberías de menor espesor de 1mm salió enfriado por la primera bañera de enfriamiento.

3.8. Comportamiento de las temperaturas de la tubería contra espesores de la segunda bañera.

