

**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE
MÉXICO**



FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
CUAUTITLÁN

**ANÁLISIS Y PROPUESTA DE
AISLAMIENTO TÉRMICO EN EL
ALOJAMIENTO DE MOTORES DIÉSEL
UBICADO EN PARTE TRASERA EN
AUTOBUSES FORÁNEOS.**

TESIS

Que para obtener el título de
INGENIERO MECÁNICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A

MIGUEL HUERTA RUIZ

ASESOR DE TESIS

ING. MARCOS BELISARIO
GONZÁLEZ LORIA



**UNAM
CUAUTITLÁN**

CUAUTITLÁN IZCALLI, EDO. DE MÉXICO 2022



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

CONTENIDO

RESUMEN	I
INTRODUCCIÓN	II
PROBLEMÁTICA	V
JUSTIFICACIÓN	VI
OBJETIVO	VII
HIPOTESIS	VIII
METODOLOGÍA	IX
CAPITULO I	1
1.1. ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR	2
1.1. Definición de calor	2
1.1.1. Medición del calor.....	3
1.2. Definición de Temperatura	4
1.2.1. Medición de la temperatura.....	5
1.2.2. Escalas de temperatura.....	7
1.3. La transferencia de energía calorífica en la ingeniería	10
1.4. Mecanismos de transferencia de calor	12
1.4.1. Conducción.....	15
1.4.2. Ley de Fourier.....	17
1.4.3. Conductividad térmica.....	18
1.4.4. Difusividad térmica.....	31
1.4.5. Convección.....	32
1.4.6. Radiación.....	36

2. ANÁLISIS TÉRMICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN AISLANTES TÉRMICOS.	43
2.1. Definición de aislamiento térmico.	44
2.2. Clasificación de los materiales aislantes.	45
2.2.1. Aislantes térmicos de origen mineral.	47
2.2.2. Aislantes térmicos granulares.	51
2.2.3. Aislantes térmicos celulares.	61
2.2.4. Aislantes térmicos de origen orgánico.	69
2.3. Conductividad térmica en los materiales aislantes.	81
2.1. Resistencia térmica.	82
2.2. Factor R.	86
3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS DE COMBUSTIÓN INTERNA.	88
3.1.1. El motor a vapor.	89
3.1.2. Motores de aire caliente.	96
3.1.3. La evolución del motor de combustión interna.	99
3.2. Poder calorífico.	111
3.3. Aceites combustibles Diésel.	113
3.3.1. Número Cetáno (NC).	115
3.4. Combustión en los motores Diésel.	117
4. EL AUTOBÚS COMO MEDIO DE TRANSPORTE.	121
4.1. Componentes principales de un autobús.	129
4.1.1. Chasis.	129
4.1.2. Carrocería.	137
4.1.3. Estructuras.	137
4.1.4. Acabados interiores y exteriores.	142

4.2. El Diseño Asistido por Computadora como herramienta para el diseño y simulación de autobuses.	145
4.2.1. Herramientas Informáticas de diseño CAD.....	148
4.2.2. Herramientas informáticas de diseño CAM.....	149
4.2.3. Herramientas Informáticas de diseño CAE.	150
4.3. Beneficios del diseño asistido por computadora.....	152
4.4. Distribución de habitáculo del motor trasero.	154
CAPITULO II.....	160
5. CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL HABITÁCULO MOTOR AL SALÓN DE PASAJEROS A TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE 90° POR CONVECCIÓN Y CONDUCCIÓN.....	161
5.1. Planteamiento del problema.....	162
5.1.1. Objetivo del análisis.....	162
5.1.2. Esquemas.....	162
5.1.3. Suposiciones.	163
5.1.4. Propiedades.....	164
5.1.5. Análisis.....	169
5.1.6. Comentarios del análisis.	176
CAPITULO III.....	178
6. PROPUESTA Y RECOMENDACIONES PARA AISLAR TÉRMICAMENTE EL ALOJAMIENTO DE MOTORES DIÉSEL EN AUTOBUSES URBANOS Y FORÁNEOS.	179
6.1. Diseño de la banca trasera.....	179
6.2. Selección de aislamiento.	181
6.3. Equilibrio térmico.....	183
CAPITULO IV.....	191

BIBLIOGRAFÍA.	194
GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS	197
ANEXO	200

RESUMEN

El presente trabajo de investigación busca responder a una problemática real en el sector del transporte de autobuses a través del análisis de las tecnologías de aislamiento asequibles y disponibles en el mercado. Mediante este escrito, se da una reseña histórica de este medio de transporte usado con regularidad alrededor del mundo y que promete una evolución radical para adaptarse a las necesidades de las urbes modernas.

A medida que las necesidades cambian, las tecnologías deberán amoldarse a los gustos y necesidades de los usuarios, el ahorro de energías calóricas es un tema muy redituable para la industria en general.

INTRODUCCIÓN

En la vida cotidiana, los seres humanos aplicamos un conocimiento intuitivo de los procesos de transferencia de calor, ya sea en la preparación de alimentos, donde generalmente se pone atención a la velocidad y tiempo de cocción o bien, en un día soleado donde se pretende reducir una ganancia de calor en nuestros cuerpos con el simple hecho de buscar un lugar sombreado o aligerar la ropa que se lleva puesta o bien, en caso contrario, al reducir la pérdida de calor en un día invernal con el uso de atuendos que nos mantengan calientes. Estos simples ejemplos son el reflejo de un conocimiento empírico generalizado de la humanidad, basado en la percepción de nuestro sentido del tacto, experiencia de cada ser humano y los diversos ambientes o climas alrededor del planeta.

A lo largo del tiempo, tras el desarrollo de nuevas tecnologías, nuevos procesos y combustibles, este conocimiento “empírico” se ha transformado en un estudio detallado del comportamiento de la energía calorífica y los medios por los que esta se conduce dentro de un sistema, un ambiente o un proceso. Esto nos ha llevado al estudio del calor mediante dos ramas de la ciencia, la *termodinámica* donde el enfoque principal es el análisis de la cantidad de energía calórica transmitida en un sistema para realizar un cambio de estado específico con el fin de satisfacer la ley de conservación de la energía¹ y la *transferencia de calor*, en

¹ La cantidad total de energía en cualquier sistema físico aislado (sin interacción con ningún otro sistema) permanece invariable con el tiempo, aunque dicha energía puede transformarse en otra forma de energía. En otras palabras, la ley de la conservación de la energía afirma que la energía no se crea ni destruye solo se transforma.

la cual, el punto focal es el tiempo transcurrido y la razón en que se da este intercambio térmico entre los sistemas.

Para llevar a cabo un análisis de transferencia de calor, es imprescindible que se dé una diferencia térmica entre las partes que son objeto de estudio dado que la transferencia de energía calórica siempre es dada del objeto con mayor temperatura hacia su contraparte con una temperatura inferior. Es virtualmente imposible que se dé un intercambio de calor entre dos cuerpos que se encuentren a una misma temperatura. Se puede plantear que esta diferencia de temperatura entre dos cuerpos tiene una correlación con la velocidad de transferencia de energía calórica que se da en una dirección o bien como lo plantean Çengel & Ghajar, (2011) *“A mayor gradiente de temperatura, mayor es la razón de transferencia de calor”* (p. 3).

La razón de la transferencia de calor tiene un elevado interés práctico en las áreas de diseño debido a que de él se desprende factores como la implementación de mecanismos para el ahorro de energía o el aislamiento de sistemas calóricos para evitar pérdidas de energía, en ambos casos, la connotación económica tiene un alto impacto en la industria, por otro lado, también da un amplio panorama en etapas tempranas de diseño para concebir un ambiente térmico adecuado para un usuario en sistemas que interactúan directamente con una persona.

Tomando como base los anteriores párrafos, el objetivo de esta tesis es dar una explicación general y sencilla de los conceptos básicos de la transferencia de calor, así como la aplicación de estos conceptos teóricos en un análisis de

transferencia de calor en un entorno real de un motor diésel. También es objeto de estudio la relación que se da entre espesor y resistividad térmica de los materiales que funcionan como aislamiento térmico con el fin de tener una guía que facilite la selección y aplicación de un material de aislamiento.

El interés por desarrollar este trabajo surge de la necesidad profesional de conocer más a fondo los procesos de transferencia de calor, así como el comportamiento de los materiales aislantes y sus aplicaciones entorno a un motor Diésel en un escenario real, dando paso a una propuesta que sea más factible en cuanto a costos de manufactura y materiales para el armado de un escudo de calor en los motores Diesel.

PROBLEMÁTICA.

Día a día alrededor del mundo se mueven millones personas, mercancías y bienes de consumo de un punto a otro alrededor del mundo. El sector de transporte ha cobrado una magnitud tal que la economía global depende de los diversos medios de transporte existentes para dar continuidad a la sinergia de un mundo globalizado a través de la quema de combustibles fósiles, mismo que al ser transformados en energía mecánica liberan calor.

No obstante, no solo se trata de mover mercancías y personas, el sector de transporte está obligado a ofrecer soluciones que den un valor agregado al usuario final, soluciones que van desde transportar productos perecederos de un país a otro con el menor consumo energético posible, hasta proveer de transporte de pasajeros confiable, limpio y ergonómico. Dentro del rubro de transporte terrestre de pasajeros, el sector debe innovar en soluciones ingenieriles que satisfagan las demandas de un entorno tranquilo, cómodo y seguro para el transporte de personas. Tales innovaciones alcanzan el estudio de nuevos materiales que ayuden a la insonorización del ruido externo y el ruido del motor, así como en la optimización del consumo de combustibles a través de soluciones de aislamientos térmicos que provean de un apropiado aislamiento térmico en las áreas de pasajeros en ambientes calurosos. El aislamiento térmico en general busca proveer un entorno cómodo al cliente final.

JUSTIFICACIÓN.

El presente escrito ha sido realizado con el propósito de llevar a la práctica las teorías aprendidas en las aulas, principalmente conceptos pertenecientes a disciplinas como termodinámica y transferencia de calor. A pesar de la modernidad y el desarrollo de softwares de ingeniería, es importante poder comprender los conceptos básicos de materias afines a la ingeniería, pues amplían el criterio profesional y dan un enfoque más objetivo en las áreas de diseño.

El sector automotriz es una industria puntera a nivel mundial en implementación de materiales y procesos productivos, por consiguiente, el departamento de desarrollo del producto se enfrenta a la conceptualización soluciones acordes con las necesidades del mercado actual. La industria ensambladora de autobuses, al pertenecer al ramo automotriz, se ve impactada directamente por las nuevas innovaciones en el sector. Y al mismo tiempo se enfrenta a una fuerte competencias por ofrecer el mejor producto a los consumidores finales.

La motivación principal para realizar esta investigación parte de mi experiencia profesional en la empresa Volvo Group Company, concretamente en el área de Ingeniería del Producto. Dentro del trabajo cotidiano surge la necesidad de incrementar la eficiencia del material de aislamiento termoacústico. Las soluciones analizadas y aplicadas deben favorecer tiempos de instalación adecuadas, así como precios competitivos y sobre todo ofrecer el confort adecuado al pasajero durante su viaje a bordo de una unidad Volvo.

OBJETIVO.

EL objetivo principal de este trabajo de tesis es hacer un análisis teórico del funcionamiento de un aislamiento térmico aplicado a un entorno real. En este caso, se analizará el comportamiento de un aislamiento térmico típico usado en un autobús de pasajeros Volvo 9800 el cual se ve sometido a picos de temperatura de hasta 90°C, así como el arreglo que presenta un habitáculo de motor y los puntos que se pueden mejorar para que este no presente un sobrecalentamiento que afecte el confort de la cabina pasajeros.

Se pretende dar una visión histórica sobre el desarrollo e impacto que los motores de combustión interna han tenido sobre el desarrollo económico de todas las sociedades modernas, así mismo, se explora el desarrollo del autobús como medio de transporte masivo que hoy en día sigue siendo el medio de transporte más en áreas urbanas e interurbanas.

Adicionalmente, derivado del análisis de transferencia de calor, se pretende dar una propuesta de mejora para que el diseño del aislamiento térmico en autobuses foráneos sea más eficaz.

HIPOTESIS

En el caso del motor un incremento en los espesores del material, aunado un factor K bajo, deberán impedir el paso de calor a las estructuras circundantes al motor, así como a los recubrimientos aledaños a este. De la mano de estos factores, una ventilación apropiada de los habitáculos será un factor de gran ayuda para evitar el equilibrio térmico entre materiales.

METODOLOGÍA

La metodología llevada a cabo en este documento se apega estrictamente al método de escritorio. Esta metodología será desarrollada en la siguiente secuencia:

1. Definición del tema de investigación.

- Técnica: Perspectiva y análisis de las necesidades que hay en la industria del transporte por el aislamiento térmico de motores de combustión interna de ciclo diésel.
- Herramienta: Observación científica, Investigación bibliográfica.

2. Recabar información.

- Técnica: Investigación documental.
- Herramienta: Libros, manuales, publicaciones y artículos en internet.

3. Desarrollo del marco conceptual.

- Técnica: clasificación de información recabada y análisis.
- Herramienta: Procesador de texto (MS Word).

4. Elaboración de documento de tesis.

- Técnica: Redacción del documento a partir de la información recabada.
- Herramienta: Procesador de texto (MS Word).

CAPITULO I
MARCO TEÓRICO

1.1.ALGUNOS CONCEPTOS BÁSICOS DE LA TRANSFERENCIA DE CALOR.

A lo largo del tiempo el ser humano siempre ha entendido que el calor se transfiere de un objeto caliente hacia uno más frío, o de una fuente de energía calórica hacia los objetos circundantes a esta. En el siglo XV los científicos enfocados en fenómenos termodinámicos o de la transferencia de calor hacían referencia a que el calor era un fluido invisible contenido en todos los cuerpos y sistemas del universo. Al calórico se le asignaron propiedades consistentes con la naturaleza, es decir, se creía que este fluido invisible tenía masa y no podía ser creado o destruido. Actualmente sabemos en esencia es que el calor es energía cinética, para tener un entendimiento más claro de cómo es el tránsito de la energía calórica entre cuerpos o sistemas, es preciso entender los conceptos básicos y de uso obligatorio en la ciencia de transferencia de calor.

1.1.Definición de calor.

El calor, es una forma de energía transferible de un cuerpo o sistema a otro, siempre y cuando haya una diferencia de temperatura entre ellos. Este tránsito de energía en un rango microscópico es una forma de movimiento o energía cinética, la cual se propaga mediante la vibración de una partícula con mayor energía cinética a otra partícula con un rango menor de energía o vibración. Estas vibraciones moleculares microscópicas, tienen un efecto directo sobre las fuerzas que “ligan o unen” a las moléculas, ya que, al aplicársele mayor o menor energía a un elemento, este podrá sufrir un cambio de fase, es decir, podrá pasar de un

estado sólido a líquido y posteriormente, si el nivel de energía es el óptimo, pasará a un estado gaseoso, siendo este último nivel el que contiene mayor energía interna en comparación con los estados sólido y líquido.

1.1.1. Medición del calor.

Dado que el calor es una forma de energía, la cuantificación de este debe ser dada en unidades que denoten el contenido energético de un objeto, como unidades de medición se tiene al Joule (J) en el sistema internacional; la Caloría en el sistema Técnico, la relación dada entre estas dos unidades de medición es la siguiente:

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J} \leftrightarrow 1 \text{ J} = 0.2388 \text{ cal} \quad \text{Equivalencia 1.1}$$

La igualdad anterior también puede ser interpretada como la equivalencia de la energía calórica en energía mecánica².

El calor también puede ser medido mediante el uso de unidades basadas en fenómenos térmicos, tal como, la unidad térmica británica (*BTU British thermal unit*) esta unidad de medición se define como la energía que se necesita para elevar en 1° F la temperatura de 1 lb de agua. Otra unidad más común para la medición del calor es la caloría, esta medida se define como la energía requerida para elevar en 1° C la temperatura de un gramo de agua.

² Bien se puede referir esta igualdad a la ley de conservación de la energía que de acuerdo con Yunus Çengel y Ghajar (2011) postula que, “en el curso de un proceso, la energía no se puede crear ni destruir; sólo puede cambiar las formas”.

$$1 \text{ BTU} = 252 \text{ cal} \quad \text{Equivalencias 1.2}$$

Otra unidad con la que se cuantifica el calor en base a unidades de energía/tiempo son los Wattios ($1 \text{ W} = 1 \text{ J/s}$) en el sistema internacional la unidad de medidas y para el sistema americano es empleado la Kilo-caloría/hora [kcal/hr]. La relación dada entre ambas unidades se denota de la siguiente manera:

$$1 \text{ kcal/h} = \frac{4180 \text{ J}}{3600 \text{ s}} = 1.16 \text{ W} \quad \text{Equivalencias 1.1}$$

1.2. Definición de Temperatura.

La temperatura es una magnitud física que denota la cantidad de calor o ausencia de este (frío) en un objeto, sistema o en el ambiente. Esta magnitud escalar está interrelacionada con la energía interna en un sistema termodinámico, definida por el principio de la ley cero de la termodinámica³. Termodinámicamente la energía interna en un sistema conocida como energía cinética está asociada al movimiento de las partículas del sistema, ya sea en sentido rotacional, traslacional o de vibraciones. A medida que la energía cinética del sistema o movimiento de las partículas de este aumenta, se aumenta de igual manera la temperatura del sistema.

³ La ley cero de la termodinámica establece que, si dos cuerpos se encuentran en equilibrio térmico con un tercero, están en equilibrio térmico entre sí. Dicha ley postulada en un principio por R.H. Fowler en 1931, como su nombre lo indica, su valor como principio físico fundamental, se reconoció más de medio siglo después de la formulación de la primer y segunda ley de la termodinámica, llamada "cero" porque debía de preceder a estas.

En los materiales, diversas propiedades físicas se ven influidas por el aumento o disminución de la temperatura, por ejemplo, su estado (sólido, líquido, gaseoso, plasma), volumen, solubilidad, presión de vapor, color o la conductividad térmica. Así mismo, es uno de los factores influyentes en la velocidad que tiene algunas reacciones químicas.

1.2.1. Medición de la temperatura.

En las ciencias de transferencia de calor, la medición de la temperatura es una parte fundamental, de esta manera es posible cuantificar la cantidad de energía calórica de un cuerpo o sistema, en otras palabras, se cuantifica la cantidad de energía cinética contenida en el sistema. Esto nos permite la formulación de hipótesis respecto al comportamiento del sistema y a su vez la comprobación dicha hipótesis incluso, se puede hacer una predicción del comportamiento de un sistema.

Históricamente la medición de la temperatura ha sido posible gracias al desarrollo de instrumentos de medición, el más común es el termómetro, que independientemente de la escala en que este se encuentre graduado en esencia su principio de funcionamiento es el mismo.

El termómetro consta de un tubo capilar al vacío cerrado en el extremo superior y con un depósito de mercurio⁴ en el extremo opuesto, debido a que el mercurio

⁴ Elemento químico de transición que en su estado natural se encuentra en fase líquida, dado que el mercurio es un metal con una buena conductividad calórica (8.34 W/ (m·K) es empleado como

al someterse a un aumento de calor se dilata más rápidamente que el vidrio, este tiende a subir por el tubo capilar. Debido a que a los -40°C el mercurio alcanza su punto de congelación, el termómetro se ve restringido en su rango de acción, por lo que ha sido necesario el desarrollo de métodos de medición más precisos como los siguientes:

Termopar: Es un dispositivo basado en la unión de dos metales que a causa de un cambio de temperatura producen una diferencia de potencial muy pequeña (en el orden de los milivoltios) entre uno de los extremos denominado “punto caliente” y el otro llamado punto frío. La diferencia de potencial dada entre estos dos extremos del termo par es tomada como medida indirecta de temperatura.

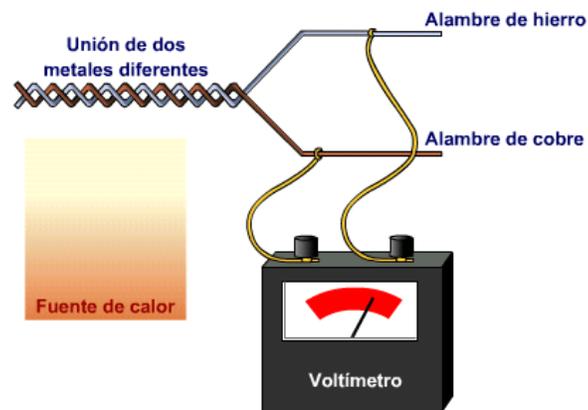


Figura 1.1.- Diagrama d funcionamiento de un termo par

Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Termopar>

referencia en un termómetro para la medición de temperatura de un objeto. Alcanza su punto de fusión a los -37.83°C (234.32°K) y su punto de ebullición alcanzado a los 357.73°C (629.88°K).

Termistor: Este dispositivo es un sensor de temperatura por resistencia. El funcionamiento está basado en la resistividad que presenta un semiconductor con una diferencia de temperatura. Así como en el termopar, el voltaje es una medida indirecta de la temperatura, en el Termistor esta resistividad se toma como la medida indirecta de la temperatura. Existen dos tipos de termistores:

- NTC (Negative Temperature Coefficient) – coeficiente de temperatura negativo.
- PTC (Positive Temperature Coefficient) – coeficiente de temperatura positivo (también llamado positor).

Cuando la temperatura, los tipos PTC aumentan su resistencia y los NTC la disminuyen.

Pirómetro: Mediante el pirómetro, es posible medir la temperatura de objetos sin necesidad de que haya algún contacto físico entre el dispositivo y el objeto a medir. Esto es posible gracias a que el pirómetro registra la cantidad de energía radiante, es decir, la radiación electromagnética emitida por un cuerpo caliente.

1.2.2. Escalas de temperatura.

Para medir la temperatura de un objeto, no basta con tener un instrumento de medición, es preciso que este instrumento este graduado en una escala cuantificable, dado que la temperatura es una unidad escalar que denota la cantidad de energía calórica contenida por un sistema (más específicamente con

la energía interna o bien “energía cinética” que se refiere al movimiento de las partículas de un sistema) esta debe ser medida con el fin de cuantificar la cantidad de calor y de esta manera (como en toda ciencia exacta) facilitar el estudio y predicción del comportamiento de los sistemas, en este caso, la cantidad de energía calórica ganada o cedida por un sistema, o bien, la cantidad de energía en tránsito en un proceso de transferencia de calor.

A lo largo de la historia han sido desarrolladas cuatro escalas principales con fin de poder cuantificar el calor en un sistema, dicho de otra manera, estas escalas dan “un valor numérico” a la percepción intuitiva de lo que es frío o caliente. La referencia primordial para las actuales escalas ha sido los puntos de fusión y ebullición del agua a una atmosfera de presión.

- Escala Celsius: Esta escala fue desarrollada por el astrónomo Anders Celsius, quien tomó de referencia el punto de congelación y ebullición del agua a los que se les asignó valores de 100° y 0° respectivamente a una atmosfera de presión. La escala se divide en 100 partes iguales o grados ($^{\circ}\text{C}$). Actualmente es la escala más usada alrededor del mundo y también se conoce como “escala centígrada”.
- Escala Kelvin: El físico británico William Thompson Kelvin en 1848 definió esta escala al tomar la escala Celsius y disminuir su punto inferior (0°C) ubicándolo en el “cero absolutos”⁵ (0°K). La escala conserva el mismo valor

⁵ El cero absoluto es aquella temperatura hipotética en la que hay una completa ausencia de calor en un cuerpo.

en cada intervalo. La escala Kelvin es común mente usada en el ámbito científico en disciplinas tales como física y química entre otras.

- Escala Fahrenheit: La escala Fahrenheit fue establecida en 1724 por el físico holandés–alemán Gabriel Daniel Fahrenheit, quien tomo como puntos fijos el punto de ebullición y congelación de una mezcla de cloruro de amoniaco con agua, a los que se les agrego el valor numérico de 100° F y 0° F respectivamente. Actualmente esta escala es usada principalmente en países anglosajones.
- Escala Rankine: La escala Rankine fue propuesta por el físico e ingeniero escoses William Rankin. Rankin propuso una medición con grados Fahrenheit sobre el cero absoluto, es decir, que los grados de las escalas Rankine y Fahrenheit tienen el mismo intervalo de grado idéntico, diferente solo en su límite inferior (0°).

La figura 1.2 hace una comparativa entre las escalas de temperatura. Cabe resaltar como cada escala define el 0 de diferente manera.

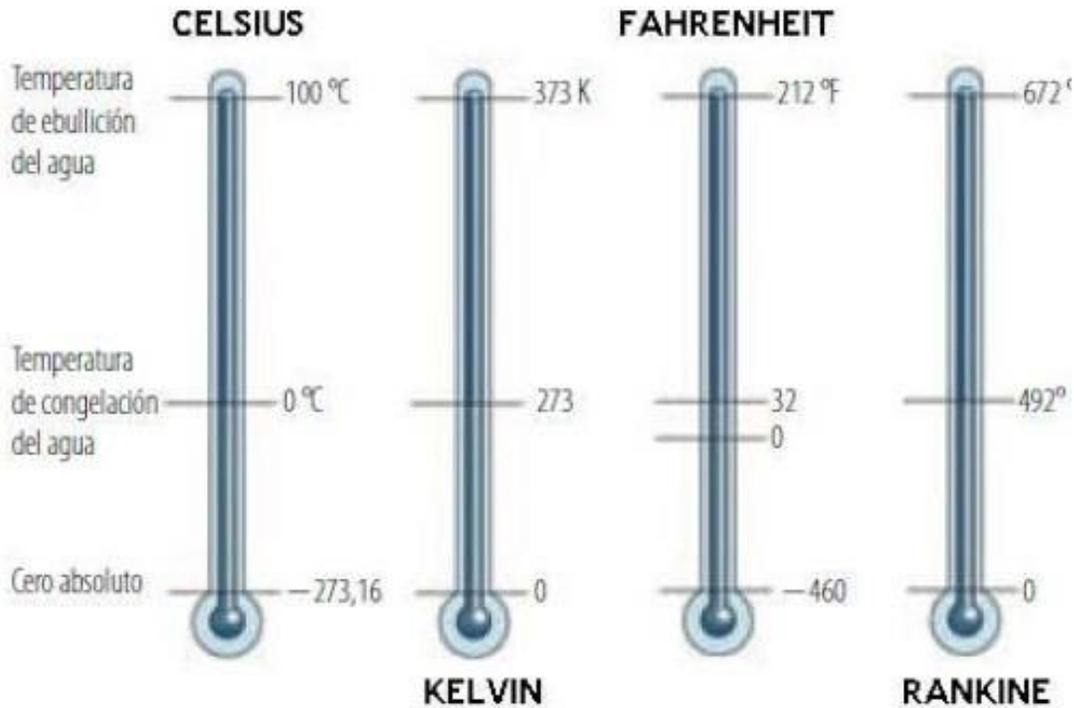


Figura 1.2.- Escalas de medición de temperatura.

Fuente: <http://www.quimicafisica.com/escalas-de-temperatura.html>

1.3.La transferencia de energía calorífica en la ingeniería.

La transferencia de calor es el intercambio de energía calórica entre dos cuerpos, o un cuerpo y su entorno dado por una diferencia de temperatura entre estos. La ciencia de la transferencia de calor es aquella que estudia el proceso, mecanismo y velocidad mediante el cual se da el intercambio de energía calórica en un sentido determinado y con una magnitud específica, si y sólo si, se tiene una diferencia de temperaturas entre los objetos, y que termina cuando ambos objetos alcanzan su equilibrio térmico (ley cero de la termodinámica), lo cual no es posible de determinar mediante un análisis termodinámico. Es preciso mencionar que la termodinámica y la transferencia de calor no son disciplinas

que se contradigan o que se estudien por separado, ambas se complementan entre sí, la primera nos permite saber la ganancia o pérdida de energía dada dentro de un sistema, mientras que la segunda nos permitirá conocer el mecanismo y el tiempo en el que el proceso de tránsito de energía será llevado a cabo.

El intercambio o transferencia de energía calórica está dado mediante tres principales mecanismos enlistados a continuación:

- Conducción.
- Convección.
- Radiación.

Debido al avance tecnológico en las sociedades moderna, la ciencia de la transferencia de calor ha jugado un rol de carácter crucial dentro del estudio y desarrollo de nuevos componentes, procesos y también, en el mejoramiento y optimización de las tecnologías ya conocidas por la humanidad. El campo de acción de esta ciencia tiene polos que a simple juicio parecerían completamente opuestos o absurdos, que van desde la industria alimentaria hasta el desarrollo de microprocesadores, pasando por la industria de fundición y llegando al desarrollo de escudos térmicos para transbordadores espaciales⁶.

⁶ Para recalcar la importancia de la transferencia de calor en etapas tempranas de desarrollo o diseño, es necesario mencionar la combinación de eventos fortuitos que desembocaron en la explosión del transbordador espacial Challenger el 28 de enero de 1986 donde fallecieron los 7 tripulantes de la misión. Los peritajes concluyeron que fue a causa de un “fallo” en una junta tórica (también conocida como O ring) lo que provocó que gases de combustión a alta presión y temperatura erosionaran la junta tórica. A consecuencia de las temperaturas bajo cero el día del lanzamiento, las juntas no se pudieron

En el rubro de los motores de combustión interna, la aplicación de la ciencia de transferencia de calor en el diseño ha contribuido a la optimización de combustibles. Con el paso de los años, la industria automotriz se ha valido de esta ciencia para desarrollar motores más eficientes y duraderos al tener un mayor control en el enfriamiento de estos, sin olvidar que el confort del usuario se ve incrementado, al ser desarrollado material que permita una adecuación de la temperatura dentro de la carrocería según sea demandado por el entorno del vehículo.

A futuro, la transferencia de calor tendrá la misma o mayor importancia que ha venido sosteniendo al pasar de los años en las áreas de desarrollo tecnológico e ingenieril, con el desarrollo de nuevas tecnologías amigables con el ambiente y nuevas fuentes de combustibles, será necesaria la intervención del análisis y estudio del tránsito de energía calórica entre sistemas, cuerpos o dentro de procesos sistemáticos.

1.4.Mecanismos de transferencia de calor.

Como se mencionó previamente, el calor es energía en tránsito, misma que se traslada mediante mecanismos físicos de transferencia, si y solo si hay una diferencia de temperatura entre cuerpos, en donde la energía se moverá del cuerpo con mayor contenido calórico hacia el de menor gradiente de energía calórica.

expandir adecuadamente, causando una salida de los gases de combustión, lo que concluyo con la explosión del transbordador 73 segundos después del despegue.

El entendimiento de cada uno de los tres mecanismos de transferencia de calor permite que en un análisis ingenieril de sistemas pueda ser establecido un modelo en el cual sea cuantificable la cantidad de calor en movimiento por unidad de tiempo, lo cual es útil para el diseño de sistemas que faciliten el ahorro energético, la selección de aislamientos o el aprovechamiento máximo de la energía calórica.

En diversas fuentes se plantea que la radiación, convección y conducción solo los tres mecanismos mediante los que la energía calórica es desplazada, sin embargo, si se hace un análisis detallado de la convección, podemos concluir que a nivel microscópico esta cumple el principio de transferencia de calor por conducción, que se combina con el movimiento de un fluido. Esta aseveración es considerada, debido a que a nivel microscópico hay una transferencia de calor por conducción entre una superficie y un fluido, o bien entre fluidos a distintas temperaturas, los choques individuales conllevan a que se presente un movimiento volumétrico mayor de un líquido a mayor temperatura que a su vez trasfiere el calor a volúmenes con menor temperatura en un mismo fluido o en una mezcla de fluidos, incluso entre un fluido y una placa plana.

Con el fin de ejemplificar el funcionamiento de cada mecanismo de transferencia de calor, la figura 1.3 nos ofrece 3 casos análogos a los 3 mecanismos de transferencia ya antes mencionados. En cada caso se pretende llevar agua del punto W al punto B. Para los tres casos debemos considerar que el agua es la representación del calor, las personas representan al mecanismo de

transferencia, por lo tanto, las tres analogías quedarían denotadas de la siguiente manera:

- Caso 1. – El chorro de agua despedido por la manguera viaja hasta el punto B sin ningún medio físico, de esta misma manera funciona la radiación, la cual no necesita de un medio físico para transferir calor.
- Caso 2. – El balde de agua viaja de persona a persona hasta llegar a su destino, el punto B. Este caso representa el funcionamiento de la transferencia, la cual transmite el calor de molécula a molécula aquí representadas por las personas.
- Caso 3. - En el caso de la convección, está representada por un corredor solitario, que mediante su carrera lleva el balde de agua. En este ejemplo, la carrera es análoga al fluido que transporta el calor.

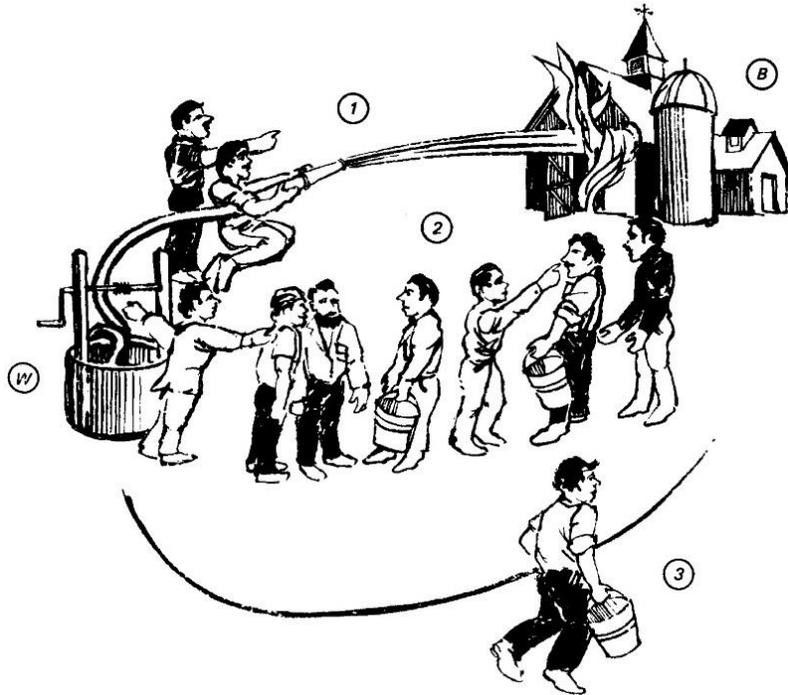


Figura 1.3.- Analogía para los tres mecanismos de transferencia de calor.

Fuentes: A Heat Transfer Textbook, John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V.

Pag.11.

1.4.1. Conducción.

Al tratarse la conducción como medio de transferencia calórica, es imprescindible hacer referencia a una transmisión de energía cinética de nivel subatómico mediante choque de moléculas, movimiento de electrones libres o vibración de la red cristalina del material, en donde se presenta una transferencia energética de las partículas con mayor gradiente energético hacia las partículas circundantes con menor cantidad de energía.

En cada fase de la materia se da un intercambio energético diferente. En los gases y líquidos, la energía es transferida principalmente por los choques aleatorios de las partículas, mientras que, en las fases sólidas, se debe a la vibración de las partículas. Este mecanismo tiene como característica sobresaliente, que se da entre dos cuerpos sin que se presente un desplazamiento de materia de cada cuerpo.

Matemáticamente, la conducción es explicada a través de la Ley de Fourier.

1.4.2. Ley de Fourier.

Joseph Fourier postuló la conducción en su libro *“Theorie Analytique de la Chaleurin”* (Teoría Analítica de Calor, 1822) Çengel y Ghajar (2011) lo resumen de la siguiente manera:

“La razón de conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa”.

$$\text{Razón de conducción de calor} = \frac{(\text{Área})(\text{Diferencia de temperatura})}{\text{Espesor}}$$

$$Q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{(k)(A)}{e} (t_1 - t_2) \quad \text{Ec. 1.3}$$

Esto es interpretado de la siguiente manera:

Q = Se define como el flujo de calor.

k = Es la constante de conductividad térmica de un material.

$\frac{\Delta T}{\Delta x}$ = Es el *gradiente* de temperatura en dirección al flujo de calor.

A = Área de la superficie.

e = Espesor del material

De la ecuación anterior es preciso resaltar que la constante de conductividad térmica es un valor positivo, sin embargo, se agrega a la ecuación el signo negativo para que, de esta manera, se cumpla con la segunda ley termodinámica,

la cual establece que “la transferencia de calor se lleva a cabo de la región de mayor temperatura a la de menor”.

1.4.3. Conductividad térmica.

A diferencia de la convección calórica de un material, la conductividad térmica es una propiedad intrínseca de cada material, misma que está sujeta a la composición química, a la temperatura de trabajo del material o bien, al arreglo molecular del elemento o sustancia en cuestión.

La conductividad térmica de los materiales se expresa en la siguiente ecuación:

$$k = \frac{Q}{\Delta T} \quad \text{Ec. 1.4}$$

De la ecuación previamente mostrada se concluye que:

Q= Es el flujo de calor (por unidad de tiempo y unidad de área).

ΔT = Al gradiente de temperatura.

Esta propiedad física de los materiales se cuantifica en $\frac{W}{(m)(^{\circ}C)}$ equivalente a

$\frac{J}{(m)(s)(^{\circ}K)}$, de esto podemos expresar lo siguiente:

Una conductividad térmica de 1W por metro y grado centígrado, indica que una cantidad de calor (1 J) se propaga en un material por conducción térmica:

- En 1 segundo.
- En una superficie de 1m^2 .
- En un espesor de material de 1 m.
- Cuando la diferencia de temperatura entre las caras es de 1°C .

De acuerdo con el estado de la materia en que se encuentra una sustancia o material, su conductividad térmica puede ser potenciada o disminuida debido al arreglo molecular que tiene el material. En materiales uniformes como los sólidos, la conductividad térmica es altamente propiciada por la interacción de sus partículas.

En metales puros, la conductividad está dada principalmente por la presencia de electrones libres, en aleaciones esta propiedad disminuye, en ambos casos, al aumentar la temperatura del material, aumenta la capacidad para conducir el calor. En el caso de los no metales, si se trata de cristales como el diamante o el silicio, la conducción es relativamente alta, propiciada principalmente por el arreglo cristalino de la sustancia, esta disposición molecular facilita la vibración y transmisión de energía de molécula a molécula.

En el caso de los líquidos, la transmisión de energía es resultado del choque de partículas microscópicas excitadas por el aumento de temperatura, es decir, una partícula en movimiento (movimiento provocado por el aumento de su temperatura) al momento de chocar con otra en reposo, transmite la energía cinética la primera a la segunda. En el caso de los gases, este intercambio

energético se ve disminuido debido a que distancia entre partículas es mayor que en los líquidos.

En la tabla 1.1 y en la figura 1.4 se observa que los elementos cristalinos no metálicos como el diamante presentan una alta conductividad térmica, seguido de metales puros, líquidos y gases. En los valores más bajos se tienen materiales no homogéneos tales como la madera o el amianto⁷ y algunos gases, a los materiales con un bajo coeficiente de conductividad térmica también se les conocen como materiales aislantes o aislantes térmicos.

⁷ El amianto es mayormente conocido como asbesto. Es una mezcla de minerales metamórficos fibrosos ricos en Magnesio, Silicio, Fierro e hidroxilo (HO). Se ha demostrado que el Asbesto o amianto es un precursor cancerígeno, por tal motivo, el uso de este compuesto mineral ha sido prohibido en casi su totalidad.

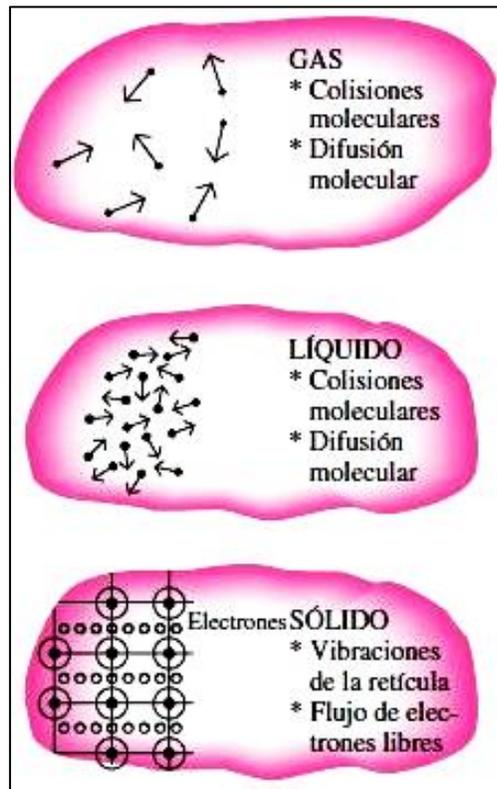


Figura 1.4.- Representación gráfica de la cercanía entre partículas en función del estado de la materia.

Fuente: Transferencia de calor y masa Enfoque práctico, Cengel Yunus Pág. 22.

Tabla 1.1.- Conductividad Térmica de algunos materiales a temperatura ambiente dados en W/mK°.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Conductividad_t%C3%A9rmica

Material	λ	Material	λ	Material	λ
Acero	47-58	Corcho	0,03-0,04	Mercurio	83,7
Agua	0,58	Estaño	64,0	Mica	0,35
Aire	0,02	Fibra de vidrio	0,03-0,07	Níquel	52,3
Alcohol	0,16	Glicerina	0,29	Oro	308,2
Alpaca	29,1	Hierro	80,2	Parafina	0,21
Aluminio	237	Ladrillo	0,80	Plata	406,1-418,7
Amianto	0,04	Ladrillo refractario	0,47-1,05	Plomo	35,0
Bronce	116-186	Latón	81-116	Vidrio	0,6-1,0
Zinc	106-140	Litio	301,2	Cobre	372,1-385,2
Madera	0,13	Tierra húmeda	0,8	Diamante	2300
Titanio	21,9				

En la tabla 1.2 podemos observar la comparación de la conductividad térmica de diversos materiales. Esta comparativa reafirma que, a mayor cercanía y uniformidad entre las moléculas de un material, mayor será su capacidad para transferir calor.

1.4.3.1. Conductividad térmica de los materiales homogéneos.

Como se mencionó previamente, la conductividad térmica en una sustancia depende mucho de la fase en la que esta se encuentre. En los materiales sólidos, la propiedad de conducir el calor se ve propiciada por la cercanía que tienen las moléculas de estos materiales, más que en los líquidos y aún más que en los gases.

$$k_{sólidos} > k_{líquidos} > k_{gases}$$

1.4.3.2. Conductividad térmica de los sólidos homogéneos.

La conductividad térmica en un material sólido homogéneo es influida exclusivamente por la temperatura, y no por la presión. Esta relación es lineal y se dice que a mayor temperatura hay una mayor conductividad térmica. Es posible definir esta afirmación mediante la siguiente ecuación:

$$k = k_0 (1 + b * t) \quad \text{Ec. 1.2}$$

Donde k_0 es la conductividad a una temperatura en °C o °K, b es una constante multiplicada por el tiempo transcurrido.

Como sólidos homogéneos se pueden enlistar materiales con diferente composición y arreglo en sus estructuras cristalinas:

- **Metales puros:** Los metales puros son los mayores conductores de calor que se pueden encontrar en la naturaleza. Gracias al arreglo de su estructura cristalina, la transmisión de energía mediante vibraciones en su

red en dirección de las temperaturas menores propicia que la conducción de calor sea mayor y más rápida. Debido a que los metales puros son estructuras cristalinas, sus electrones de valencia tiene una mayor libertad de movimiento, esto explica por qué los metales puros además de ser buenos conductores de calor también son buenos conductores de la electricidad. En estos materiales, factores como la temperatura, composición química y los cambios de fase afectan directamente al desempeño de la conducción térmica del metal, principalmente se ven influenciados por la temperatura, los metales disminuyen su conductividad térmica cuando la temperatura incrementa.

- **Aleaciones:** Los materiales aleados no son tan buenos conductores térmicos como lo son los metales puros. Al contener diversos elementos en su composición, las vibraciones en su estructura molecular son menor que en los metales puros. A diferencia de los metales puros, en las aleaciones la conductividad térmica aumenta al aumentar la temperatura de la aleación.

En la figura 1.5 se observa un ejemplo del desempeño como conductor térmico en el cobre como metal puro contra una aleación de cobre. Se puede observar que el cobre en estado puro tiene una mayor conductividad térmica, sin embargo, esta capacidad disminuye al incrementar su temperatura. En el caso de la aleación Cobre-Níquel, la conductividad térmica es menor y caso contrario al cobre en estado puro, la aleación aumenta su conductividad térmica cuando la temperatura de esta aumenta.

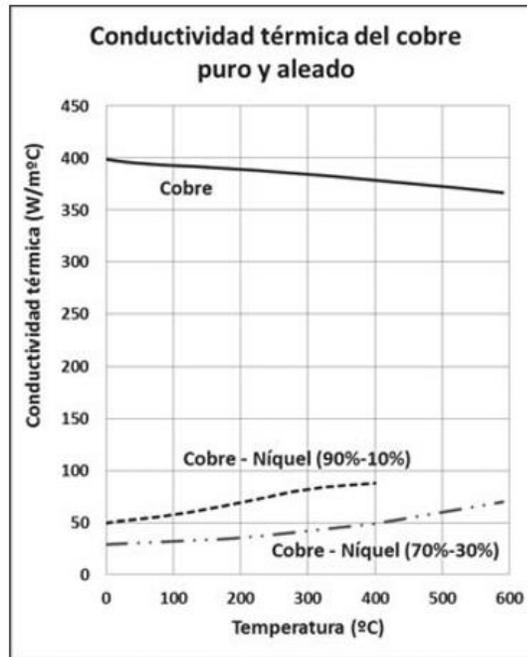


Figura 1.5. - Conductividad térmica del Cobre puro vs Aleación Cobre Níquel.

Fuente: Ingeniería Térmica, Montes Pita María José (pág. 35).

- Sólidos no metálicos de estructura cristalina:** A diferencia de los metales puros, el arreglo de estos tiene estructura cristalina, mas no electrones de valencia libres. Lo que hace posible una relativa buena conducción calórica en estos materiales es la vibración en su estructura cristalina. En casos donde la estructura cristalina del material es tan perfecta, como en el diamante ($2000-2500 \frac{W}{(m)(^{\circ}C)}$), se logra un coeficiente de conducción significativamente alto.
- Sólidos amorfos:** El caso de los sólidos amorfos es muy similar al caso de conductividad térmica de los líquidos. Debido al arreglo irregular de sus

estructuras, la conducción por medio de vibraciones o choques moleculares es pobre.

1.4.3.3. Conductividad térmica de los líquidos homogéneos.

La conductividad térmica en un líquido homogéneo es independiente de la presión de este. Estas sustancias decrecen en su conductividad térmica al verse aumentada su temperatura. Salvo en los siguientes líquidos:

- Agua.
- Glicol.
- Glicerina.

Como se muestra en la figura 1.6 estas sustancias tienen un pico en su conductividad y a medida que la temperatura aumenta, la conductividad se ve mermada.

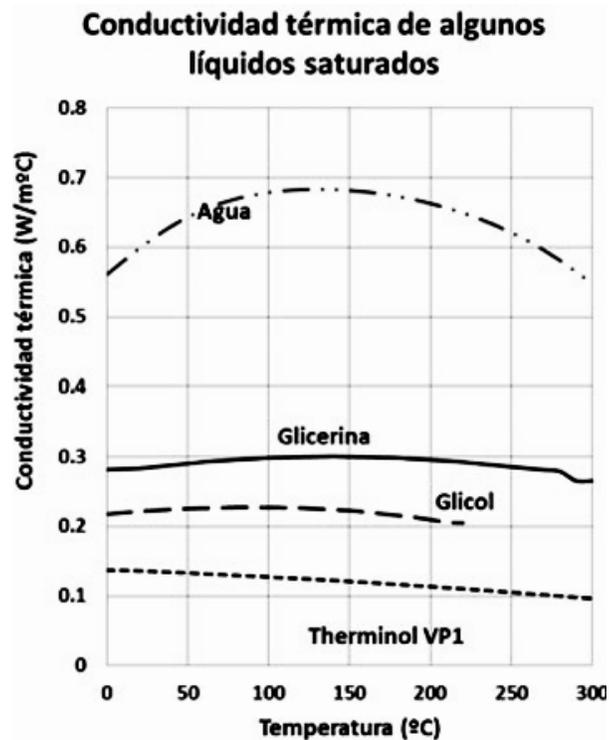


Figura 1.6.- Conductividad térmica de líquidos saturados.

Fuente Ingeniería Térmica, Montes Pita María José (pág. 36)

1.4.3.4. Conductividad térmica en los gases homogéneos.

La conductividad térmica en un gas homogéneo es directamente proporcional a:

n = Número de partículas por unidad de volumen.

c = Velocidad media molecular.

Λ = distancia media recorrida por una molécula antes de su colisión con otra.

Respecto a las proporcionalidades mencionadas, se deduce que:

- Con el aumento de temperatura aumenta la velocidad de las moléculas.
- La conductividad es inversamente proporcional a la disminución de su peso molecular, porque aumenta la velocidad media de las moléculas.

- La presión de un gas tiene una injerencia directa en el número de partículas del gas y en la velocidad media de recorrido de las moléculas, por lo tanto, la conductividad térmica de un gas no está relacionada con la presión de este.

El vapor es la excepción con respecto a los puntos anteriores, es un gas que presenta una estrecha relación entre su presión y su temperatura.

La conductividad térmica en los gases es una propiedad que en comparación con los líquidos y los sólidos es mucho menor, pero a diferencia de un líquido, el gas a medida que se incrementa su temperatura, su conductividad térmica aumenta también aumenta. Esta propiedad se denota en la figura 1.7, la gráfica muestra diferentes gases a presión atmosférica.

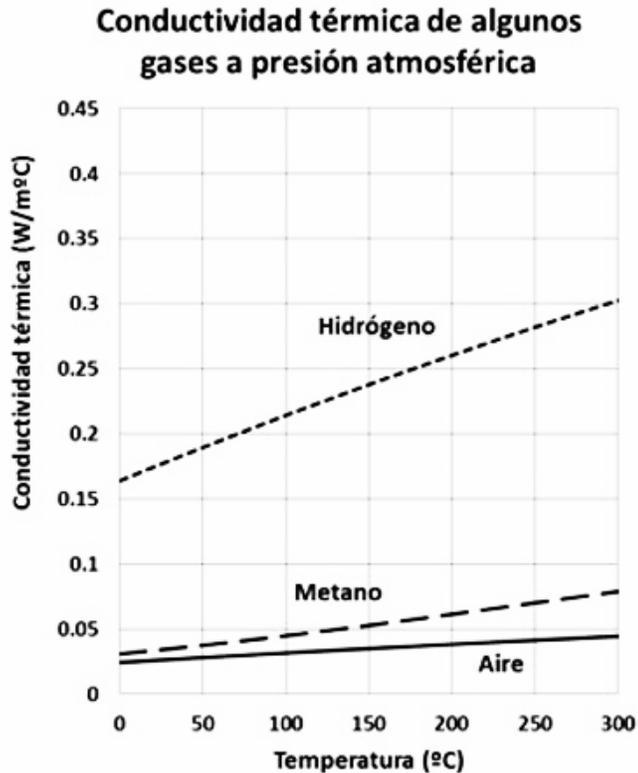


Figura 1.7.- Influencia de la temperatura en algunos gases a presión atmosférica.

Fuente Ingeniería Térmica, Montes Pita María José (pág. 37)

1.4.3.5. Conductividad térmica aparente en materiales no homogéneos.

Los materiales no homogéneos presentan una conductividad térmica no uniforme dentro de su formación molecular. Estos materiales son predominantemente materiales anisótropos⁸, es decir, que el calor es conducido

⁸ Los materiales anisótropos presentan un arreglo de su estructura interna irregular, lo que propicia que el tránsito de calor no sea uniforme y este circule idóneamente en una de sus direcciones. Son materiales principalmente con arreglos hexagonal, trigonal, tetragonal, rómbico, monoclinico y triclinio.

en una dirección preferencial propiciada por el arreglo de la estructura molecular del material. Materiales como los refractarios y los materiales aislantes presentan una estructura molecular amorfa, lo que en el caso de los aislantes propicia que la conductividad térmica disminuya cuando hay un aumento de temperatura. En los materiales refractarios, el aumento de la temperatura propicia un aumento de conductividad térmica debido principalmente a que la mayoría de los materiales refractarios están compuestos de estructuras cristalinas uniformes.

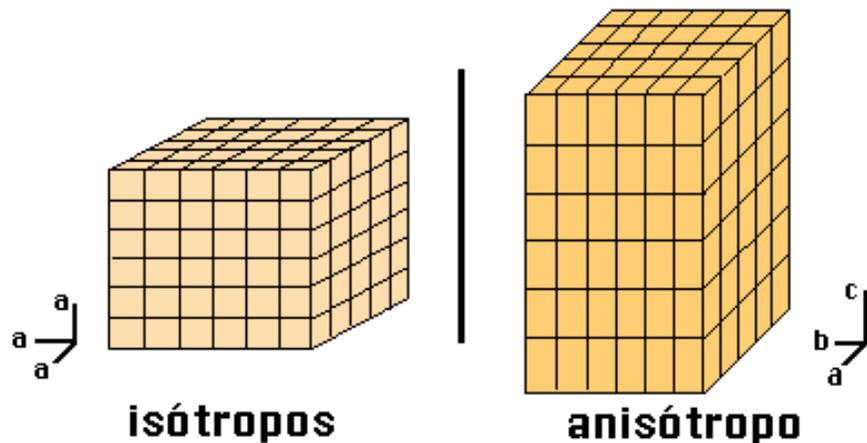
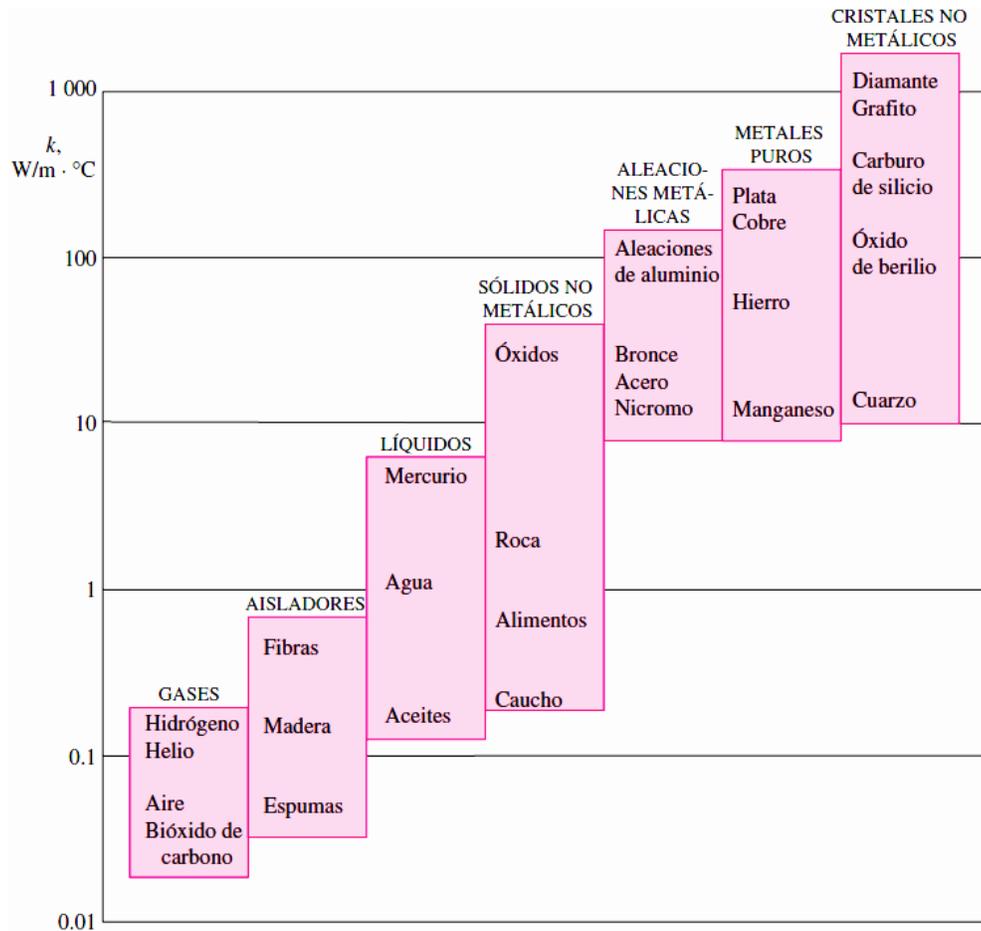


Figura 1.8.- Comparativa de un arreglo de estructuras cristalinas isotrópica y anisótropa.

Fuente: <http://edafologia.ugr.es/optmine/intro/isoanis.htm>

Tabla 1.2. - Rangos de transferencia de calor de diversos materiales, desde aislantes térmicos (bajo perfil de transferencia de calor) hasta cristales no metálicos (con una tasa de transferencia de calor más alta).

Fuente: Transferencia de calor y masa Enfoque práctico, Cengel Yunus Pág. 21.



1.4.4. Difusividad térmica.

La Difusividad térmica es la propiedad termo física de un material para conducir el calor en relación con su capacidad de conservar o almacenar la energía térmica. Básicamente es una relación de tiempo-temperatura-distancia que

expresa la velocidad en que cambia el flujo de temperaturas (energía) en un material hasta que alcanza su equilibrio térmico. Esta magnitud nos indica que tan rápido se difunde el calor en un material.

La Difusividad térmica se define en la siguiente ecuación:

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad \text{Ec. 1.5}$$

Dónde:

K= es la conductividad térmica del material.

P= densidad del material.

c_p= calor específico.

1.4.5. Convección.

Previamente se ha hecho mención que la convección no es considerada propiamente como un mecanismo de calor por algunos autores, los cuales sustentan dicha afirmación argumentando que es un mecanismo de transferencia de calor compuesto por la conducción de calor y el movimiento de un fluido con respecto de una superficie sólida y el mismo fluido. En caso de una ausencia de movimiento del fluido, se estaría hablando de una transferencia de calor dada puramente por medio de conducción.

Es importante resaltar que este mecanismo de transferencia de calor es una característica propia de los fluidos, ya sean gases o líquidos, no se presenta convección en un medio sólido. Este mecanismo se presenta principalmente cuando hay una diferencia de temperaturas entre una superficie sólida y un fluido adyacente a la misma, ya sea líquido o gaseoso. El fluido adyacente al sólido toma calor a través de una delgada capa en la que la transferencia se da mediante conducción y al aumentar la temperatura del fluido, disminuye su densidad lo que tiene como consecuencia que el fluido suba llevando consigo el calor tomado del sólido⁹. Este movimiento a consecuencia de la diferencia en la densidad del fluido es lo que se conoce como convección.

Dentro de un proceso de intercambio de calor por convección, la variable que representa la velocidad del movimiento del flujo juega un papel importante dentro de la determinación y resolución de problemas, Holman (1998) postula que este razonamiento obedece a que “el gradiente de temperatura depende de la rapidez a la que el fluido se lleva el calor, una velocidad alta produce un gradiente de temperatura grande” (p. 8).

⁹ El movimiento dado en un fluido es un movimiento macroscópico de moléculas, mismas que al moverse en conjunto llevan el calor hacia las partes del fluido con una menor temperatura.

1.4.5.1. Ley de enfriamiento de Newton.

La definición matemática que permite explicar de manera más objetiva el fenómeno de la convección es ley de enfriamiento de Newton¹⁰. Esta “ley” empírica expresa la relación existente entre una superficie sólida y el fluido que la rodea *“el flujo de calor por unidad de superficie que se transmite por convección entre una superficie y un fluido a distinta temperatura es directamente proporcional a la diferencia de temperaturas entre la superficie y el fluido”*, expresada de la siguiente manera:

$$q = h \cdot A (T_s - T_f) \quad \text{Ec. 1.6}$$

La ecuación anterior puede ser interpretada de la siguiente manera:

H = Coeficiente de transferencia de calor por convección ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ o $\text{Btu}/\text{h} \cdot \text{ft}^2$).

A = Área normal a la dirección del flujo de calor.

T_s = Temperatura de la superficie sólida.

T_f = Temperatura del fluido.

El valor del coeficiente h se determina de forma experimental y está sujeto a las características propias de cada fluido como su velocidad masiva, naturaleza de su movimiento, así como la geometría y composición de la superficie adyacente al fluido.

¹⁰ Isaac Newton presentó su postulado en 1701, se conoció en un principio como ecuación de la rapidez de transferencia de calor convectivo.

1.4.5.2. Convección Natural.

Para comprender la convección natural, se debe de recordar que un líquido en presencia de un aumento de temperatura tiende a variar su densidad. El volumen adyacente a la fuente de calor, al tener una densidad menor, tiende a subir, los volúmenes de menor temperatura y con mayor densidad tienden a bajar hacia la fuente de calor.

Quizá el ejemplo más recurrido para la explicación de la convección natural es el caso de un volumen de agua sometido a un aumento de temperatura. Dentro del recipiente, los volúmenes de agua a mayor temperatura (densidad menor) tienden a subir, es por esto por lo que el agua parece “burbujear”.

1.4.5.3. Convección Forzada.

En contra parte de la convección natural, se dice que hay una convección forzada cuando el movimiento del fluido es dado a través de un medio mecánico externo, es decir, que el líquido es forzado a fluir hacia o desde la fuente de calor mediante una bomba, ventilador, aspas, etc.

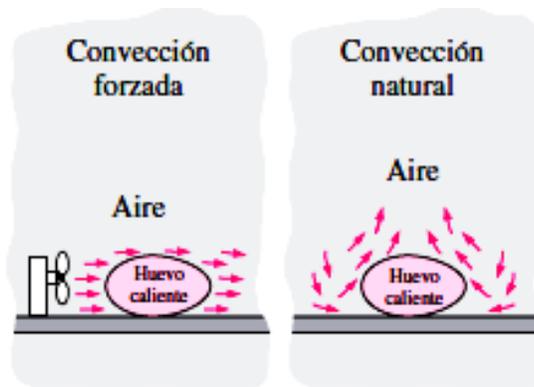


Figura. 1.9.- Ejemplificación del comportamiento de la convección forzada y la convección natural.

Fuente: Transferencia de calor y masa Enfoque práctico, Cengel Yunus Pág. 21.

1.4.6. Radiación.

El fenómeno de transferencia de calor por radiación es por mucho el mecanismo más habitual y constante en el universo, esto es debido a que el fenómeno de la radiación (a diferencia de la convección y la conducción) no necesita de un medio físico entre la fuente emisora y el receptor, está presente en cualquier objeto con una temperatura mayor al cero absoluto. Además de lo anterior, la radiación se hace presente no solo en sólidos, también los líquidos y gases emanan radiación térmica. Frank P. Incropera y David P. DeWitt (1999) lo definen de la siguiente manera: *“Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por las ondas electromagnéticas (o alternativamente fotones)”* (p. 25). Es a través de la radiación que el planeta recibe el calor emitido por el sol, este transporte de energía se da mediante la

propagación de ondas electromagnéticas que viajan a través del vacío entre los dos cuerpos celestes.

La radiación térmica ocurre en un rango de longitud de onda dentro del espectro electromagnético de emisión de energía que va de los 0,1 μm a 1000 μm (micrones) aproximadamente. Al igual que otras ondas electromagnéticas, cada onda de radiación térmica se asocia con su longitud de onda y frecuencia respectivamente. En la tabla 1.3 se muestra de manera ilustrativa el rango que ocupa la radiación térmica dentro del espectro electromagnético.

Tabla 1.3.- Espectro electromagnético de emisión de energía.

Fuente: A Heat Transfer Textbook, John H. Lienhard IV, John H. Lienhard V.

Pag.28.

Formas del espectro de onda electromagnética.	
Caracterización	Longitud de Onda λ
<i>Rayos cósmicos</i>	< 0.3 pm
<i>Rayos Gamma</i>	0.3 – 100 pm
<i>Rayos X</i>	0.01 – 30 pm
<i>Luz Ultravioleta</i>	3 – 400 pm
<i>Luz Visible</i>	0.4 – 0.7 pm
<i>Radiación Cercana a la infrarroja</i>	0.7 – 30 μ m
<i>Radiación lejana a la infrarroja</i>	30 – 1000 μ m
<i>Ondas milimétricas</i>	1 – 10 mm
<i>Micro ondas</i>	10 – 300 mm
<i>Ondas cortas de radio y TV</i>	300 mm – 100 m
<i>Ondas largas de radio</i>	100 m – 30 Km

Para que un cuerpo pueda considerarse como un emisor de radiación térmica, este debe de tener un nivel finito de energía. Este nivel de energía es conocido como cuanto o fotón. Es decir, que un cuerpo debe tener una cierta cantidad de cuantos o fotones para que sea capaz de emitir radiación térmica. La energía contenida en un fotón depende de la longitud de onda de la radiación emitida, lo cual está sujeto a una excitación externa de las moléculas constitutivas del cuerpo u objeto que, a su vez, al volver a su estado inicial las partículas liberan

energía, a esta disminución de energía se le conoce como emisión de radiación electromagnética.

A nivel microscópico, el estímulo energético externo sobre un cuerpo provoca un aumento en el nivel de energía de vibración o rotación de cada molécula constitutiva del objeto. Cuando un cuerpo emite una radiación térmica es porque se ha disminuido el nivel de excitación de sus moléculas. Otro medio de emisión es cuando un electrón migra de su órbita original al de un átomo más débil y una tercera razón de la emisión, es la disminución de energía del núcleo del átomo. Toda emisión de energía de una sustancia u objeto está dada a partir de la energía térmica de su materia respectivamente y ésta a su vez limitada por la superficie externa del objeto.

Para sólidos opacos tales como los metales, rocas, madera etc. La radiación térmica es un fenómeno que incide de manera poco significativa en ellos, dadas las características de su composición, la radiación térmica dentro de ellos no logra sobresalir a su superficie y la energía térmica que recae en la superficie de un cuerpo opaco, es rápidamente absorbida en las micras superficiales.

La ecuación de Stefan-Boltzmann, explica matemáticamente la razón máxima de radiación que es emitida desde la superficie de un objeto a una temperatura específica:

$$Q = \sigma A_s T_s^4 \quad \text{Ec. 1.7}$$

Al objeto descrito por la ecuación anterior se le conoce como cuerpo negro. Es de interés resaltar la constante *Stefan-Boltzmann* equivalente a:

$\sigma = 5.67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$ (sistema internacional) o bien:

$\sigma = 0.1714 * 10^{-8} \text{ Btu/hr} * \text{ft}^2 * \text{R}^4$ (sistema inglés).

1.4.6.1. Cuerpo negro.

Se denomina cuerpo negro¹¹ a un objeto “teóricamente ideal” capaz de absorber toda la energía radiante posible (también es capaz de absorber la luz) que le rodea. La radiación que alcanza a un cuerpo negro no es reflejada y tampoco es capaz de que circule a través de este, y a pesar de que en apariencia este objeto no permite la salida de la energía contenida en su interior, *“el cuerpo negro emite luz y constituye un sistema físico para el estudio de la emisión de radiación electromagnética”*¹².

En la ecuación 1.7, hace referencia a un estado “de comportamiento ideal de un cuerpo negro”, es decir, la razón máxima de emisividad del objeto. En la práctica, un cuerpo “real” no cumpliría la razón máxima de un cuerpo negro, esto debido a que no existe un emisor de radiación térmica perfecto. Por lo tanto, un cuerpo que se apega más a las condiciones de operación (emisión) reales, está sujeto a la siguiente expresión matemática:

$$Q = \epsilon \sigma A_s T_s^4 \quad \text{Ec. 1.8}$$

¹¹ El término “Cuerpo Negro” fue acuñado por el físico Alemán Gustav Kirchhoff en 1862.

¹² Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Cuerpo_negro.

En la ecuación 1.8 se agrega la constante de **emisividad** de la superficie ϵ , misma que tiene un valor numérico en el intervalo de 0 – 1. La constante de emisividad de un material denota cuan cercano está este material a ser un cuerpo negro, para el cual, la constante es igual a 1. Otra característica que es imprescindible destacar, es la constante de **absortividad**, que en contra punto a la emisividad, revela cuan cercano está un material (superficie) a ser un cuerpo negro en cuestión de absorción de energía. El intervalo que comprende el valor de absorción de energía (α), al igual que la emisividad, va de 0 – 1, y de igual modo, al cuerpo negro se le refiere el valor de la unidad.

De manera general, tanto la absorción como emisión de energía de una superficie dependen de la temperatura y longitud de onda de la radiación. Gustav Kirchhoff aportó un teorema (igualdad), que de manera simple dice que *“si un cuerpo (o superficie) está en equilibrio termodinámico con su entorno, su emisividad es igual a su absorbanza ($\alpha = \epsilon$)”*¹³.

El postulado de Kirchhoff bien puede ser explicado de una manera más literal, por ejemplo:

- *“esta ley puede resumirse como: un buen reflector (mal absorbedor) es un mal emisor y un mal reflector (buen absorbedor) es un buen emisor”*¹⁹.
- *“la emisividad no puede ser mayor a uno ($\alpha < 1$), pues esto es imposible por la conservación de la energía, por lo que no es posible térmicamente irradiar más energía que un cuerpo negro, en equilibrio”*¹⁹.

¹³ Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Ley_de_Kirchhoff_de_la_radiaci%C3%B3n_t%C3%A9rmica

En la tabla 1.4 se enlistan a manera informativa, la emisividad de materiales de uso común. Es de interés resaltar que los materiales que a simple vista tendrían un “brillo” intenso al ser expuestos a la luz, presentan la menor emisividad. De manera contraria, aquellos materiales con superficie más “obscura” presentan una mayor emisividad, por lo tanto, estos materiales tienen una mayor absorción de energía térmica por radiación.

Tabla 1.4.- Emisividad de algunos materiales a 300 °K

Fuente: Transferencia de calor y masa Enfoque práctico, Cengel Yunus Pág. 28.

Emisividades de algunos materiales a 300 K	
Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Pavimento de asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92-0.96

2. ANÁLISIS TÉRMICO DE TRANSFERENCIA DE CALOR EN AISLANTES TÉRMICOS.

El desarrollo de aislamientos térmicos siempre ha sido armónico con relación al desarrollo industrial. A partir de los años 20's el desarrollo e importancia de aislamiento termo acústico cobro auge, actualmente sigue siendo un tema de estudio en nuevos desarrollos principalmente en aquellas ramas de la industria donde se involucran reacciones exotérmicas.

El desarrollo de un material aislante se da fundamentalmente por alguna de las siguientes razones:

1. *Necesidades del proceso:* En determinados procesos industriales, es necesario impedir un intercambio calórico que provoque disfunciones en el proceso por cambios de temperatura no admisibles.
2. *Seguridad de bienes e individuos:* El recurso humano es el factor más importante en la industria. La falta de un aislamiento adecuado en superficies expuestas, son causal de lesiones y accidentes a operadores. Un laxo aislamiento térmico es causa raíz de combustión e incendio de materiales y equipo.
3. *Reductor de pérdidas energéticas:* En procesos industriales las pérdidas energéticas derivadas de una mala adecuación de aislamiento van del 2 al 3%. Un buen estudio de aislamiento es la mejor inversión para el ahorro energético

4. *Reducción de contaminantes ambientales:* La obtención de energías a nivel global se da principalmente por la transformación de combustibles, más concretamente por reacción exotérmica del combustible con el oxígeno de la atmosfera. Contaminantes como dióxido de carbono (CO₂) son resultado directo de la quema de combustibles, dado que consumo y contaminación están ligados estrechamente, Salvador Escoda en su Manual de aislamiento en la industria lo señala como: *“La energía que menos contamina es la que no se consume”* (p. 6). Este punto define concretamente la importancia de una adecuada implementación de aislamientos térmicos en procesos térmicos.

Este capítulo tiene por objetivo, dar un panorama general del funcionamiento de un aislante térmico, los tipos de aislamiento según su estructura molecular, origen y ventajas de unos sobre otros.

2.1. Definición de aislamiento térmico.

Por definición, un aislante térmico es un material que dada sus características (resistividad térmica) opone resistencia al flujo de energía calórica a través de sí mismo, por consiguiente, se opone al flujo de calor entre dos cuerpos, ambientes o sistemas, que en condiciones naturales tenderían a alcanzar un equilibrio térmico.

De modo general, todos los materiales tienen un nivel de oposición al paso de calor, de esta manera, se puede concluir que todos los materiales conocidos son

aislantes térmicos, sin embargo, se denomina comúnmente aislamiento térmico a aquellos materiales que oponen la mayor resistencia al flujo calórico. Se definen como aislantes térmicos a los materiales con conductividad térmica igual o por debajo de $0,08 \frac{W}{(m)(^{\circ}C)}$.

La tasación del coeficiente de conductividad de un material aislante es compleja, debido a que cada material presenta una reacción diferente ante las condiciones de transmisión de calor al que sea sometido, ya sea radiación, conducción o convección. Otro factor influyente es la temperatura a la que se encuentra el material. Para realizar cálculos y comparar las propiedades de cada material, se utiliza el coeficiente de conductividad térmica, que mide únicamente la conducción, bajo condiciones de temperatura y humedad controladas.

2.2. Clasificación de los materiales aislantes.

En el ramo industrial, los materiales de aislamiento son incluidos en diversas clasificaciones. Cada clasificación agrupa los materiales basándose en una característica muy específica de cada material.

El hecho de tener los materiales en distintas clasificaciones facilita la tarea de búsqueda, selección y aplicación de un material según los requerimientos técnicos de un proyecto. Comercialmente, podemos encontrar las siguientes clasificaciones:

1. Según su estructura:
 - a. Mineral.

- b. Granular.
- c. Celular.

2. Según su origen:

- a. Vegetal.
- b. Mineral.
- c. Sintético

3. Según su resistencia a la temperatura.

En relación con las clasificaciones ya mencionadas, cada material aislante ocupa una posición dentro de cada clasificación. La selección y la adecuada aplicación de un aislamiento está intrínsecamente ligado a las condiciones de trabajo del aislamiento, es decir, que la selección y aplicación, además de tener como factor la temperatura, se deben considerar factores como:

- Tipo de transferencia calórica a la que se verá sometido el material (radiación, convección o transferencia).
- Rangos térmicos de operación o la exposición a flama directa.
- Agentes abrasivos.
- Exposición a rayos UV.
- Geometría de la superficie que será cubierta.

En este documento se exponen características técnicas de material para aislamiento de uso común en la industria.

2.2.1. Aislantes térmicos de origen mineral.

Las fibras termo aislantes son materiales obtenidos de la fusión de rocas o escoria de vidrio, el componente principal de estas fibras, son los óxidos de sílice. Mediante un proceso de centrifugado, el material es forzado a pasar por dados que lo convertirán en finos hilos, a su vez, los hilos son distribuidos de manera multidireccional con la finalidad de atrapar aire entre sus fibras. Debido a que son materiales porosos, la absorción de líquido es un tema que se debe evaluar en la aplicación del material.

Las fibras minerales cumplen con tres propiedades altamente valoradas en la industria: aislamiento térmico, aislamiento acústico y sirven como corta fuegos gracias a su naturaleza incombustible. Los aislantes más comunes dentro de esta clasificación son las fibras de vidrio y las fibras cerámicas.

2.2.1.1. Fibra de vidrio.

Este material consta de delgados filamentos poliméricos hechos a base de dióxido de Silicio (SiO_2). La fibra de vidrio¹⁴ es un material con un bajo peso. Además de su uso como aislamiento, la fibra de vidrio también funge como refuerzo para plástico, lo cual se consigue mezclando este producto con agentes poliméricos, gracias a esto, el plástico reforzado con vidrio (también conocido como fibra de vidrio) se ha convertido en una opción a la fibra de carbono por su bajo costo productivo y es menos quebradiza.

¹⁴ En países de habla inglesa, la fibra o lana de vidrio se conoce como Fiberglass.

Por su relación costo-beneficio, la fibra de vidrio es un material de frecuente uso en la industria. Su conductividad térmica promedia los $0.32 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$ a $0.05 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$.

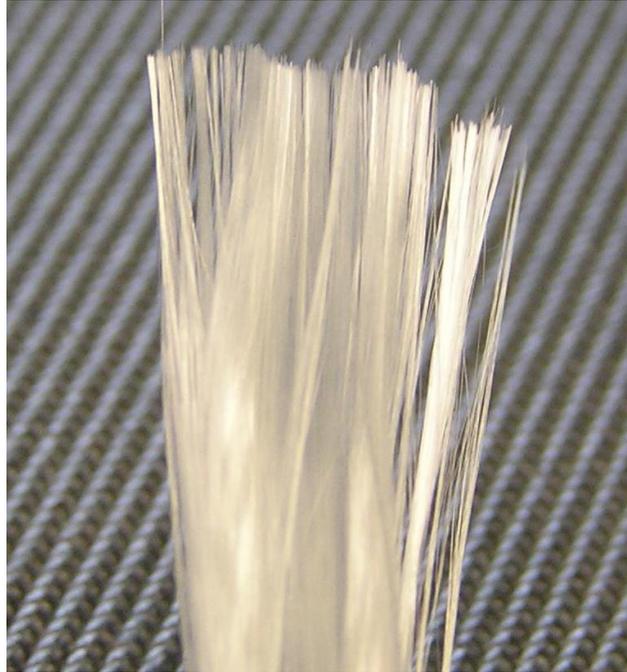


Figura 2.1.- Filamentos de vidrio constitutivos de la lana o fibra de vidrio.

Fuente:

https://es.wikipedia.org/wiki/Fibra_de_vidrio#/media/File:Glasfaser_Roving.jpg

2.2.1.2. Fibras de roca.

Las lanas o fibras rocosas se obtienen a partir de rocas de tipo volcánico, basálticas o semejantes. De igual manera que la fibra de vidrio, la fibra de roca se elabora a partir de filamentos, solo que, en este caso, los filamentos tienen una composición de tipo alúmina-silicato.

El material se obtiene al emular la acción de un volcán de manera artificial, es decir, el mineral se calienta por encima de los 1600 °C, ya en estado semilíquido, la “lava” se vierte en contenedores centrífugos los cuales bajo la acción de la fuerza centrífuga convierte la lava en filamentos. La combinación de mineral y “material ligante” da paso a la obtención de fibras entrelazadas que atrapan el aire entre sus fibras.

Estos materiales tienen la ventaja de ser *imputrescibles* e incombustibles y su punto de fusión supera los 1200 °C. Su conductividad térmica promedia los $0.32 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$ a $0.44 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$. Algunas otras ventajas de este material son:

- Facilidad y rapidez de instalación.
- Seguridad en caso de incendio (es ignífugo).
- Químicamente inerte.
- No hidrófilo ni higroscópico.
- Respetuoso con el medio ambiente.



Figura 2.2.- Lana mineral.

Fuente:

https://es.wikipedia.org/wiki/Lana_de_roca#/media/File:Rockwool_4lbs_per_ft3_fibrex5.jpg

2.2.1.3. Fibra cerámica.

La fibra cerámica, es un producto elaborado a base de silicatos y óxido de aluminio (Alúmina y sílice). Debido a la composición de sus filamentos, las lanas cerámicas son una excelente opción de aislamiento contra altas temperaturas, donde no es posible el uso de una fibra de vidrio o una fibra de roca, debido a su buen desempeño como material refractario, es un material de uso común en industria pesada, es decir, aislante de hornos, chimeneas, calderas, etc. Este material tiene una conductividad térmica de $0.04 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$ a $0.18 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$.

La fibra o lana cerámica es un material idóneo para aislamiento de altas temperaturas de hasta 1430 °C y la fabricación del material permite una amplia

diversidad de densidades de hasta 350 Kg/m^3 . La versatilidad de este material no se limita solo al tipo de densidad, así pues, el material puede tener presentaciones que van desde colchas de fibra cerámica, papel cerámico, hasta piezas preformadas o bloques sólidos.



Figura 2.3. - Presentaciones comerciales de fibra cerámica.

Fuente: <http://file.youboy.com/a/101/31/22/1/10217731.jpg>

2.2.2. Aislantes térmicos granulares.

Se denomina aislamiento térmico granular a aquel material compuesto por nódulos que contienen un gas aislante (por lo general aire). El gas puede transitar en cada nódulo del material. A continuación, doy una breve reseña de los materiales de mayor uso comercial:

2.2.2.1. Vermiculita expandida.

Material mineral constituido principalmente por silicatos de aluminio, hierro y magnesio del grupo de las micas. La vermiculita¹⁵ es un material versátil en la industria en general, sus usos van desde ser sustrato en cultivos hidropónicos, elaboración de hormigones de baja densidad, elemento filtrante, hasta ser elemento promotor de viscosidad en aceites automotrices.

Cuando el mineral es sometido a un aumento de temperatura, llega a una fase conocida como **exfoliación**, dando por resultado un producto liviano agregado para construcción (su densidad oscila entre los 60 y 140 kg/m³). Su propiedad de aislamiento térmico y acústico se potencia en la fase de exfoliación. Presenta una conductividad térmica de $0.053 \frac{W}{(m)(^{\circ}K)}$ (medida a una temperatura de 20° C). Las paredes brillantes de las laminillas de mica de vermiculita forman una multitud de pantallas que reflejan y dispersan la energía calorífica transmitida por radiación y convierten a dicho material en el aislante ideal para altas temperaturas. La vermiculita tiene un rango de acción que va desde los 200° a los 1200° C. Además de su importancia como aislante térmico, tiene las siguientes propiedades:

- Aislante acústico: Al incidir una onda sonora sobre las laminillas del mineral, estas se difuminan en múltiples direcciones y son absorbidas por la estructura microscópica de burbujas de aire atrapado en el mineral. Es

¹⁵ La fórmula química de este material es Mg,Ca (0.7%), Mg,Fe,Al (6.0 %), [(Al,Si)₈O₂₀] (OH) (4.8%) H₂O. Mineral descubierto en 1824 en Millbury, Massachusetts

por esta razón que es un excelente aislamiento acústico en un amplio rango de frecuencias.

- Resistencia al fuego: la vermiculita tiene un punto de fusión de aproximadamente 1370° C y se reblandece a partir de los 1250° C. Es un mineral incombustible y químicamente muy estable a altas temperaturas, esta propiedad lo hace una excelente opción como ***pared cortafuegos***.
- Inalterabilidad: La vermiculita es inmune a la degradación por ***intemperismo***. Es un mineral químicamente estable y neutro (pH de 7.2). No tiene reacción en presencia del acero o el hierro.

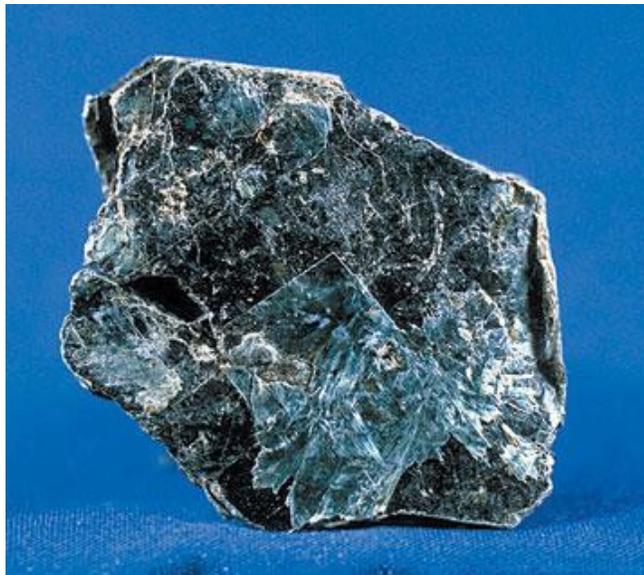


Figura 2.4. - Veta de vermiculita.

Fuente:

<https://es.wikipedia.org/wiki/Vermiculita#/media/File:VermiculiteUSGOV.jpg>

2.2.2.2. Perlita expandida.

Material derivado del mineral comúnmente conocido como Perlita¹⁶. Cuando el mineral alcanza un rango de temperatura que va de 850 – 900 °C, el mineral se ablanda y posteriormente el contenido hídrico del mineral se vaporiza, provocando una expansión y aumento de volumen que va de 7 hasta 16 veces el volumen original. El mineral de Perlita originalmente tiene una densidad de 1100 kg/m³, posterior a la expansión del material, su densidad oscila entre 30 a 50 kg/m³.

El bajo coste, aunado a su buen desempeño como aislante térmico, hacen de la Perlita expandida una opción comercial bastante atractiva para la industria en general, pues su aplicación va desde altas, medias y bajas temperaturas, incluso, es una opción aplicable en industria criogénica. Otras ventajas de la perlita expandida son:

- Es un material químicamente inerte, es decir, no reacciona ante la presencia de otro químico y tampoco produce algún daño al contacto con la piel. Material atóxico.
- Es un buen agente anticorrosivo gracias a su alto contenido de silicatos. Es un material que puede ser instalado a la intemperie por lo que no genera un costo adicional por recubrimientos. Adicionalmente, este material es de fácil aplicación. Se puede adaptar a la forma diseño donde será aplicado.

¹⁶ La Perlita es un vidrio volcánico amorfo con un contenido de agua relativamente elevado. Su composición química es Fe₂O₃ (3,4%), de Na₂O (0,2-3,8%), K₂O (0,2-5,0%), TiO₂ (0,9%), MgO (0,6%) e CaO (0,6%).¹

- Es un mineral incombustible y químicamente muy estable a altas temperaturas, esta propiedad lo hace una excelente opción como ***pared cortafuegos***.
- A pesar de su baja densidad en presencia de humedad, el material no se degrada. No exige mayor consumo de energía para secar la humedad contenida, una vez seco, el material consigue su desempeño inicial.



Figura 2.5. - Perlita expandida.

Fuente: <http://www.perlite.info/hbk/0034410.htm>

2.2.2.3. Silicato de calcio.

Material hidrosilicato al cual se le pueden incorporar fibras para aumentar su resistencia. Este material ha sido diseñado para aplicaciones industriales y comerciales en las que se tenga como requerimiento:

- Alta resistencia a la compresión.
- Alta resistencia a la flexión.
- Resistencia al intemperismo.
- Resistencia a la combustibilidad.

El silicato de calcio puede ser preformado en formas de bloque o tubería, por lo que se convierte en una buena opción para aplicaciones sobre formas irregulares. Al ser un material rígido tiene una conductividad térmica uniforme en su estructura, unos $0.8 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$ a una temperatura de 200°C.

Otras ventajas del silicato de calcio son:

- Es un material inocuo para la salud humana.
- Dada su origen mineral, es una buena contención a flama directa.
- Su máxima temperatura de acción llega a los 815 °C.
- Es un material que se puede preformar.
- Excelente desempeño bajo condiciones de uso rudo (resistencia a la compresión de 690 [kPa] y 450 [kPa] de resistencia a la flexión).



Figura 2.6. - Presentaciones diversas del silicato de calcio.

Fuente: <http://abrasives-materials.com/4-5-calcium-silicate-insulation-products/180907>

2.2.2.4. Tierra Diatomácea.

Roca sedimentaria, fina y **cenagosa**, compuesta por criaturas marinas unicelulares fosilizadas conocidas como diatomeas¹⁷. Las diatomeas, dejan a su paso una diminuta estructura ósea (pared celular) compuesta principalmente por silicatos. (Dióxidos de silicio) llamada fústula.

¹⁷ Las diatomeas (taxón Diatomea, Diatomeae o Bacillariophyceae sensu lato) son algas marinas unicelulares constituyentes de uno de los grupos más comunes de fitoplancton.

Con el paso del tiempo, las diatomeas se han sedimentado en rocas conocidas como “diatomita”, es fácil de pulverizar, dando como resultado “tierra diatomácea”. El material pulverizado tiene un uso comercial e industrial muy diversificado, sus aplicaciones van desde filtros para agua hasta elementos de coagulación de la sangre.

Como material térmico aislante, la tierra diatomácea es moldeada en ladrillos o losetas. Mediante el moldeo de la tierra, el aglutinamiento de los sedimentos permite que entre los intersticios que quedan libres se aloje aire, esto potencia las propiedades aislantes del material y lo posiciona en un rango de conductividad térmica de $0.126 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$

Otras ventajas del silicato de calcio son:

- Alta resistencia a la temperatura.
- Resistencia a la combustibilidad.
- Baja densidad.



Figura 2.7. - Tierra diatomácea pulverizada y ladrillos.

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/refractory-diatomite-diatomaceous-earth-powder-for-insulating-brick-60638120745.html>

2.2.2.5. Silicato de sodio.

El silicato de sodio (Na_2SiO_3) es un compuesto, también se conoce como “vidrio o cristal soluble”. Este compuesto puede presentarse en fase líquida o sólida. En estado natural, no presenta color y es soluble en agua.

Al igual que los materiales antes mencionados, el silicato sódico tiene diferentes aplicaciones comerciales e industriales, algunos de sus usos más sobresalientes son:

- En tratamiento de aguas.
- Como adhesivo.

- En la industria química como gel de sílice.
- Aditivo para fabricación de cementos.
- En la fabricación de tintes y pigmentos.

Gracias a su alta resistencia a la temperatura, su resistencia mecánica y su inflamabilidad, el silicato sódico es de uso común en la fabricación de refractarios, crisoles y recubrimiento de hornos industriales. La conductividad térmica del silicato de sodio oscila alrededor de los $0.61 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$.

De igual manera que otros materiales granulares, este material tiene la propiedad de preformarse en piezas solidas para recubrimiento de tuberías, o como losetas.



Figura 2.8. - Silicato de sodio preformado.

Fuente: <http://www.aislamientosmarchetti.com.mx/productos.html>

2.2.3. Aislantes térmicos celulares.

Un material “celular” está constituido por celdas unitarias separadas entre sí, ya sea abiertas o cerradas, las cuales atrapan y contienen un gas de baja conductividad térmica en su interior (por lo general aire). El material constitutivo de las células puede variar en su composición. A continuación, se da una breve reseña de los aislantes térmicos granulares de mayor uso en la industria.

2.2.3.1. Vidrio espumado.

Material inorgánico formado por un vidrio puro expandido a base de calor y posteriormente enfriado para dar pie a una estructura de celda principalmente cerrada. Los intersticios cerrados del material aprisionan gases inertes e inofensivos que potencian la acción aislante del material.

La tendencia al vacío sumado al coeficiente de transferencia de calor del vidrio y el gas inerte, dan como resultado un material con excelentes bondades aislantes. El vacío en cada intersticio del material se puede equiparar a un recipiente térmico de uso doméstico (botella de Dewar o termo)¹⁸ que impide la pérdida de calor o bien el paso de este hacia el interior, de esta misma manera el material es una red de minúsculos recipientes que se conjugan para dar un resultado de alto nivel.

¹⁸ El frasco Dewar es un recipiente inventado en 1892 por James Dewar, el cual consiste en dos frascos uno dentro del otro y unidos por el cuello, el espacio vacante entre ellos es evacuado casi en su totalidad de aire creando un casi vacío que reduce significativamente el intercambio calórico de las superficies de los frascos y del exterior, ya sea por convección o conducción.

De igual manera que muchos otros aislamientos inorgánicos, el vidrio expandido es un material inerte en presencia de sustancias químicas, por lo que no se degrada, estas características lo hacen un material de uso ideal en la industria química. En condiciones de intemperismo, el material presenta alta resistencia. Es un material incombustible y su conductividad térmica oscila alrededor de los $0.045 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$. Posee una densidad promedio de $20 \frac{Kg}{m^3}$.



Figura 2.9. - Loza de vidrio espumado con recubrimiento cerámico.

Fuente:

https://www.google.com.mx/search?q=vidrio+espumado&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=28R_uJOoWcRvEM%253A%252CjjTVliQhLodQsM%252C&usq=_0AoSjvUGs4uKPjzQ5_9RN9SwPk4%3D&sa=X&ved=0ahUKEwi3IP2boLTbAhWhq1kKHcyyC7IQ9QEIPTAD#imgrc=J_wPPoq2FsG3NM

2.2.3.2. Poliestireno.

Polímero de gran versatilidad derivado del estireno, se obtiene mediante la polimerización de este último compuesto. Es un compuesto que forma cavidades que aprisionan aire dentro de cada celda (como se ha mencionado previamente, el aire es un aislante natural muy eficaz), por lo que se potencia su capacidad de aislamiento térmico. Existen cuatro clasificaciones de poliuretano, conocidas como:

- Poliestireno de alto impacto.
- Poliestireno de uso general.
- Poliestireno extruido.
- Poliestireno expandido¹⁹.

De las anteriores clasificaciones, las dos últimas son utilizadas como aislantes térmicos, gracias a sus propiedades mecánicas y sobre todo a su bajo coeficiente de conductividad, el cual oscila en los $0.03 \frac{W}{(m)(^{\circ}K)}$.

A pesar de sus propiedades de aislamiento térmico, el Poliestireno es un material no recomendado para ser expuesto a altas temperaturas, la razón de esta desventaja se basa en la estructura molecular del polímero (reblandece cuando alcanza un rango de temperatura de 85 °C a 105 °C), en presencia de calor se deforman y son capaces de tomar distintas conformaciones²⁰. La capacidad de

¹⁹ Más común mente conocido como unicelel o por su nombre comercial en inglés Styrofoam, registrado por la Dow Chemical Company.

²⁰ Es un material fácilmente inflamable.

deformación en presencia de calor permite que el material sea fácilmente moldeado por calentamiento.

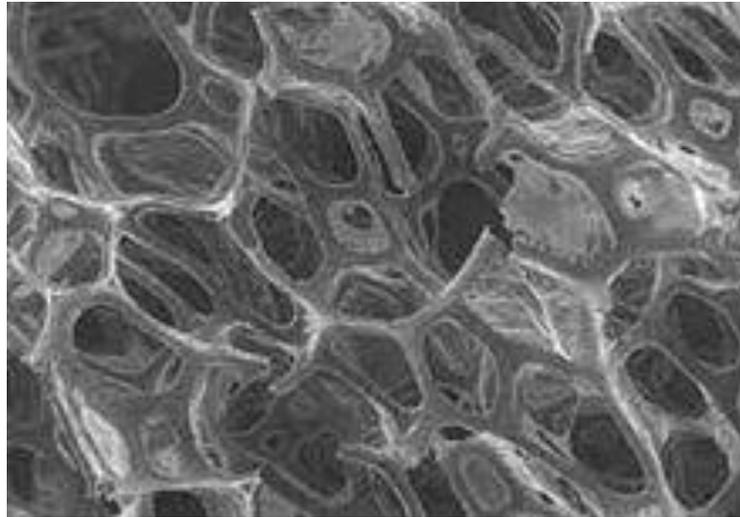


Figura 2.10. - Arreglo molecular del Poliestireno.

Fuente: <https://es.wikipedia.org/wiki/Poliestireno>.

El Poliestireno expandido quizá es el material aislante de mayor uso en el mercado gracias a las siguientes propiedades:

- No constituye un sustrato para desarrollo de microorganismos.
- No se pudre.
- No se enmohece.
- Material muy ligero.
- Absorbe impactos y vibración.

Esta variante de Poliestireno es de uso común en la industria de la construcción, puesto que, la relación costo-beneficio, es bastante alta en comparación con

otros materiales de aislamiento térmico celular. Dependiendo del proceso de fabricación, el coeficiente térmico del poliuretano expandido abarca un rango entre $0,033 \frac{W}{(m)(^{\circ}K)}$ y $0,036 \frac{W}{(m)(^{\circ}K)}$, en general presenta una baja absorción de agua, unas prestaciones mecánicas muy altas (entre 200 kPa y 700 kPa) y una densidad alrededor de los $33 \frac{Kg}{m^3}$.

Este material es vulnerable ante la presencia de algunos solventes como la acetona, MEK, tolueno, benceno, etc.



Figura 2.11. - Fragmento de Poliestireno expandido.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Poliestireno_expandido

2.2.3.3. Poliuretano.

El poliuretano es un polímero extensamente versátil, actualmente es utilizado técnicamente en cualquier ámbito industrial y en productos de consumo básico. De este material se obtiene derivados como elastómeros, adhesivos, pinturas,

fibras, etc. Generalmente este polímero se distingue por su uso para conformar espumas.

La forma de obtenerlos es haciendo reaccionar diisocianatos²¹ con dialcoholes²². Como consecuencia de sus celdas cerradas que encapsulan aire, el Poliuretano brinda algunas otras bondades ideales para aplicar en soluciones de aislamiento térmico. Adicionalmente, el material posee cualidades tales como:

- Rigidez estructural.
- Adherencia a superficies mixtas.
- Funge como aislamiento sonoro.
- Amortigua vibraciones.
- No absorbe humedad ambiental.

En la figura 2.11 se muestran láminas de poliuretano de distintos tamaños de celdas, cabe resaltar que la selección del tamaño de celda de un poliuretano está en función de su aplicación o requerimiento. Una inadecuada selección acarrearía problemas como: intrusión u acumulación de polvo, filtraciones de ruido, incluso de agua y paso de calor.

²¹ “Los diisocianatos son unos compuestos químicos caracterizados por tener dos grupos funcionales isocianato (-N=C=O) como parte de su estructura química, y que se caracteriza por su alta reactividad frente a nucleófilos. Los diisocianatos reaccionan con polioles para formar poliuretanos y con las diaminas para formar poliureas”. (fuente <https://es.wikipedia.org/wiki/Diisocianato>)

²² Molécula con dos grupos funcionales de alcohol (grupo Hidroxilo -OH).



Figura 2.12. - Laminas de poliuretano.

Fuente: <http://ensoinnovation.com/project/valorizacion-de-espumas-de-poliuretano/>

2.2.3.4. Poliisocianurato.

La espuma de Poliisocianurato es un compuesto derivado del poliuretano, con diversas características, propiedades mecánicas y apariencia, esta clase de polímeros tienen estructuras similares a otros derivados del poliuretano a consecuencia de la relación de mezclas entre sus componentes, poliol²³ e isocianato²⁴ cuya proporción está en el orden de 100:150 a diferencia del poliuretano, cuya proporción ronda el orden de 100:100. La diferencia más notoria entre ambos compuestos es que el Poliisocianurato presenta una mayor resistencia a la flama y a la temperatura

²³ “Los polioles son alcoholes poli hídricos con varios grupos hidroxilo. La fórmula química general es $C_nH_{2n+2}O_n$.

²⁴ “El isocianato es un grupo químico con fórmula $-N=C=O$ (Nitrógeno, Carbono, Oxígeno).

El Poliisocianurato presenta un coeficiente de conductividad térmica de 0.023

$$\frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$$

En la siguiente figura (2.13), es clara la diferencia entre la espuma de Poliisocianurato y las espumas de Poliuretano mostradas en la figura 2.12. en comparación con los poliuretanos, el Poliisocianurato es un material con mayor rigidez y densidad, lo que lo convierte en un material aislante de mayor desempeño.

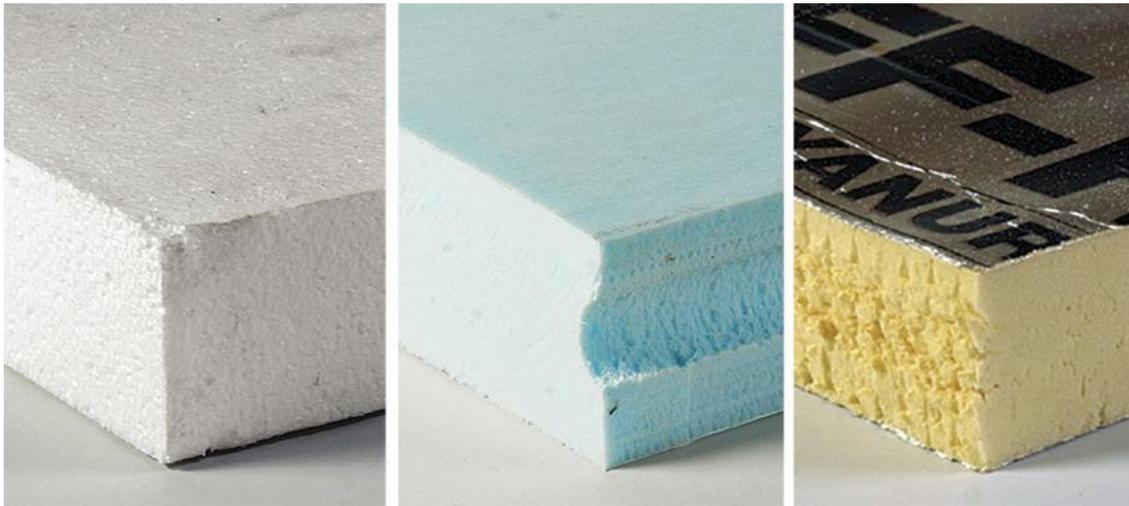


Figura 2.13. - Paneles de Poliisocianurato.

Fuente:

<http://www.greenbuildingadvisor.com/sites/default/files/Rigid%20foam%20options%204.jpg>

2.2.4. Aislantes térmicos de origen orgánico.

Mucho antes de que se descubrieran y perfeccionaran técnicas de aislamiento con materiales minerales o sintéticos, los productos aislantes de origen orgánico, ya sea vegetal o animal, proveyeron al ser humano de confort y protección contra el medio en el que este se desenvolvía.

Actualmente en la industria de la construcción (como en muchas otras) se ha dado un auge por el uso de materiales renovables y de bajo impacto al medio ambiente. Es aquí donde reaparecen en escena los aislamientos orgánicos, debido a que son materiales que requieren poca incorporación de energía para su procesamiento, son materiales fáciles de reciclar (como la celulosa que se obtienen del reciclaje de fibras vegetales) y tienen un bajo impacto ambiental en comparación con los materiales de origen mineral o sintético.

Como, en cualquier caso, los aislamientos orgánicos también deben ser sometidos a un estudio de factibilidad, puesto que es necesario considerar costes y de ser necesario, amortizar su costo e impacto biológico durante el periodo de vida y utilidad del aislamiento. Se dice que estos materiales tienen un bajo impacto ambiental, sin embargo, esta cláusula es válida si se consideran factores como:

- *El reciclaje:* Hay materiales obtenidos del reciclaje de fibras vegetales o animales tales como la celulosa y las guatas de lana de oveja que proveen buena resistencia térmica. Durante su procesamiento se utilizan aglutinantes y agua para darle una forma final de tipo “colchoneta”. En

este rubro si el proceso de aglutinar las fibras demanda un gasto energético alto y sustancias aglutinantes toxicas, el sentido de Eco-térmico del material se verá mermado.

- *Potencial de suministro:* para minimizar el impacto ecológico en el procesamiento de un aislamiento orgánico, se debería considerar la abundancia en el medio, un ejemplo tangible es el corcho, que tiene un ciclo de crecimiento de entre 8 y 10 años, su tiempo de crecimiento y maduración es más prolongado en comparación con la paja²⁵. Es por esto que es más factible el uso de la paja. Una alta demanda de corcho propicia una sobre explotación y un impacto ecológico considerable en las plantaciones de corcho.
- *Proximidad y abastecimiento:* En el actual panorama en que los mercados están cada vez más globalizados, el transporte de materiales desde el punto de producción hasta la planta de procesamiento o hasta el cliente final, impactan negativamente en la huella ecológica de un material aparentemente de bajo impacto ecológico. Es imprescindible mencionar que, debido a su baja densidad, los aislamientos orgánicos ocupan un mayor volumen, por tal motivo requieren de un mayor consumo de recursos de transportación para una misma masa de material que un aislante sintético o mineral.

²⁵ Según el Consejo Internacional de Cereales, la producción mundial estimada para 2019 es de 2 706 millones de toneladas incluyendo todos los cereales. Se estima que la cantidad de paja cosechada corresponde entre el 60-80% de la masa de cereales, lo que equivale a más de mil millones de toneladas de paja disponibles cada año.

- *Transformación y Aditivos:* Desde la obtención de la materia prima hasta la condición final de uso hay un proceso durante el cual las fibras orgánicas son sometidas a etapas que consumirán determinada cantidad de energía y agua. A la energía utilizada en la transformación también se le conoce como energía gris o energía incorporada. La energía incorporada está ligada al proceso de transformación y por consiguiente a las emisiones de CO₂. A manera de ejemplificar esta disyuntiva, se puede comprar el proceso de obtención de la paja y lana de oveja. En el primer caso, la paja solamente se cosecha y se empaqueta, quedando lista para su uso, en caso de la lana de oveja, el proceso se extiende, debe ser lavada, enjuagada, secada, tratada y transformada. Un proceso de transformación más extenso conlleva a un material con un mayor impacto ambiental.

De manera general, los aislamientos orgánicos tienen un bajo coeficiente de conductividad térmica, es decir, funcionan como un buen aislamiento térmico, sin embargo, dada su naturaleza, es necesario hacer un estudio profundo puesto que, pueden sufrir degradación temprana, ser factor de ignición en aplicaciones de altas temperaturas o simplemente causar un impacto visual que denote una baja calidad del material. Su aplicación debe tomar en consideración factores como:

- Humedad del ambiente.
- Diseño de la superficie que va a ser aislada.
- Temperatura máxima de exposición.

La siguiente tabla muestra de manera general la capacidad de aislamiento de algunas fibras orgánicas. Es evidente su buen desempeño como aislamiento térmico.

Tabla 2.1. - Conductividad térmica de materiales de fibras orgánicas.

Fuente: http://t3e.info/pdf/Publications/2011_CIER_Cuba_Aislamientos.pdf

Material	λ (W/mK)
Celulosa	0,038-0.040
	0,041-0.050
	0,040
	0,045
Paja	0,037
	0,045
	0,053-0,061
Lino	0,037
	0,035-0,075
	0,042
Lino y Cáñamo	0,033-0,060
Cáñamo	0,040-0,094
Lana de oveja	0,040
	0,034-0,067

A continuación, se enlista una serie de aislamientos de origen orgánico junto con una breve reseña de sus propiedades térmicas. Estos materiales tienen una buena aceptación en algunas aplicaciones industriales:

- Corcho: Se extrae de la corteza del alcornoque y ha sido usado desde la antigüedad. Por lo general se elaboran paneles con corcho triturado y hervido en agua, por lo general no requiere aglutinante para poder compactar el corcho, basta con presión y vapor para unir los fragmentos

de corcho. El 45% de la fibra se compone de **suberina** y es un material que contiene bajas cantidades de agua (aproximadamente el 8%). Las anteriores condiciones le dan al corcho la propiedad de ser imputrescible, lo protegen de microorganismos y hongos. Otras propiedades relevantes del corcho son:

- Densidad: $110 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$. normal, $100-160 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (en placa), $65-150 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (del árbol).
 - k (Coeficiente de conductividad térmica): $0,039 \frac{\text{W}}{(\text{m})(^{\circ}\text{K})}$. (puede variar de 0.04 a $0.055 \frac{\text{W}}{(\text{m})(^{\circ}\text{K})}$).
 - μ (resistividad al paso de vapor de agua)²⁶ 30 a $75 \text{ MN} \cdot \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$ (del árbol), $92 \text{ MN} \cdot \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$ (en placa aglomerada).
 - c : (calor específico)²⁷ de 1600 a $1800 \frac{\text{J}}{(\text{Kg})(\text{K})}$.
- Algodón: Las fibras de algodón se mezclan con minerales como boro para aumentar sus propiedades de aislamiento sonoro. Además del boro, también se suele mezclar con fibras textiles como la mezclilla, a manera de obtener colchonetas de aislamiento. Una gran desventaja del algodón que le resta protagonismo como material ecológico es su calidad de material

²⁶ Recordemos que en las cavidades de un material aislante se atrapa un gas (normalmente aire) que potencializa la propiedad de aislar calor, si el material absorbe vapor de agua en lugar de guardar aire, el material disminuirá sus propiedades como aislante.

combustible. Para aminorar el estado de combustible, se le añaden químicos retardante y aunado a esto, la producción de la fibra de manera indiscriminada tiene un impacto ecológico significativo.

- Densidad: 25-40 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$. (lana soplada), 20-60 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$. (lana en manta).
- k : 0,04 $\frac{\text{W}}{(\text{m})(^\circ\text{K})}$.
- μ : 1 a 2 MN $\cdot \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$.
- c : 840 $\frac{\text{J}}{(\text{Kg})(\text{K})}$.

- Lino: El lino como aislante, es práctico y flexible, reforzando todo tipo de aislamientos en construcción. Actúa como regulador natural de la humedad, esto gracias a su capacidad de absorber y desprender humedad en hasta un 15% de su peso. Es un excelente aislante térmico y acústico. Es el material idóneo para el aislamiento de construcciones.

- Densidad: 40-50 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$. (materia prima), 20-40 $\frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$. (en manta)
- k : 0,04-0,05 $\frac{\text{W}}{(\text{m})(^\circ\text{K})}$.
- μ 1 a 2 MN $\cdot \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$.
- C : (aproximadamente) 1500 $\frac{\text{J}}{(\text{Kg})(\text{K})}$.

- Pellas de cereales: Este recurso es un derivado de los sobrantes de cosechas agrícolas. Los cereales son una opción viable para la obtención

de aislantes por su alta producción a nivel mundial. A través de un proceso de compactación y compresión, las fibras se unen en bloques que posteriormente se emplean principalmente en la industria de la construcción. Al igual que el algodón, este aislamiento es un potencial combustible, por lo que su aplicación, al igual que otras fibras, se recomiendan para temperaturas moderadas.

- Densidad: $105-115 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (densidad aparente).
 - $k: 0,05 \frac{\text{w}}{(\text{m})(^{\circ}\text{K})}$.
 - $\mu 1 \text{ MN} \cdot \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$.
 - $c: \frac{J}{(\text{Kg})(\text{K})}$.
- Cáñamo: Las características más destacadas de esta fibra natural son sus propiedades: 1) térmicas, pues presenta una conductividad de $0,041 \frac{\text{w}}{(\text{m})(^{\circ}\text{K})}$, 2) acústicas, con una absorción aproximada de 0.7 decibeles y 3) bioclimáticas, gracias a su amortiguamiento térmico permite que las temperaturas exteriores al atravesar el material se suavicen. Es un material 100% reciclable. Incluso tras la demolición de un edificio, puede molerse y ser reutilizado para la producción de bloques de fibra o morteros aislantes.

Durante su producción, la planta no necesita ser fumigada ni el uso de abonos químicos debido a que no contiene proteínas por la ausencia de nutrientes en su tallo. Otra característica muy sobresaliente es que retiene

CO₂ durante todo su ciclo de vida útil, con ello se consiguen edificios con valores de emisión de CO₂ neutros, o bien negativos.

La retención de CO₂ por parte de aislamientos a base de cáñamo contribuye a reducir la contaminación ambiental, factor muy importante a nivel global, se atribuyen el 40% de las emisiones de CO₂ a la atmósfera a la industria de la construcción.

De acuerdo con Cannabric, empresa española referente en la producción de materiales a base de cáñamo, el índice GWP (acrónimo del inglés *Global Warming Potential*) para derivados de cáñamo presentan valores negativos de GWP (-0,624 kg CO₂), es decir, que el uso de cáñamo como aislamiento reduce la emisión de CO₂ a la atmosfera, tomando en cuenta su producción y transporte.

- Densidad: $150 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (raspaduras), $20-40 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (en manta).
 - $k: 0,04 \frac{\text{w}}{(\text{m})(^{\circ}\text{K})}$.
 - $\mu: 1 \text{ a } 2 \text{ MN} \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$.
 - $c: 1500 \frac{\text{J}}{(\text{Kg})(\text{K})}$.
- Celulosa: Se trata de residuos de papel que se reciclan en forma de aislante para el uso en de muros con cámara de aire. Se utiliza suelta o inyectada como espuma aplicada con manguera (en este caso su conductividad

asciende a $0,06 \frac{W}{(m)(^{\circ}K)}$. Aunque requiere ser tratada con sustancias químicas para evitar el moho y protegerla del fuego, tiene muy buenas propiedades aislantes, es ligera y requiere poca energía para su fabricación.

- Densidad: $30-60 \frac{Kg}{m^3}$
 - $k: 0,039 \frac{W}{(m)(^{\circ}K)}$.
 - $\mu: 1 \text{ a } 2 \text{ MN} \cdot \frac{s}{(g)(m)}$.
 - $c: 1900 \frac{J}{(Kg)(K)}$.
- Fibra de madera: Los aglomerados son recursos a los que se ha llegado por motivos económicos y ecológicos, para evitar los problemas del comportamiento natural de la madera maciza. Los paneles de fibras de madera suelen aprovechar residuos del procesamiento de la madera o pequeñas ramas, por lo que serían compatibles con un aprovechamiento respetuoso del bosque. Otra ventaja es que pueden fabricarse en dimensiones mayores a las que se pueden obtener en maderas aserradas. Están hechos de residuos y fibras no utilizados de los troncos de los árboles, a los que se añaden resinas y se prensan formando tableros de distintos espesores. Existen paneles con fibras gruesas de madera resinosa aglomeradas con yeso o cemento blanco o paneles ligeros de pequeñas fibras. Por desgracia, su capacidad de aislamiento no es demasiado alta.

- Densidad: $30-60 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (soplado), $130-250 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (en manta).
- Coeficiente de conductividad térmica: $0.14 - 0.17 \frac{\text{W}}{(\text{m})(^\circ\text{K})}$.
- μ - 5 a 10 $\text{MN} \cdot \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$.
- c (calor específico) aproximadamente $1600-2100 \frac{\text{J}}{(\text{Kg})(\text{K})}$.

Lana de madera: Es un material conformado por fibras de madera aglutinadas generalmente con cemento Portland, dando como resultado paneles rígidos. La aplicación de este material es bastante amplia y va desde la construcción hasta la hechura de muebles. Dada su buena capacidad de aislamiento, es un material muy común en la industria de la construcción.

- Densidad: $350-600 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (normal), $60-300 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (múltiples capas).
- Coeficiente de conductividad térmica: $0.09 - 0.1 \frac{\text{W}}{(\text{m})(^\circ\text{K})}$.
- μ - 2 a 5 $\text{MN} \cdot \frac{\text{s}}{(\text{g})(\text{m})}$.
- c (calor específico) aproximadamente $2100 \frac{\text{J}}{(\text{Kg})(\text{K})}$.

Cocos: De igual manera que las fibras de madera, las fibras de coco son materiales que se compactan para formar bloques o paneles, los cuales, se deben de someter a químicos retardante de calor y tratamientos para alargar su vida útil.

- Densidad: $70-110 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$.

- Coeficiente de conductividad térmica: $0,045-0,05 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$.
- μ - 1 a 2 MN $\cdot \frac{s}{(g)(m)}$.
- c (calor específico) aproximadamente $1500 \frac{J}{(Kg)(K)}$.

Lana natural de oveja: Es la versión natural y ecológica de los aislamientos lanosos. A diferencia de la lana de roca o la lana de vidrio, la lana de oveja se obtiene de forma natural y no necesita de un horneado de altas temperaturas. Es muy resistente y un potente regulador de humedad, hecho que contribuye enormemente en el confort. Apenas se utiliza en construcción en comparación con las lanas de vidrio o roca. Como en los casos anteriores se vende en forma de manta, de paneles aglomerados y en forma de copos.

- Densidad: $20-80 \frac{Kg}{m^3}$.
- Coeficiente de conductividad térmica: $0,043 \frac{w}{(m)(^{\circ}K)}$.
- μ de 1 a 2 $\cdot \frac{s}{(g)(m)}$.
- c (calor específico) aproximadamente $1000 \frac{J}{(Kg)(K)}$.

Es importante resaltar que varios de los materiales previamente mencionados se obtienen por medio del reciclaje de otros productos, es decir, se extiende la vida útil de un material a través de la transformación de materiales orgánicos en aislamientos. Gracias a la aplicación de materiales orgánicos como aislamiento,

se reduce el impacto ecológico con la reducción de energías incorporadas para su obtención.

Por otro lado, es tema de consideración que el potencial aislante de materiales como madera, corcho o celulosa es mucho menor en comparativa con materiales como las fibras de vidrio, mismas que requieren de un gran potencial energético para su obtención.

Entonces, ¿Los materiales aislantes orgánicos son una buena opción para el aislamiento industrial? Podemos concluir que sí, siempre y cuando la aplicación de aislamiento sea de un rango de temperatura moderado, aunado a esto, es necesario hacer una evaluación costo-beneficio tomando en cuenta parámetros como: el rango de temperatura a aislar, las condiciones en las que se pretende aplicar y el balance energético del material entre la energía consumida durante su fabricación y la energía ahorrada durante su vida útil.

Estas consideraciones hacen de los aislamientos orgánicos una buena opción para la industria de la construcción, sin embargo, para aplicaciones automotrices solo materiales como la lana de oveja mezclada o el cáñamo podrían ser materiales aplicados a esta industria. A futuro, es posible que los procesos de transformación de aislamientos ecológicos potencialicen su capacidad de aislamiento, así como su vulnerabilidad al medio y de esta manera faciliten la incursión de estos en industrias más exigentes como la automotriz.

2.3. Conductividad térmica en los materiales aislantes.

En el capítulo uno se analizó de manera general el concepto de conductividad térmica, dentro de la conceptualización de conductividad es importante denotar la ecuación 1.1 que condensa matemáticamente el comportamiento de cualquier material en cuanto al paso de calor a través de su estructura.

El paso de la energía calórica a través de un material aislante se dificulta exponencialmente dependiendo del coeficiente de conductividad del material y a los siguientes tres factores:

- *Arreglo molecular:* En materiales amorfos, el contacto molecular se dificulta por lo que la excitación molecular tarda en afectar a las partículas más aisladas del material. El arreglo molecular de un material influye directamente en la determinación del factor de conductividad térmica (K).
- *Cantidad de aire atrapado en el cuerpo del material:* El aire es el gas con el coeficiente de conductividad más bajo que se conoce, además de su disponibilidad en el ambiente, este gas es factor fundamental en la conformación de materiales de aislamiento de uso común. El aire atrapado en las cavidades de un material incrementa la resistencia al paso de calor a través de este.
- *Espesor del material:* A mayor cantidad de material entre una fuente de calor y el entorno, mayor será la distancia recorrida por el calor a través de

una capa de material de espesor “n” (la vibración molecular tarda más tiempo en alcanzar el extremo opuesto a la fuente de calor).

Un estudio de aislamiento térmico debe tomar en consideración las anteriores relaciones, debido a que el uso de aislamiento esta intrínsecamente sujeto a la cantidad de calor que se pretende retener o rechazar. En aplicaciones en las que es necesario aislar grandes cantidades de calor, no basta con tener un material con un coeficiente de conducción bajo, en casos como este se recurre al incremento de espesor de la barrera aislante o a la alternancia entre capas de aislante y espacios al vacío.

Por otro lado, en aplicaciones simples con usos de temperaturas bajas se hace uso de materiales con un factor conductivo menor y espesores menores. Hay casos prácticos en los que una hoja de material reflectante es suficiente para el control del paso de calor, claro ejemplo son los paneles reflectantes usados en los parabrisas de un auto, el panel impide el paso de radiación calórica al ser reflectada hacia fuera del carro.

2.1. Resistencia térmica.

La resistencia térmica de un material es el comportamiento recíproco al flujo de calor a través de una pared (material). Se define como producto del espesor (e) del material entre su conductividad térmica (k). En términos simples es oposición presentada por el material al paso de calor a través de su estructura. La ecuación que define a esta propiedad de los materiales es la siguiente:

$$R = \frac{e}{k} \quad \text{Ec. 2.1}$$

Usualmente se equipará el comportamiento de la resistencia térmica con la resistencia dentro de un circuito eléctrico, incluso matemáticamente se expresan de manera similar (ley de Ohm). Para explicar el flujo de calor, a menudo se le compara con un circuito eléctrico. En esta analogía, la razón de transferencia (k) correspondería a la corriente térmica, la resistencia térmica (R) es a fin a la resistencia eléctrica y el espesor (e) sería la caída de voltaje.

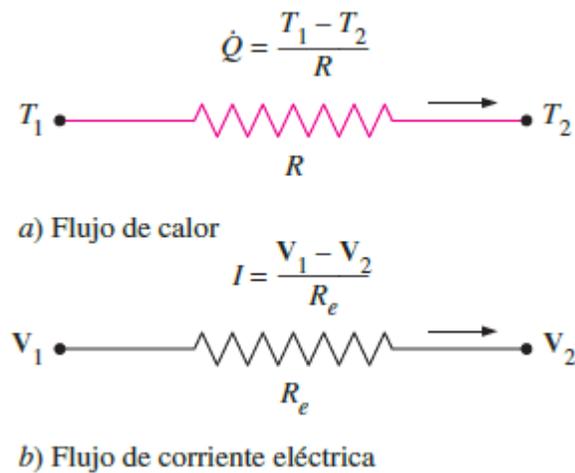


Figura 2.13. - Comparación entre flujo de calor (a) y Flujo de corriente eléctrica (b).

Fuente: Y. A. Çengel, & A. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa

Fundamentos y Aplicaciones (pág. 3). México: McGraw Hill. Página 137.

La ecuación 2.1 se refiere concretamente a un caso de resistencia térmica en un mecanismo de conducción. Así como se tiene una ecuación que explica una

resistencia térmica para la conducción, así mismo, cada mecanismo de transferencia de calor, en este caso de resistencia térmica, también tienen una expresión matemática que define cada una de las resistencias que, de igual manera, son el recíproco de la ecuación de transferencia de calor de cada mecanismo.

Partiendo de la ecuación de enfriamiento para la transferencia de calor convección:

$$Q_{conv} = \frac{T_s - T_\infty}{R_{conv}} \quad \text{Ec. 2.3}$$

De esta ecuación se desprende la resistencia convectiva de la superficie, que en esencia es el producto de la unidad dividida entre el coeficiente de transferencia de calor por convección multiplicado por el área.

$$R_{conv} = \frac{1}{h_{conv}A} \quad \text{Ec. 2.4}$$

De igual manera que para la convección, la resistencia térmica a la radiación es el recíproco del flujo de calor por radiación. El flujo de calor de la radiación es la razón de transferencia de calor entre una superficie de emisividad (ϵ) y un área definida (A) que se encuentra a una temperatura dada (T_s) con respecto a la temperatura promedio de una superficie circundante (T_{alred}).

$$Q_{rad} = \frac{T_s - T_{alred}}{R_{rad}} \quad \text{Ec. 2.5}$$

La resistencia térmica en un mecanismo de conducción por radiación se expresa como el producto de la unidad, dividido entre el coeficiente de transferencia por radiación multiplicada por el área de acción.

$$R_{rad} = \frac{1}{h_{rad}A} \quad \text{Ec. 2.4}$$

Nótese que esta última ecuación en apariencia es la misma ecuación que la resistencia térmica a la convección, sin embargo, la variación radica en el coeficiente de conductividad. El coeficiente de conductividad térmica por radiación se define de la siguiente manera:

$$h_{rad} = \frac{Q_{rad}}{A(T_s - T_{alred})} = \varepsilon\sigma (T_s^2 + T_{alred}^2)(T_s - T_{alred}) \quad \text{Ec. 2.5}$$

Resistencia térmica es un concepto fácil de interpretar en una selección de materiales de aislamiento, pues un valor alto de resistencia térmica denota una mayor capacidad de impedir el paso de calor. En la imagen 2. 15 se esquematiza cada concepto relevante para un material aislante, Conductividad, Resistencia y Transmitancia térmicas. Entre estos tres conceptos es posible que se genere confusión. La figura nos provee de una breve descripción de cada concepto, así como de una ilustración para cada concepto.

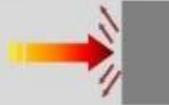
	Conductividad Térmica	Resistencia térmica	Transmitancia térmica
Definición	Propiedad física de los materiales que mide su capacidad de conducción de calor, es decir, mide cómo de fácil es el paso de calor a través de ellos.	Propiedad física de los materiales que mide su capacidad de oponerse a un flujo de calor. La resistencia térmica total R_t de un elemento constructivo es la suma de las resistencias térmicas superficiales y la resistencia térmica de las diferentes capas que lo componen.	Propiedad física de los materiales que mide la cantidad de energía que atraviesa un elemento en una unidad de tiempo, es decir, mide el calor que se pierde o se gana a través de un elemento.
Concepto			

Figura 2.14. - Definición y concepto de Conductividad térmica, Resistencia y Transmitancia térmicas.

Fuente: <https://ovacen.com/wp-content/uploads/2017/11/propiedades-materiales-en-rehabilitacion.jpg>

2.2. Factor R.

Se conoce como factor R o valor R a la resistencia térmica por unidad de superficie (área) de un material. Es una unidad de medida característica de los materiales aislantes y es un valor inverso al coeficiente de conductividad por unidad de área. Esta unidad de resistividad térmica se expresa como el producto del espesor (e) dividido entre el coeficiente de conductividad térmica del material (k) multiplicado por el área (A), matemáticamente se define en la siguiente ecuación:

$$R_t = \frac{e}{(k)(A)} \quad \text{Ec. 2.1}$$

En el sistema internacional los valores R están dados en $\frac{(^{\circ}K)(m^2)}{W}$, las unidades en sistema inglés están dadas en $\frac{(^{\circ}F)(ft^2)}{BTU}$.

El aumento de grosor de una barrera de calor es directamente proporcional su resistencia térmica e inversamente proporcional al flujo de calor a través del material, es decir el doble de espesor se traduce en la mitad de flujo de calor y el doble de valor R. Por ejemplo, duplicando el espesor de fibra de vidrio será el doble de su valor R, de $2,0 \frac{(m^2)(^{\circ}C)}{W}$ para 110 mm de espesor, hasta $4,0 \frac{(m^2)(^{\circ}C)}{W}$ para 220 mm de espesor.

El concepto de valor R para un material aislante, es un concepto muy similar a la resistencia térmica, sin embargo, el valor R implica el concepto de unidad de área, mientras que el concepto de resistencia térmica no.

3. ANTECEDENTES HISTÓRICOS Y PRINCIPIOS DE FUNCIONAMIENTO DE LAS MÁQUINAS DE COMBUSTIÓN INTERNA.

El origen de los actuales motores de combustión interna se remonta de manera abrupta hasta la invención de sus componentes más básicos como la rueda, la palanca, el eje, la polea, la cuña he incluso el tornillo. Estos componentes básicos fueron concebidos hace miles de años, actualmente la gran gama de maquinaria moderna son simplemente la combinación de estos elementos de manera ordenada y repetida.

Durante casi tres siglos, las máquinas de combustión interna has sido la evolución expresa de la ingeniería y la técnica, durante este tiempo se ha perfeccionado su funcionamiento, marcando drásticamente la forma de vida y el desarrollo económico de las sociedades. Como es bien sabido, la necesidad de transformar la energía suministrada por la naturaleza es el principal objetivo por el que la humanidad ha desarrollado maquinaria que ayuda a dicha transformación de, en este caso, fuentes de energía química con potencial calórico en energía mecánica, a su vez, esta energía se transforma en trabajo mediante mecanismos de transmisión. Ahora bien, la concepción de las actuales máquinas ha pasado por el desarrollo y conjugación de diversas disciplinas, por citar un ejemplo, el desarrollo de la metalurgia, iniciado hacia el año 500 A.C. en la India, china y el Imperio Romano, los avances científicos de Galileo en materias como Física e Ingeniería, la Termodinámica, petroquímica y más recientemente la electrónica y transferencia de calor.

Se tiene registro de que una de las primeras máquinas complejas desarrolladas por la humanidad fueron los molinos de viento, con los que se comenzó a aprovechar el trabajo mecánico a una mayor escala y fue uno de los primeros intentos por usar y aprovechar la energía de fuentes naturales. He aquí el principal objetivo de una máquina en general a lo largo del tiempo, aprovechar y transformar la energía disponible en el entorno para obtener un trabajo.

3.1.1. El motor a vapor.

La primera máquina térmica de la cual se tiene registro fue concebida hacia el siglo I antes de cristo por Herón de Alejandría, quien construyo una bola metálica conectada a un recipiente a través de un par de tubos que a su vez conectaban con un depósito inferior en donde el agua era calentada. La bola tenía dos codos conectados a ella con direcciones opuestas, cuando el depósito de agua se calentaba el vapor subía por los tubos conectores e inundaba la bola hueca y salía por los codos opuestos lo que impulsaba a la bola a rotar sobre su eje. La máquina fue llamada “eolípila”, el ancestro de las máquinas de vapor.

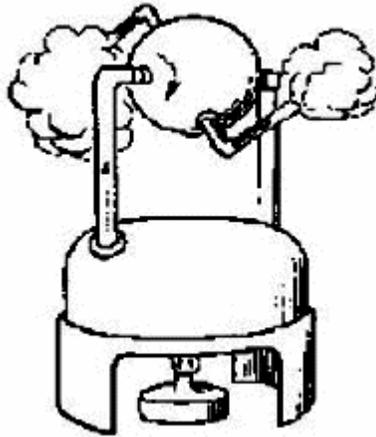


Figura. 3.1. - Eolípila de Herón de Alejandría.

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/15932105/Breve-historia-de-los-motores-de-combustion>

Después del registro histórico de la “eolípila de Herón” se tiene un gran “vacío tecnológico”, en el cual, la obtención de energía se cubría mediante el uso de la fuerza humana, posteriormente con la domesticación de animales de carga se dio un mayor progreso en cuestiones de movilidad y carga. Posteriormente la obtención de energía mecánica se dio con el aprovechamiento de caudales energéticos como cauces de ríos y corrientes de aire. Es hasta el siglo XVII (1678) en el que se irrumpe tecnológicamente hablando con la invención lo que se conoce hoy como el primer motor de combustión propulsado por pistón, construido por Abbé Jean de Hautefeuille, quien propuso el uso de pólvora como combustible para mover un pistón dentro de un cilindro y de esta manera obtener un trabajo. Un par de años después físico holandés Jan Christian Huygens y Denis Papín retoman el concepto del uso de pólvora como combustible, construyendo un motor de este tipo, sin embargo, la dificultad para controlar la respetabilidad de las explosiones, así como la carga de la pólvora hicieron que se

abandonara este proyecto. El logro más significativo de este proyecto fue el descubrimiento del vacío provocado en la cámara del motor. Cuando el cilindro terminaba su carrera inicial (después de la explosión de la pólvora) los gases residuales encontraban una lumbrera por la que salían del cilindro, al enfriarse y con la ayuda de la presión atmosférica, se creaba un vacío del lado opuesto de la explosión y, por consiguiente, el pistón era empujado (o jalado) hacia el lado contrario.

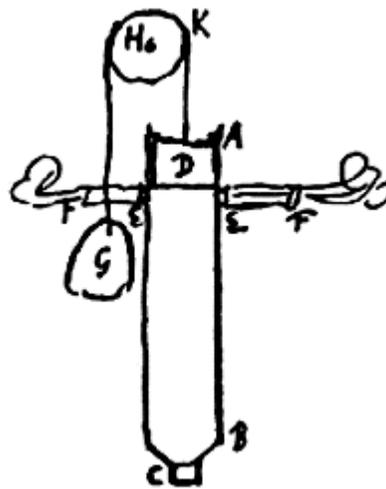


Figura 3.2. - Esquema del experimento de Christian Huygens y Denis Papín. En la parte inferior (C) del cilindro (B) se coloca la carga de pólvora que empuja el pistón (D). Las lumbreras (E) permiten el desahogo de los gases.

A partir del experimento del cilindro y la pólvora de Christian Huygens y Denis Papín, se pudo deducir que el vacío producido dentro del cilindro que contiene al pistón se podría incrementar la eficiencia de un motor (la eficiencia del pistón). Este primer paso sentó las bases para que en 1690 Papín crea un nuevo motor a vapor mejorado que consistía en un cilindro vertical conectado a una barra y

asociado a un recipiente con agua en el fondo, mismo que era calentado. Al producirse la expansión del vapor, este empujaba al cilindro hasta el límite máximo de su carrera donde se fijaba, ya estando en esta posición, el cilindro se refrigeraba produciéndose de esta manera una condensación del vapor y por ende, un vacío dentro del cilindro, en ese momento, el cilindro era liberado, con ayuda de la presión atmosférica y el vacío, el pistón realizaba la carrera descendente²⁸.

El trabajo que elaboró Papín resulto ser la base para que en 1698 Thomas Savery diseñara y construyera un motor sin embolo al que llamo “the friend miner’s” (el amigo de los mineros), el objetivo de este motor era la extracción del agua que se acumulaba en las minas de carbón en Inglaterra. El motor Savery se conectaba a un pozo dentro de la mina, a su vez, el motor era conectado mediante una tubería a una cámara que admitía el vapor proveniente de una caldera. Para conseguir que hubiese vacío en la cámara, esta se enfriaba abruptamente con agua fría, lo cual provocaba que el vacío succionara el agua del pozo haciéndola pasar por una válvula antirretorno, posteriormente, se admitía nuevamente vapor en la cámara y la presión de esta segunda “bocanada de vapor” empujaba al líquido a pasar por una segunda válvula antirretorno.

La eficiencia del motor Savery estaba ligada a la presión del vapor que entraba en la cámara, además de este punto, las válvulas de refrigeración y admisión de

²⁸ El motor experimental de Papín realmente no causo un gran impacto en términos industriales y de eficiencia. Este motor realizaba tres funciones, caldera, condensador y transmisor de movimiento. A pesar de que Papín fue precursor en el uso práctico del vacío, ya desde 1606 Giovanni Battista della Porta ya había realizado postulados en los que se describía el fenómeno del vacío y se predecía el resultado experimental.

vapor eran manuales. Se estima que el motor Savery tenía una eficiencia térmica de apenas un 0.5% y una repetitividad de 5 ciclos por minuto.

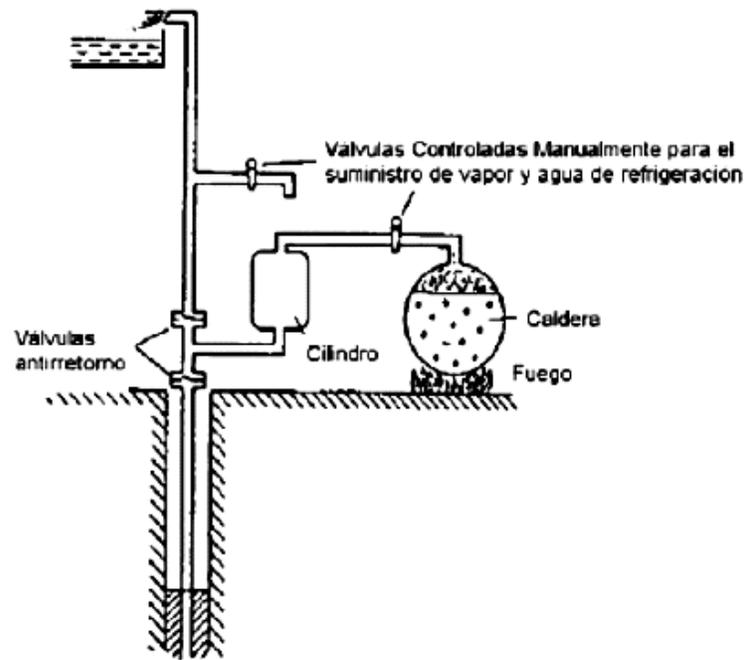


Figura 3.3. - Esquema del motor Savery (1690).

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/15932105/Breve-historia-de-los-motores-de-combustion>.

La bomba desarrollada por Savery tuvo una relativa aceptación comercial desde su nacimiento hasta el año 1712, año en el que la industria se vio mejorada abruptamente por la máquina de vapor desarrollada por Thomas Newcomen. Ha sido tan trascendental la incursión del motor a vapor, que fue usado por la humanidad por aproximadamente 150 años. Este motor fue precursor del motor de combustión interna.

Se cuenta que debido a una fuga accidental de agua hacia dentro del cilindro se produjo una condensación de vapor extremadamente rápida, lo cual provocó que el pistón rompiera el fondo del cilindro, así como en la parte superior de la caldera. Derivado de este accidente Newcomen descubrió que una cantidad de agua fría pulverizada y aire inyectada dentro del cilindro provocaba una condensación de vapor rápida. El vapor generado en una caldera situada por debajo del cilindro generaba la presión necesaria para que el cilindro se elevara hasta su punto máximo dentro del cilindro, en este momento el chorro de agua se inyectaba en la parte inferior del cilindro y por efecto de la condensación y la presión atmosférica en la parte superior del cilindro, se producía la carrera del pistón hacía la parte inferior del cilindro.



Figura 3.4. – Esquema del motor de vapor de Thomas Newcomen.

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/15932105/Breve-historia-de-los-motores-de-combustion>.

En el motor Newcomen introdujo componentes revolucionarios de entre los cuales cabe destacar:

- Un balancín para la transmisión de movimiento lineal del pistón.
- Válvula de expulsión de aire del balancín.
- Implementación de anillos de cuero alrededor del pistón para evitar fugas, convirtiéndose esta mejora en el primer sello hidráulico de la historia.

Las mejoras antes mencionadas conllevaron a que el desempeño de este motor se incrementara en el número de ciclos por minuto a 16, 6 caballos de potencia y un rendimiento térmico del 0.5%.

Con el paso de los años, las mejoras se hicieron notables en la mejoría de las máquinas a vapor, en 1769 James Watt obtuvo una patente por agregar un condensador por separado a la máquina de Newcomen, por lo que incremento en 4 veces la eficiencia del motor en comparación con su antecesor desarrollado por Newcomen. El motor a vapor se popularizo tanto, que en el año de 1807 R. Fulton introdujo el motor a vapor en la navegación, años más tarde en 1825 G Stephenson hizo lo propio para propulsar una locomotora. El desarrollo paulatino del motor de vapor desembocó en el desarrollo de la turbina a vapor a finales del siglo XIX, la cual reemplazo al motor a vapor en el campo de las grandes potencias, aunque. Con la aparición de los motores de combustión interna, las turbinas a vapor se fueron relegando a sectores más específicos mientras que a mediados del siglo XX la máquina a vapor desapareció por completo del sector industrial.

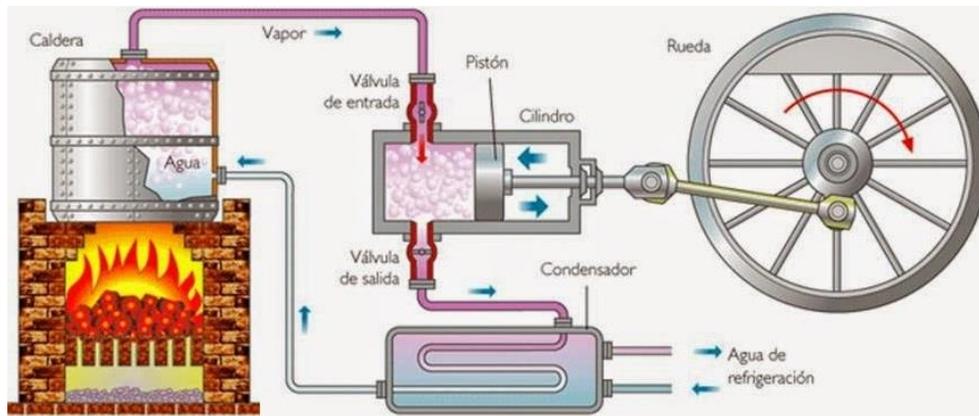


Figura 3.5.- Funcionamiento de un motor de vapor.

Fuente: <https://como-funciona.co/una-máquina-de-vapor/>

3.1.2. Motores de aire caliente.

A pesar de que en el siglo XIX el motor propulsado por vapor ya era bastante popular, hubo algunos intentos por emplear el aire como fluido propulsor. En 1759 Henry Wood registró una patente en la que describía el uso de aire caliente inyectado dentro de un cilindro de trabajo, el cual, empujaría el pistón por obra de la expansión del aire caliente, después de enfriarlo, la presión atmosférica empujaría el pistón de vuelta hacia su posición inicial. Aunque Henry Wood nunca llevó a la práctica su postulado, este fue la base para que en 1816 El reverendo Robert Stirling patentara el primer motor propulsado por aire caliente.

A consecuencia de los accidentes ocasionados por la explosión de la caldera de un motor a vapor el reverendo Stirling se dio a la tarea de buscar un medio más seguro para la obtención de energía mecánica. El motor Stirling, como se le llegó a denominar a estos motores, constituyó un avance bastante revolucionario para

el tiempo en que se realizó, ya que el conocimiento termodinámico y de transferencia de calor no era tan basto.

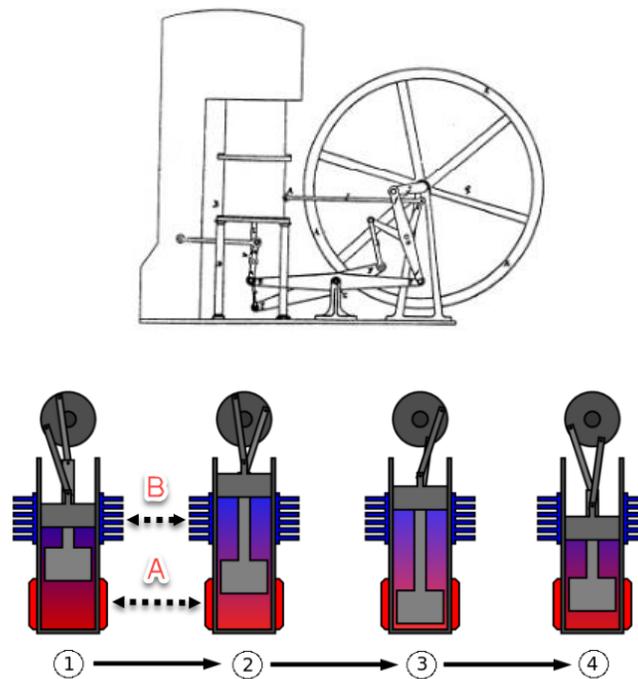


Figura 3.6. - Esquema del Motor desarrollado por Robert Stirling y su funcionamiento básico.

Fuente: <https://es.scribd.com/doc/15932105/Breve-historia-de-los-motores-de-combustion>.

El funcionamiento del motor Stirling está basado en la expansión y compresión del aire (u otro gas) a consecuencia de ser calentarlo y en comparación con un motor de combustión interna, térmicamente hablando, el motor Stirling es más eficiente al grado de poder alcanzar 50% de eficiencia. En la figura 3.6 se esquematiza el funcionamiento del pistón del motor Stirling. El arreglo mostrado

se le conoce como motor Beta, el cual consiste en un cilindro con dos cámaras en las cuales corren dos pistones simultáneamente, de esta manera, proporcionan la inercia a la rueda volante para dar continuidad a la repetición del ciclo. El ciclo lo podemos desglosar de la siguiente manera:

1. El aire de la cámara A se expande a consecuencia de su incremento de temperatura, esto impulsa al pistón de potencia a moverse hacia arriba. El aire queda atrapado en la cámara B entre los dos pistones y comienza a enfriarse.
2. El pistón de potencia comienza a bajar a consecuencia de la inercia de la rueda volante, así mismo el pistón “hueco” comienza su descenso inyectando aire frío en la cámara A.
3. El pistón de potencia comprime al máximo el aire contenido en la cámara A, el cual comienza a expandir su volumen nuevamente empujando el pistón hacia arriba. El Pistón hueco continúa su descenso.
4. En este paso el pistón de potencia realiza la carrera hacia el punto máximo superior desplazando nuevamente el volumen de aire hacia la cámara B, el ciclo se repite.

El motor Stirling es el único motor capaz de aproximarse al rendimiento máximo teórico, conocido como rendimiento Carnot²⁹ desafortunadamente, la potencia generada por un motor Stirling es inversamente proporcional a su eficiencia obtenida, es decir, entre mayor sea la eficiencia del motor, menor será la

²⁹ En 1824 el físico francés Nicolas Leonard Sadi Carnot, postuló un ciclo ideal reversible de cuatro etapas, con lo cual se lograría una maquina ideal con la mayor eficiencia térmica posible. Actualmente es bien sabido que alcanzar el ciclo Carnot es técnicamente imposible.

potencia alcanzada por este. Aunado a esto, la eficiencia del motor se ve afectada por las temperaturas ajenas al motor (clima), derivando de esta manera en una mayor eficiencia en climas fríos y un bajo rendimiento en climas cálidos.

De igual manera que la máquina de vapor, el motor de aire caliente se vio eclipsado por la aparición, desarrollo y mejora de los motores de combustión interna. Sin embargo, continúan siendo objeto de estudio e interés debido en gran manera a sus bajas emisiones y el poco ruido que provocan.

3.1.3. La evolución del motor de combustión interna.

Desde su comienzo, el motor de combustión interna fue resultado de la mezcla de conocimiento de múltiples inventores en diferentes regiones de Europa, por esta razón es técnicamente imposible atribuir su desarrollo a una sola persona. Se tiene registro que, en el siglo XVII, el holandés Jean Christian Huygens desarrollo el primer “motor” impulsado por la quema de un combustible dentro de un cilindro, Jean Christian y su asistente Denis Papín desarrollan un cilindro con un pistón dentro de él, en el cual, en un extremo se realizaba la detonación controlada de pólvora, lo que provocaba que el pistón se moviera hacia el lado contrario del cilindro. La idea en si es el principio básico mediante el cual funciona un motor actual, sin embargo, la idea no prevaleció debido a que se dificultaba tener continuidad y control en las explosiones en los extremos del cilindro.

En 1799 Philippe. Lebon construyo un motor al cual denominó como “motor de combustión interna”, básicamente retomo el principio de funcionamiento que el

experimento de Jean Christian Huygens, a diferencia de este, Lebon hizo estallar una mezcla de gas y aire dentro del cilindro. En este caso, ya no se tuvo un perfeccionamiento del motor debido a la muerte de Lebon. Años más tarde el inglés W. Cecil se basa en el trabajo de Lebon y comienza a experimentar con una mezcla de aire e hidrogeno como combustible. Cecil nota que su motor es capaz de transmitir la energía mecánica obtenida de su motor a un eje haciéndolo girar a una velocidad de 60 rpm. A consecuencia de los escasos conocimientos en termodinámica, estos dos últimos ejemplos no pudieron ser perfeccionados ni industrializados, sin embargo, es en este punto donde Cecil y Lebon descubrieron que de la quema de un combustible dentro de un cilindro se podía conseguir un trabajo. Sus desarrollos sientan las bases para la construcción de motores más eficientes.

En 1838 el inglés William Barnett, basado en el trabajo de W. Cecil, descubre que para obtener una mayor cantidad de energía mecánica es necesario comprimir la mezcla de aire y combustible dentro del cilindro antes de hacerla estallar, a partir de este momento se pone de manifiesto que la compresión de la mezcla de aire y combustible están estrechamente relacionados con la potencia de un motor.

A pesar de que Barnett, Cecil y Lebon fracasaron en la puesta en marcha de sus respectivos motores, sembraron el entusiasmo entre inventores e ingenieros de la época para así, pasar de un simple experimento lúdico, a una máquina que permitiera obtener un trabajo a partir de la combustión de mezclas de aire y combustible. En el año de 1860 un nuevo intento por desarrollar un motor de combustión interna por parte del francés Jean J. Lenoir, puso de manifiesto la

importancia y sobre todo la necesidad de controlar la temperatura a la que un motor trabaja. Lenoir fracasó debido a que no pudo lograr que su motor trabajara a una temperatura moderada, esto provocaba sobrecalentamiento del motor, aunado a esto, Lenoir no consiguió aprovechar la parte del calor generado dentro de la cámara de combustión del pistón, aunado a esto, la carrera de expansión de los gases y la ausencia de compresión previa de la mezcla hicieron que el Motor de Lenoir fuese de baja eficiencia.

Dentro de la evolución histórica y tecnológica de los motores de combustión interna, no todos los progresos notables fueron producto de la construcción tangible de un motor, en 1862 otro francés llamado Alphonse Beau de Rochas presentó la patente de un motor basado en un ciclo de 4 tiempos, sin embargo, nunca construyó dicho motor. El postulado que Rochas hacía en su patente fue lo suficientemente convincente para “demostrar en el papel” la efectividad de su motor, de la patente de Rochas se debe de resaltar los siguientes puntos:

1. Se debe de alcanzar la mayor compresión de la mezcla antes de hacerla estallar dentro del cilindro.
2. Conseguir la mayor expansión de gases dentro del cilindro para poder obtener la mayor aceleración del pistón.
3. La fuerza de empuje del pistón debe de ser lo suficientemente poderosa para lograr que el pistón y el eje se mantengan en movimiento aun después de consumada la explosión.

Los puntos anteriores describen de una sutil forma el funcionamiento de un motor de cuatro tiempos actual, también conocido como de “ciclo Otto”. Esto es porque Rochas también indico el principio de operación deseado para un motor de combustión interna de cuatro tiempos:

1. Admisión durante la carrera de bajada del pistón.
2. Compresión durante la subida del pistón.
3. Encendido de la carga en las cercanías del punto muerto superior, seguida por una expansión durante la carrera de bajada del pistón.
4. Escape durante la siguiente carrera de subida del pistón.

Los alemanes llamados Nicolaus August Otto y Eugen Langen³⁰, tomaron como base la patente de Rochas para la construcción y puesta en marcha de su motor de cuatro tiempos, mismo que presentaron en la exposición de Paris de 1867.

3.1.3.1. El motor de 4 tiempos

En 1867 Nicolas Augusto Otto y Eugen Langen hacen realidad la patente de Alphonse Beau de Rochas al construir un motor de combustión interna que en menos de diez años se transformaría en el motor a cuatro tiempos o “ciclo Otto”. A pesar de que su patente fue anulada en su natal Alemania bajo el argumento de estar basada en los trabajos de Rochas, esto no impidió que el motor a cuatro

³⁰ El motor de cuatro tiempos actualmente conocido como de ciclo Otto, fue un desarrollo conjunto entre Carl Eugen Langen, empresario, ingeniero e inventor alemán (octubre. 9, 1833, Cologn - oct. 2, 1895, Cologn) y Nicolas A. Otto. Eugen Langen colaboró de manera notable durante el resto de su vida con Nicolas Otto, a pesar de esto, la historia lo ha puesto tras bambalinas y el motor a cuatro tiempos lleva el nombre de su colaborador Nicolas A. Otto.

tiempos (descrito teóricamente en las patentes de Rochas) terminara denominándose ciclo Otto. El motor de cuatro tiempos se popularizo rápidamente en el ámbito industrial pues sirvió como medio de propulsión de vehículos, trenes, barcos, aviones, generadores etc. En los años posteriores a 1876 las ventas del motor Otto se contabilizaban por encima de las 50,000 unidades.

En 1884 la patente Otto – Langen se hizo pública, y un año después mejoras como el sistema de ignición de la mezcla por magneto y el carburador de superficie para vaporizar combustible se añadían al mejoramiento del motor. Ya para el año de 1883 Gottlieb Daimler construyo el primer motor de cuatro tiempos que propulso a un vehículo, este motor giraba a unas 900 revoluciones por minuto. La era del automovilismo había comenzado.

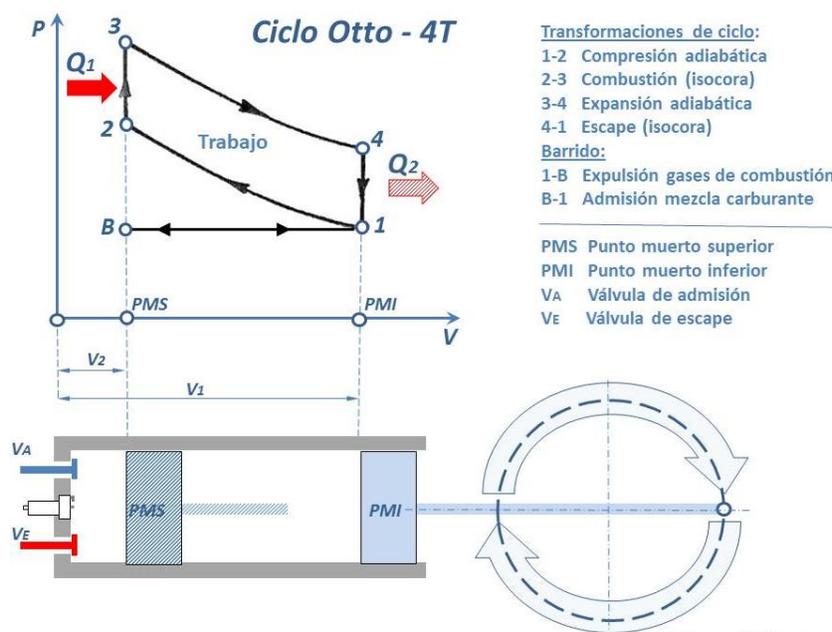


Figura 3.7. - Ciclo Otto.

Fuente: <https://termomachete.blogspot.com.ar/>

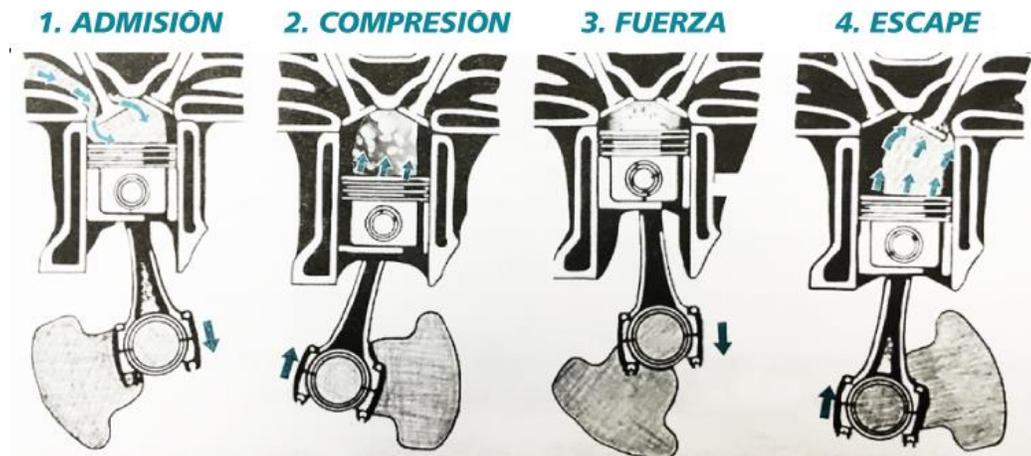


Figura 3.8. - Esquema del ciclo Otto

Fuente: <http://tumotor.mx/wp-content/uploads/2016/03/ciclo-otto.jpg>
<http://tumotor.mx/wp-content/uploads/2016/03/ciclo-otto.jpg>

3.1.3.2. El motor de dos tiempos.

Un motor de dos tiempos es en esencia, un motor de ciclo Otto, la singularidad que presenta este tipo de motor, es el número de carreras que le toma al pistón lograr los 4 pasos del ciclo Otto (admisión, compresión, explosión y escape).

En otras palabras, de las cuatro carreras de un pistón en un motor de cuatro tiempos, solamente una de ellas provee de potencia al cigüeñal, es decir, solo en el momento de la explosión de la mezcla se logra dar potencial al pistón y por consiguiente al cigüeñal. En aras de poder crear un motor que pudiese conseguir una mayor eficiencia en el año de 1878 el inglés Sir Dugald Clerk, basado en el trabajo de Nicolas Otto, construyó el primer motor de combustión interna de dos tiempos. El funcionamiento de este se explica de la siguiente manera:

- 1. Admisión-Compresión:** El pistón se mueve hacia arriba desde su punto muerto inferior, al momento de ocurrir esto, crea un vacío en el Carter y abre una cavidad de admisión en el cilindro por donde entra la mezcla de aire y combustible, mientras tanto el pistón comprime la mezcla previa en el punto muerto superior
- 2. Explosión y Escape:** La mezcla explota en el punto muerto superior del cilindro y empuja el pistón hacia abajo. En el cárter la mezcla es pre comprimida por el pistón descendente, en el momento preciso el pistón deja libre el canal de escape o lumbrera de escape en el cilindro por donde salen los gases de escape de este y poco después la lumbrera de carga que conecta el cárter con el cilindro, por lo que la mezcla pre comprimida pasa por este llenando el cilindro y expulsando los últimos restos de los gases de escape quedando preparado el cilindro para un nuevo ciclo de dos tiempos.

Como se puede notar, el pistón realiza el trabajo que harían las válvulas y árbol de levas en un motor de cuatro tiempos. A pesar de que es un motor que proporciona un mayor par-motor (comparado con un motor de cuatro tiempos), su aplicación se ha limitado a motocicletas, motores fuera de borda.

La desventaja de este, motor es que requiere un mayor consumo de combustible, además de que son motores que arrojan mayor cantidad de emisiones contaminantes.

3.1.3.3. El motor Diésel.

En el año de 1858 en Paris Francia, nació Rudolf Christian Karl Diésel, ingeniero mecánico de profesión e inventor del ya bien conocido motor Diésel nombrado así en su honor.

De padres alemanes, Diésel paso sus primeros años de vida en Paris, de donde fue expulsado tiempo después junto con sus padres y hermanos a causa de la guerra Franco-Prusiana in 1870, por lo que se vieron forzados a volver a Alemania, donde posteriormente cursaría sus estudios de ingeniería y daría sus primeros pasos en el desarrollo y estudio de máquinas térmicas.

Al principio de su carrera, Diésel fungió como aprendiz de Carl Von Linden, con quien desarrollo máquinas frigoríficas antes de dar paso al desarrollo de su Motor de combustión interna. En el año de 1890, después de regresar de Paris, comenzó en Berlín el estudio y desarrollo de un motor que se acercara al ciclo ideal de Carnot y que, de esta manera, pudiese superar el ya para entonces célebre motor Otto. Dos años después de iniciar su estudio, publicó su postulado "*teoría de*". En su postulado, Diésel detalla el funcionamiento de su motor. Un año más tarde, Diésel comienza con el desarrollo y primeras pruebas de su motor en asociación con la compañía MAN. El primer motor construido por la dupla Diésel-MAN fue un rotundo fracaso, pues el motor termino por explotar y casi le cuesta la vida a Diésel, posteriormente, en 1897, Rudolf Diésel logra la construcción y puesta en marcha de un motor Diésel con potencia de 25 caballos de vapor y un rendimiento cercano al 10%, un año más tarde, logró incrementar la eficiencia del motor Diésel en un 18% sobrepasando por mucho a los motores de ciclo

Otto³¹. Desde aquel momento, el motor Diésel incursiono en la industria hasta nuestros días.

A diferencia del motor Otto, el motor Diésel no comprime una mezcla de aire y combustible, primeramente, se comprime aire dentro de la cámara hasta que este aumente su temperatura, posteriormente el combustible (con partículas mayores a la gasolina) es inyectado en la cámara de combustión y a consecuencia de la alta temperatura del aire comprimido, el combustible se inflama expandiendo los gases a través del cilindro.

En la figura 3.9 se esquematiza el ciclo teórico compuesto por adiabáticas (1-2) y (3-4), una isobárica (2-3) y una isócora (4-1). El ciclo Diesel sigue 4 tiempos de manera similar que un motor Otto:

- 1. Admisión:** Ingresar aire al cilindro por la válvula de admisión.
- 2. Compresión:** Con las válvulas de admisión y escape cerradas, el aire se comprime por el pistón adiabáticamente. Como resultado, el aire aumenta su temperatura alrededor de los 800°C.
- 3. Expansión:** En el punto muerto superior, a temperatura constante, se inyecta el combustible pulverizado a la carga de aire comprimido. A consecuencia del incremento de temperatura del aire, se produce la ignición del combustible provocando la expansión de gases de la mezcla

³¹ En aquellos años, la relación de compresión de un motor a gasolina era de 6/1, es decir, el volumen de la mezcla de aire y gasolina se comprimía 6 veces con relación de su volumen original, mientras que en los motores Diésel, ya se conseguía una relación de compresión de 20:1. Con estos valores, quedo constatada la eficiencia de un motor Diésel por encima del motor Otto de cuatro tiempos.

combustible-aire comprimido. En este momento se produce un trabajo gracias al desplazamiento del pistón hacia su punto muerto inferior.

4. **Escape:** Se abren las válvulas de escape. En este momento se produce una caída de presión dentro del cilindro con un subsecuente enfriamiento isórico. El pistón inicia su carrera de vuelta al punto muerto superior expulsando los gases de la cámara. En el momento en el que el pistón alcanza nuevamente el punto muerto superior, se abren las válvulas de admisión y el ciclo comienza nuevamente.

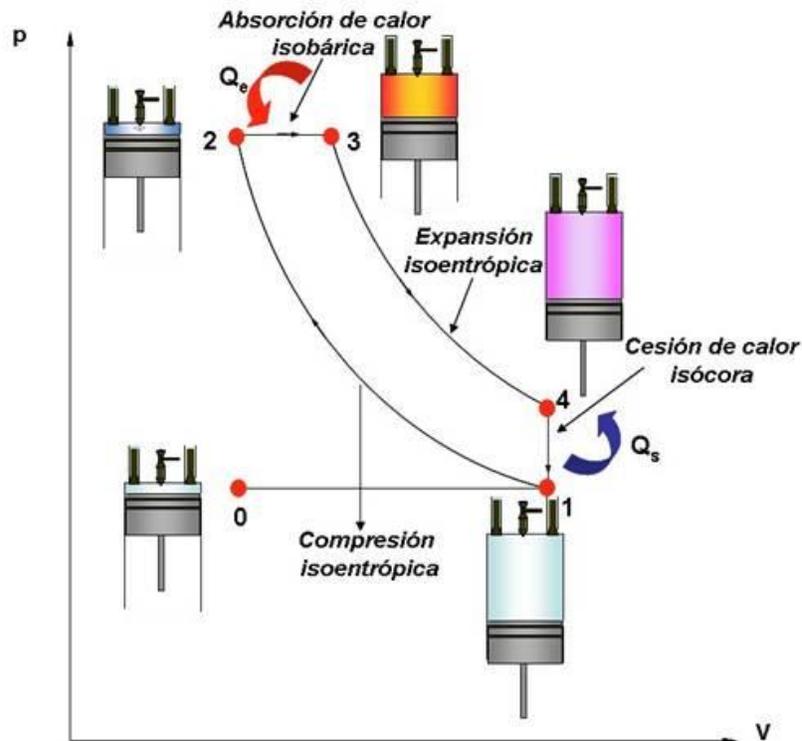


Figura 3.9. - Ciclo Diésel.

Fuente:

http://navarrof.orgfree.com/Docencia/Termodinamica/CiclosGeneracion/ciclo_diésel.htm.

3.1.3.4. Motor Wankel.

A partir del diseño, construcción y mejora de los primeros motores de combustión interna, ya fuesen de gasolina o diésel o bien, de cuatro o dos tiempos, no se presentaron mejoras significativas que irrumpieran en el área de la innovación. Todo cambio en el año de 1924 cuando Félix Wankel comenzó el desarrollo del primer motor rotativo, hoy conocido también como motor Wankel en honor a su constructor, quien recibió la patente de su invención hasta 1933.

El motor Wankel ha sido hasta el día de hoy, quizá la mejora más grande que se ha concebido en las tecnologías de motores a combustión interna, pues su principio de funcionamiento no está basado en un movimiento de rotores en lugar de pistones y bielas. Gracias a la simplicidad de este diseño, los motores Wankel ocupaban un menor volumen además de ser más silenciosos que un motor de pistones, debido en gran medida a que tienen menor número de componentes móviles.

Básicamente, el motor rotativo aprovecha la expansión de los gases producido tras la quema de la mezcla aire-combustible, solo que, en este caso, la expansión de los gases mueve un rotor excéntrico de forma triangular o de **triángulo lobular** en vez de mover un pistón cilíndrico.

El rotor está contenido en una carcasa hueca con forma de “8” lo que permite que cada vértice del rotor este en permanente contacto con la carcasa, de esta manera carcasa y rotor fungen juntos como cámara para producir los 4 tiempos ya previamente mencionados: admisión, compresión, expansión y escape. La

excentricidad del rotor permite que durante el desplazamiento del rotor se realicen los cuatro tiempos de manera simultánea. En figura 3.10 se muestra la sección transversal de un motor Wankel.

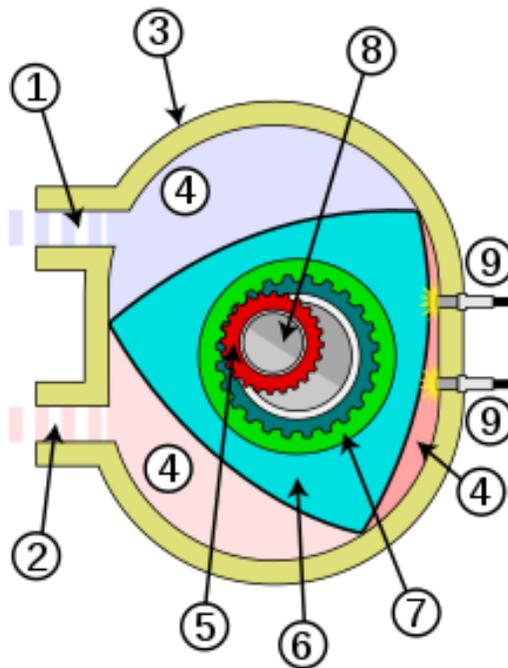


Figura 3.10. - Elementos de un motor Wankel: 1) Lumbrera de admisión; 2) Lumbrera de escape; 3) Trocoide (estator); 4) Cámaras; 5) Piñón; 6) Pistón (rotor); 7) Corona; 8) Eje excéntrico (cigüeñal); 9) Bujías.

Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Motor_Wankel.

3.2. Poder calorífico.

El poder calorífico es la cantidad de energía por unidad de masa o volumen que contiene cualquier sustancia y que se desprende al producirse una reacción química de oxidación.

La energía que desprende la unión de un combustible con un comburente en una reacción de combustión es igual a la energía que mantenía unidas las moléculas del combustible y a la cual se le resta la energía que se requiere para la formación de nuevas moléculas resultantes de la combustión, por lo general moléculas de gases de combustión. Su nomenclatura puede ser expresada en las siguientes unidades de medida:

- $\frac{kcal}{m^3}$
- $\frac{kJ}{Kg}$
- $\frac{kJ}{m^3}$
- $\frac{Btu}{m^3Kg}$

Para efectos prácticos, se le da un valor generalizado al calor específico de una sustancia combustible, sin embargo, en la práctica se le asignan dos tipos de valores explicados a continuación:

- *Poder calorífico Superior o bruto (PCS):* Se refiere a la cantidad de energía obtenida de una unidad de masa o volumen como resultado de su

combustión, en la cual, la cantidad de agua resultante se condensa completamente durante el proceso de combustión, es decir, se encuentra en estado líquido, de esta manera, se aprovecha la energía del combustible, así como del cambio de fase del agua resultante.

- *Poder calorífico Inferior o neto (PCI)*: Es la cantidad de energía obtenida de la unidad de masa o volumen, en la cual el agua como producto de la combustión se encuentra en estado gaseoso (vapor). Por lo tanto, no se produce un cambio de fase del agua y el calor resultante no es tanto como el del PCS.

La diferencia entre los anteriores conceptos radica principalmente en el aprovechamiento de la energía del cambio de fase del agua (condensación), es decir, en el PCI no hay cambio de fase y solo se contabiliza la energía desprendida del combustible, para el PCS al haber cambio de fase del agua, esta energía se suma a la desprendida por el combustible y es por esta razón que se produce mayor desprendimiento de calor. El rendimiento de un motor se evalúa con respecto de PCI debido a que los combustibles no son puros y contienen partículas de otros elementos como el Azufre. Tales partículas en combinación con el oxígeno y el agua condensada producen ácidos altamente corrosivos (sulfúrico y sulfuroso). El resultado de estos ácidos se evita al expulsar los gases a más de 100 °C, a esta temperatura, el agua se expulsa en forma de vapor. En el caso del Diésel, su poder calorífico está calculado en $41000 \frac{Kj}{Kg}$.

3.3. Aceites combustibles Diésel.

También conocido como gasóleo, el Diésel es un hidrocarburo ($C_{12}H_{16}$) constituido principalmente por **parafinas**³² resultado de la descomposición de organismos vegetales y animales, sepultados bajo tierra a altas presiones y temperaturas durante millones de años. A nivel global, el Diésel destilado del petróleo se ha convertido en parte fundamental de las economías y de la movilidad mundial.

La obtención del combustible Diésel derivado del petróleo se realiza mediante el aumento de temperatura de este en torres de destilación. A medida que se va incrementando la temperatura del “crudo”, los componentes más livianos y de menor punto de ebullición comienzan a separarse de la mezcla de petróleo. Las moléculas con menor cantidad de átomos de carbono se separan y suben por el interior de la torre en forma gaseosa, dejando atrás las mezclas más pesadas. Posteriormente, con mayor temperatura, los componentes más pesados comienzan a desprenderse y tienden a subir, nuevamente dejando los componentes más pesados. Este método de destilación se le conoce como “destilación fraccionada”.

En la figura 3.11 se esquematiza el proceso de destilación del petróleo crudo, así como algunos de los principales productos obtenidos a partir de la destilación de la mezcla de cruda de petróleo. Los componentes ligeros siempre tienden a subir

³² Aunque también puede contener otras cadenas de hidrocarburos en menor cantidad, los cuales van desde $C_{10}H_{22}$ a $C_{15}H_{32}$.

cierta altura dentro de la torre dependiendo del número de átomos de C contenidos en sus moléculas.

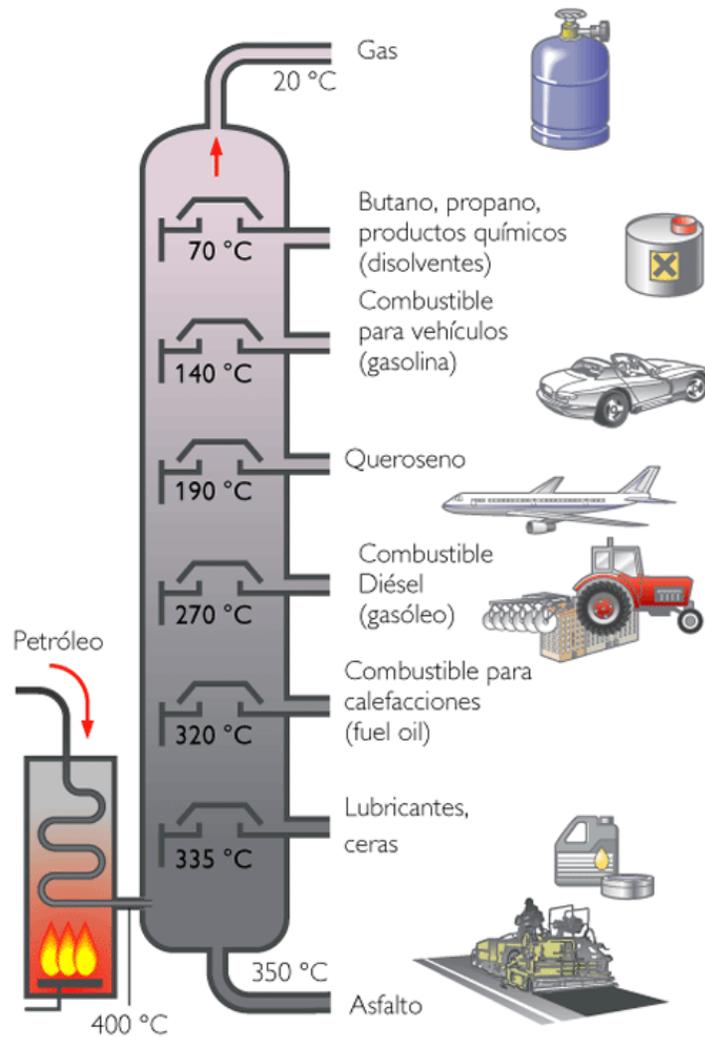


Figura 3.11. - Torre de destilación de petróleo crudo.

Fuente: <http://soniaquerreroj.blogspot.com/2012/06/destilacion-del-petroleo.html>.

De acuerdo con el Dr. Wladyslaw R. Pawlak, en su manual “Funcionamiento de Motores de Combustión Interna” (Universidad Autónoma de Nuevo León 1984) los mejores combustibles Diésel tienen las siguientes características:

- Características de Golpeteo: Por lo general, se aplica el número mayor de cetáno para disminuir el golpeteo.
- Características de Arranque: Se requiere una alta volatilidad, así como un número cetáno alto.
- Humo y olor: una baja presencia de humo y olores son características de una combustión completa.
- Corrosión y desgaste: Este punto es referente al contenido de azufre, ceniza y residuos resultantes de la combustión, puesto que, a menor grado de dichas impurezas, menor es el desgaste del motor y mayor su rendimiento.
- Fácil manejo: El Diésel debe ser un líquido con una buena fluidez y viscosidad.

3.3.1. Número Cetáno (NC).

El número cetáno es un indicativo que nos dice que tan eficiente es la reacción de combustión que se lleva a cabo en los motores Diésel. Cuanto más elevado es el número cetáno, menor será el retraso de la ignición, es decir, que la mezcla de combustible arderá más rápidamente dentro de la cámara de combustión y por consiguiente, se quemará la mayor cantidad de combustible. De esta manera podemos concluir que un número cetáno elevado se traduce en una mayor

eficiencia del combustible. De cierta manera el indicador cetano se comporta de manera inversa al octanaje en las gasolinas³³.

Por otro lado, los combustibles con un bajo número cetano necesitan mayor tiempo para que se comience a quemar el combustible, en cuanto la mezcla comienza a arder, esta tarda un menor tiempo para quemarse, por lo tanto, eleva la presión dentro de la cámara de combustión teniendo como resultado efectos adversos tales como:

- Ruido excesivo.
- Aumento de las emisiones.
- Aumento en las vibraciones del motor.
- Fatiga del motor.
- Bajo rendimiento del motor.

El número cetano del diésel tiene una relación directa con el calor generado por un motor, puesto que si tenemos un número cetano alto podemos concluir que dentro de las cámaras de combustión se tendrá una quema completa del combustible, por consiguiente, el calor por unidad de masa de la mezcla de combustible y aire es potenciado al máximo.

³³ El octanaje (número de Octanos) es la escala que mide la capacidad antidetonante de un carburante cuando este es comprimido dentro del cilindro de un motor. La relación entre un motor y un combustible con determinado número de octanos es muy relevante a consecuencia de que un combustible con bajo octanaje en un motor adecuado para un octanaje más alto producirá una combustión prematura, por ende, bajo rendimiento y lo que comúnmente se conoce como “cascabeleo” o “pistoneo”. En sentido inverso, no se produce ninguna afectación ni beneficio.

3.4. Combustión en los motores Diésel.

Los motores Diésel se caracterizan principalmente por encender la mezcla de combustible a base de someterla a altas presiones que van de los 10,340 a los 206,893 kPa (105.4 a 2109 $\frac{kg}{cm^2}$). Un factor importante para que la mezcla de combustible sea homogénea es que el combustible entra a la cámara de combustión en un estado casi gaseoso, debido a que el inyector lo pulveriza³⁴ de manera que pueda mezclarse con el oxígeno comprimido en la cámara. Cuando el cilindro alcanza su compresión máxima, la mezcla de combustible se auto inflama a una temperatura que oscila alrededor de los 800° C. Dentro de la cámara de combustión la temperatura puede alcanzar hasta los 2500° C.

De manera general, el proceso de combustión diésel lo podemos englobar en 3 etapas principales:

- Periodo de demora de encendido.
- Periodo de combustión.
- Periodo de combustión final o postcombustión).

La primera fase tiene una duración muy corta, según las mediciones esta se logra entre 0.7×10^{-3} y 0.3×10^{-3} segundos. Es en este primer paso en el que se hace la inyección de combustible a la cámara de combustión. En motores de baja

³⁴ Hasta hace poco tiempo, la presión que generada en una boba de inyección alcanzaba los 10000 Bar, sin embargo, en la actualidad las presiones máximas se encuentran en un rango de 1500 y 2000 Bar. Cuando el combustible se pulveriza de manera adecuada, es más fácil que este se mezcle con el oxígeno en la cámara de combustión. Las líneas de combustible que llegan hasta los inyectores son construidas con acero sin soldadura con diámetros de 2mm y 3mm para soportar tal cantidad de presión.

velocidad se inyecta de un 15% a un 30% de la dosis de combustible, por otro lado, en motores de alta velocidad incluso se le lleva a proporcionar la totalidad de la dosis de combustible a la cámara de combustión.

En la segunda fase comienza el aumento de presión como resultado del encendido de la mezcla aire-combustible dentro de la cámara de combustión. En este punto del proceso, si la velocidad de combustión no es adecuada, es decir, la combustión es muy rápida o lenta, se produce el fenómeno conocido como “golpeteo”, el cual, de manera general, es una anomalía en inicio de combustión de la mezcla. Para disminuir este fenómeno, un aceite “Diésel debe tener una demora del encendido muy corta y una temperatura de autoencendido muy baja”³⁵ de esta manera, se aprovecha la totalidad de la mezcla de combustible. Por otro lado, de no controlarse el fenómeno del golpeteo, el motor será ineficiente pues una combustión retardada genera un mal aprovechamiento de la mezcla de combustible, siendo el mismo casi si la ignición es muy apresurada. En ambas situaciones previamente mencionadas, se tiene una afectación térmica, pues al no tener un aprovechamiento completo de la mezcla, la temperatura alcanzada dentro del cilindro en el momento de la combustión no es la adecuada para quemar la mezcla, como resultado directo de esta anomalía se generan gran cantidad de contaminantes (partículas CO₂ y NOX).

³⁵ Pawlak Wladyslaw R. “Funcionamiento de Motores de Combustión Interna” Primera Edición Ed. Universidad Autónoma de Nuevo León. Pág. 82.

La tercera fase se caracteriza por el aumento de temperatura y presión. Es en esta etapa en la que generalmente se quema la mayor parte de la dosis de combustible inyectado, alrededor de un 40 a 60% de la mezcla. Un buen encendido de la mezcla, además de lo ya antes mencionado, depende de que el combustible este mezclado homogéneamente con el aire comprimido de la cámara, esto depende en gran manera de los componentes eléctricos y mecánicos del motor tales como pistón, inyector, Pulverizadores, bombas, líneas de combustible, etc.

Cuando el combustible es quemado, el poder calorífico obtenido es de aproximadamente $43,10 \frac{MJ}{Kg}$ contra $43,20 \frac{MJ}{Kg}$ obtenidos de la combustión de gasolina, sin embargo, al ser un combustible más denso que la gasolina, el diésel ofrece una densidad volumétrica energética de aproximadamente $35,86 \frac{MJ}{L}$ contra los $32,18 \frac{MJ}{L}$ de la gasolina. Es la densidad volumétrica lo que posiciona al diésel por encima de otros combustibles en términos de poder calorífico. Las emisiones de CO_2 del diésel son de $73,25 \frac{g}{MJ}$ solo ligeramente más bajas que la gasolina, con $73,38 \frac{g}{MJ}$.

Los motores de combustión interna diésel son parte fundamental de las economías del mundo y en específico del desarrollo de la humanidad. Esta tecnología no ha cambiado radicalmente desde su invención, sin embargo, se han hecho mejoras en sus componentes dando como resultado mejoras en: eficiencia, control de emisiones, accesibilidad al consumidor e inclusive pasaron

de ser máquinas de uso únicamente industrial, a ser incorporadas a la vida cotidiana de la gente con su introducción en automóviles compactos.

Como se menciona en este capítulo, la eficiencia de un motor esta intrínsecamente relacionado con su construcción, pero también, es notable el efecto que tiene las características del combustible que es suministrado al motor. Siendo estas máquinas generadoras de calor, es necesario mantener seguros a los usuarios de accidentes potenciales por el desprendimiento de calor, en un grado menor, es conveniente asegurar la comodidad del usuario u operador de estas máquinas, pues en climas extremos un aumento de temperatura derivada del motor es causal de bajo desempeño o recalamos de calidad lo cual, tiene siempre un impacto desde el punto de vista económico.

El aislamiento de las máquinas térmicas como ya se ha analizado, es un factor de seguridad patrimonial, sin embargo, también tiene su connotación económica pues el calor desprendido, en el mejor caso, se puede aprovechar en otras aplicaciones y de esta manera tener un mayor aprovechamiento de la energía.

4. EL AUTOBÚS COMO MEDIO DE TRANSPORTE.

El origen del autobús como medio de transporte puede remontarse hasta el siglo XVII en Francia, donde surgió la primera idea de un transporte colectivo. En el año de 1662 surgen grandes carrozas de madera tiradas por caballos, mismas que proveían de transporte colectivo, cabe señalar que este servicio no era del todo cómodo ni accesible al público en general dado su alto precio. El servicio no prevaleció. La idea fue retomada años después nuevamente en Francia en la ciudad de Nantes donde Stanislav Braudy, propietario de baños públicos retomó la idea de las carrozas tiradas por caballos para el transporte de sus clientes. Más tarde Stanislav fundaría en 1828 la primera línea de transporte conocida como Enterprice Gènerale des Omnibus³⁶. El modelo de negocio prosperó y no solo eso, sino que también se adoptó en ciudades como Londres y Nueva York.



Figura 4.1.- Primeros Ómnibus de Francia.

Fuente: <https://www.curiosfera.com/historia-del-autobús/>

³⁶ el nombre que se le dio al autobús aquel entonces: el Ómnibus. Este se debe a una sombrería ubicada en la última parada del autobús, la cual se llamaba Omnes. Este nombre lo juntaron con una derivación de un término latín y resultó ser Ómnibus que significaba: todo para todos.

En 1831 fue concebido el primer autobús de la historia, su inventor inglés Walter Hancock montó un motor de vapor en una carrocería de madera, en otras palabras, podía moverse por sí mismo. Al referirse como un vehículo auto propulsado, se le denominó “autobús”, este es el origen de la palabra que comúnmente se denomina para referirse a un transporte para varias personas. Más adelante Hancock comenzó a producir vehículos con motores de gasolina desarrollados por la compañía alemana Benz, sin embargo, la gran limitante era el espacio, pues solamente eran vehículos para 6 pasajeros y dos conductores, estos últimos situados al exterior de la unidad.



Figura 4.2.- Autobús propulsado por un motor a vapor.

Fuente: <https://www.curiosfera.com/historia-del-autobús/>



Figura 4.3.- Primer Autobús con motor de gasolina.

Fuente: <https://www.curiosfera.com/historia-del-autobús/>

En Europa comenzaron a surgir líneas de transporte a lo largo de las principales ciudades. Las rutas en un comienzo eran las ya conocidas carrozas tiradas por caballos, reemplazadas junto con el motor a vapor para el año de 1895, cuando es desarrollado el primer autobús con motor de gasolina, puesto en servicio por la firma Benz.

El transporte eléctrico no es una novedad tecnológica de estas últimas generaciones pues la empresa ABOAG (*Allgemeine Berliner Omnibus-Aktiengesellschaft*) en Alemania comenzó a experimentar en 1898 con los primeros autobuses eléctricos también conocidos como trolebús, equipados con acumuladores de energía. A pesar de ser un avance novedoso, los primeros autobuses eléctricos no perduraron en el ramo de transporte pues competía directamente con el tranvía, transporte muy popular a finales del siglo XIX y principios del siglo XX. El tranvía era considerado como la solución al transporte de masas, pero este también se vio sobrepasado por la popularidad y versatilidad

del autobús. Solamente el tren subterráneo (1863) logró hacerle frente ante la demanda de transporte.

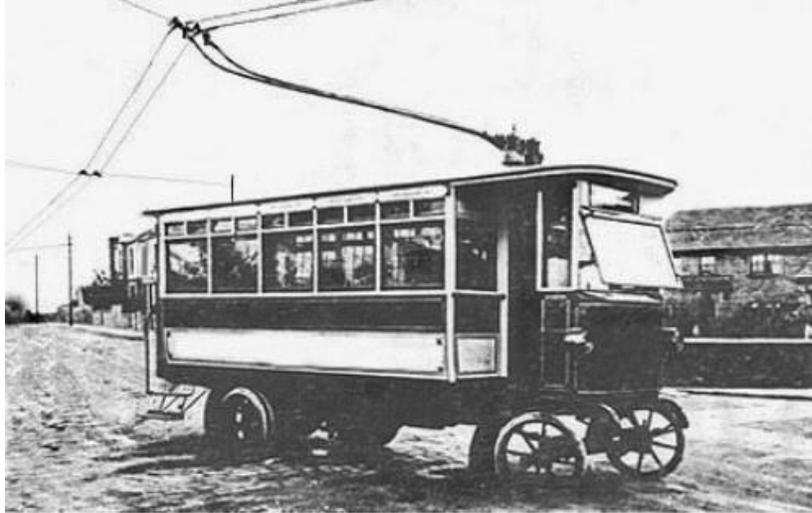


Figura 4.4.- Primer servicio de Trolebús 1898.

Fuente: <https://www.curiosfera.com/historia-del-autobús/>

En el año 1895, la firma Benz crea el primer autobús de la historia equipado con un motor trasero que propulsaba las llantas traseras mediante una transmisión de cadena. Hasta antes del 1900 los pocos autobuses construidos eran propulsados mediante un motor a gasolina, generalmente mono cilíndrico y de cuatro tiempos, sin embargo, los hermanos Mack introdujeron el motor diésel a partir de 1900. La introducción fue un logro significativo tomando como base que el motor diésel proveía una mayor eficiencia y poder a un naciente transporte masivo.

A lo largo de las décadas, el autobús se implanto en las ciudades como un medio de transporte accesible. Es notable que el alcance de este medio de transporte

no solo se limitó a las urbes en desarrollo, pues además de crearse líneas de transporte urbano, surgieron los autobuses foráneos, conectando ciudades con recorridos de medio y largo alcance.

Con el pasar del tiempo se han ido adecuando los diseños y funciones de los autobuses a cada necesidad de transporte en cada ciudad, incluso, las líneas y los vehículos en sí llegan a ser un rasgo característico de ciudades y países. Las variaciones de diseño van desde largo, ancho o capacidad de carga, hasta el tipo de propulsión o número de ejes. Podemos destacar los siguientes modelos como ejemplo de adaptación a las necesidades de transporte:

- Girobús: Los componentes de este autobús a simple vista son convencionales, sin embargo, la peculiaridad radica en su sistema de propulsión. Es propulsado por la energía cinética acumulada en un volante de inercia. La energía es convertida por un generador eléctrico, mismo que hace funcionar al motor eléctrico de la unidad.
- Minibús & microbús: La particularidad de estos autobuses, como su nombre lo indica, es que son transportes de dimensiones pequeñas. Su capacidad va de los 9 hasta los 35 pasajeros incluido el chofer. Al no ser transportes de gran capacidad, su uso está limitado a viajes cortos o interurbanos.
- Autobús Articulado: Este es un modelo de autobús que responde a altas demandas de transporte. Como su nombre lo indica, es un autobús con

una o varias articulaciones en su sección longitudinal, lo que permite que alcance una longitud que va de los 18 hasta los 28 metros de largo. Como es de intuirse, la capacidad de carga de pasajeros de estas unidades es sustancialmente mayor a la de un autobús convencional. Este modelo ha tenido un repunte en su uso en los últimos años, debido en gran medida a su fácil adaptación en urbes con gran demanda de transporte. El autobús articulado se ha convertido en insignia del sistema de transporte BRT (Bus de tránsito Rápido).

- **Autobús Doble piso:** El autobús de doble piso es muy representativo de ciudades como Londres o Hong Kong, donde se introdujo en 1949. Aunque primordialmente se le ha dado un uso turístico-urbano, en recientes años se ha popularizado como medio de transporte foráneo. En un principio, su desarrollo de doble piso fue concebido para no quebrantar la normatividad del largo permitido de un autobús. De esta manera se podía transportar a más personas si infringir la normativa en transporte.
- **Autobús eléctrico:** Esta categoría se puede subdividir en dos ramos principales: Trolebuses y Autobuses con energía almacenada a bordo. Los primeros son alimentados por una red de cables que van a lo largo de la ruta y que proveen al motor de energía mediante un par de cables que tocan el tendido eléctrico. El segundo rubro son unidades que almacenan energía en baterías, estas son cargadas en estaciones de energía y tienen un tiempo de recorrido limitado a la capacidad de la batería. Los últimos avances tecnológicos han permitido el desarrollo de estaciones de carga

rápida y baterías de más larga duración. Ante los actuales problemas de contaminación y cambio climático, los autobuses eléctricos se perfilan para ser la nueva generación de transporte urbano y foráneo de las urbes.

- **Autobuses guiados:** La diferencia entre un autobús convencional y un autobús guiado, radica principalmente en su conducción. Un autobús propulsado tiene mayor autonomía gracias a que sigue un patrón de recorrido en el cual se tienen definidas las estaciones, así como las velocidades de recorrido. La guía del autobús puede ser distinta dependiendo el caso, algunos modelos siguen un riel en el piso o bien, sobre el autobús. En otros casos el autobús recorre un carril confinado, se le colocan unas guías laterales al vehículo a modo que no choque con los bordes del carril. Las versiones más modernas son guiadas por un patrón dibujado en la carretera, al autobús se le monta una cámara, que, a su vez, obedece al patrón guía.
- **Ferro-bus:** La aparición del ferro-bus se remonta a la primera guerra mundial. Dada la necesidad de transporte rápido, confiable y ligero, se desarrollaron vagones montados sobre un chasis autopropulsado por motores de combustión interna o eléctricos. Esto daba agilidad al transporte, pues no era necesario contar con una locomotora a vapor. En las décadas recientes este transporte ha dado servicio en países como, Reino unido, Francia, Bolivia, Canadá, India, Rusia, entre otros.

Además de las características antes mencionadas de cada tipo de autobús, estos también se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Clase A -> Autobuses hasta 22 plazas, ya sean sentadas o de pie.
- Clase B -> Autobuses hasta 22 plazas, todas ellas sentadas.
- Clase I -> Autobuses Urbanos o Interurbanos con plazas de pie y sentadas, con más de 22 plazas y conductor.
- Clase II -> Autobuses Urbanos o Interurbanos con plazas sentadas y en pequeños recorridos podrán llevar plazas de pie. Más de 22 plazas y conductor.
- Clase III-> Autobuses o Autocares discrecionales o de largo recorrido (foráneos) con más de 22 plazas y conductor.

Al pertenecer a la rama automotriz, el rubro de autobuses sea ha visto beneficiado por aquellas mejoras introducidas en el sector. A futuro este medio de transporte se perfila como el de mayor uso dentro de las ciudades, pues *“Según Naciones Unidas, se prevé que en el año 2050 prácticamente el 70% de la población mundial se haga urbana y muchas de las ciudades cuenten con más de 10 millones de habitantes. Se estima que, en 2025, sólo en China, habrá 221 ciudades que superen el millón de personas, Europa tiene en la actualidad 35”*³⁷

La alta demanda de movilidad aunada a los crecientes problemas de contaminación urbana serán factores para que repunte la innovación en el sector

³⁷ Fuente: <https://blogthinkbig.com/innovacion-en-el-transporte-de-las-ciudades>.

de transporte público y por consecuencia, el mercado necesitará de autobuses inteligentes, eficientes y por supuesto amigables con el medio ambiente.

4.1. Componentes principales de un autobús.

En el subtema anterior se ha expuesto algunas variedades de autobuses actualmente en circulación. Es verdad que tienen diferencias, ya sea en sus dimensiones, número de puertas, tipo de servicio que para los que se usan e incluso el tipo de propulsión utilizada. A pesar de estas diferencias, el diseño de cada modelo de autobús comparte similitud en los componentes básicos usados para su construcción. A continuación, daré una explicación breve de los componentes, siguiendo la lógica en la que estos se van ensamblando al autobús.

4.1.1. Chasis.

Se define al chasis de un autobús, como la estructura metálica, generalmente de acero que va sostenido sobre amortiguadores y fijado a los ejes, direccional y de tracción, que sostiene la **carrocería** y el motor de un vehículo.

El chasis es la base de cualquier autobús, pues es la parte que, como ya se ha mencionado, sostiene la carrocería y contiene los componentes principales del **tren motriz**. Además del tren motriz, en un chasis podemos encontrar los siguientes subsistemas:

- Sistema neumático y de frenos.

- Sistema de control eléctrico y monitoreo.
- Sistema hidráulico.
- Motor y transmisión.
- Sistema de suspensión delantera y trasera (ejes).
- Sistema de dirección.
- Elementos de soporte estructural (**varas** y bastidores).
- Sistema de alimentación de combustible.

A consecuencia de la gran variedad de servicios de transporte y modelos de autobuses, la industria ha desarrollado distintos tipos de chasis que se adecuan a cada necesidad de transporte. Los principales chasis disponibles en el mercado se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Ubicación del motor: en el mercado se pueden encontrar motores de diversas capacidades y torques, sin embargo, de un modelo a otro de chasis la posición del motor puede variar. Las principales causas de tener diferentes ubicaciones son factores de diseño, en los cuales la posición del motor se toma en cuenta para dar más espacio a asientos o a personas de pie, colocación de baños o mobiliario dentro del autobús. Hay factores que influyen también en la posición del motor tales como desgaste y mantenimiento, claro ejemplo de esto son los autobuses articulados, se ha demostrado que los modelos con motor medio o frontal sufren menor desgaste que los motores ubicados en la sección trasera. Las ubicaciones del motor más comunes son las siguientes:

- Motor ubicado al frente bajo el operador.
- Motor ubicado a medio autobús, bajo el salón de pasajeros.
- Motor ubicado en las secciones traseras del autobús.



Figura 4.5. - Chasis con motor frontal.

Fuente: <https://www.scania.com/global/en/home/products-and-services/buses-and-coaches/our-range/coach-chassis.html>.



Figura 4.6. - Chasis Volvo B9L piso bajo con motor vertical.

Fuente: <https://www.volvobuses.com/en-en/our-offering/chassis.html>.

- Puntos de apoyo: Usualmente un vehículo automotor circula sobre dos ejes o bien 4 puntos de apoyo, es decir, 4 llantas, de las cuales dos proveen de tracción y las otras dos son direccionales. Para autobuses de mayor capacidad de carga se utilizan 3 ejes visto de otra manera 6 puntos de apoyo por dos de tracción y uno direccional. En estos casos y dependiendo de la longitud de la unidad, el tercer eje o puntos de apoyo también giran (son direccionales), lo cual facilita el giro de la unidad. En el caso de chasis para unidades articuladas se tienen 3 ejes, en cambio, en unidades biarticuladas, su chasis posee 4 eje o bien 8 puntos de apoyo. Este caso también aplica para ciertos modelos de autobuses foráneos. Se puede referir a un chasis por su número de ejes o usando una nomenclatura que denota el número de puntos de apoyo por el número de puntos de apoyo con tracción, las más usuales son las siguientes:

- 4x2 (4 puntos de apoyo por dos de tracción o dos ejes).
- 6x2 (6 puntos de apoyo por dos de tracción o tres ejes).
- 8x2 (8 puntos de apoyo por dos de tracción o cuatro ejes).



Imagen 4.7. - Chasis Volvo 4x2 y 6x2 para autobuses foráneos.

Fuente: <https://www.volvobuses.com/en-en/our-offering/chassis.html>.

- Capacidad de carga de los ejes: Como se menciona en el punto anterior, las opciones al elegir un chasis pueden ir en función del número de ejes que conforman al chasis. Esta característica esta intrínsecamente ligada a la capacidad de carga del chasis. Los chasises con mayor número de ejes poseen una mayor capacidad de carga. Este factor debe ser tomado en

cuanta al momento de diseñar la carrocería, puesto que un excedente de carga en cualquier eje puede significar riesgos como los siguientes:

- Desgaste prematuro de componente de los ejes.
 - Baja eficiencia en el desempeño de la unidad.
 - Es un factor de seguridad la sobrecarga de ejes.
-
- **Desplazamiento** del motor: En términos simples, el desplazamiento es la cilindrada del motor. Este factor determina la potencia del motor, el par motor y la cantidad de combustible que el motor consume. De manera general y muy intuitiva, podemos concluir que un motor con un mayor desplazamiento genera más potencia mientras que un motor más pequeño es más eficiente. La cilindrada de un motor varía dependiendo del fabricante, en el rubro de autobuses, las cilindradas también varían dependiendo de la función del vehículo, generalmente para autobuses urbanos las cilindradas van de los 7lt a los 9lt. En autobuses interurbanos se manejan cilindradas de 11 a 13 lt y para autobuses foráneos van de los 13lt hasta los 16lt.



Figura 4.7. - Chasis Volvo B11R (motor 11 litros) 6x2.

Fuente: <https://www.volvobuses.com/en-en/our-offering/chassis.html>

- Otras particularidades: Dado que la oferta de chasises varia acorde con las necesidades del cliente, en este punto podríamos enlistar los diseños más particulares del mercado.
 - Chasis para autobuses articulados.
 - Chasis para autobuses Biarticulados.
 - Chasis para autobuses articulados de piso bajo.
 - Chasis para autobuses Diésel.
 - Chasis para autobuses con motor de gas natural.
 - Chasis para autobuses Híbridos.
 - Chasis para autobuses eléctricos.



Figura 4.8. - Chasis Biarticulado con motor en el carro delantero.

Fuente: <https://www.drivespark.com/four-wheelers/2016/volvo-world-largest-bus-019336.html>



Figura 4.9. - Chasis Articulado piso bajo y motor trasero Mercedes-Benz.

Fuente: file:///C:/Users/ub4111v/Downloads/producto_O500UA.pdf

4.1.2. Carrocería.

Se define carrocería a *“aquella parte del vehículo en la que reposan los pasajeros o la carga. En los vehículos auto portantes, la carrocería sujeta además los elementos mecánicos del vehículo”*³⁸. Partiendo de esta definición, la cual también aplica a un autobús, podemos concluir que la carrocería es el conjunto de ensamblajes con los que el usuario final interactúa en mayor medida. La carrocería contiene todos los elementos que proveen al pasajero un espacio cómodo y agradable y por encima de esto, lo protegen en caso de un accidente.

La carrocería reúne básicamente todos los componentes que forman al autobús, incluso, podemos decir que es la interfaz entre el chasis y los pasajeros, sin embargo, podemos subdividir a la carrocería en dos rubros generales a continuación descritos:

4.1.3. Estructuras.

El concepto de estructura proviene del latín *structūra*, hace referencia al orden, disposición o arreglo que un conjunto de elementos tiene dentro de un todo. En el caso de estudio de esta tesis, un autobús foráneo está conformado por estructuras unidas entre sí, las cuales proporcionan estabilidad y rigidez al sistema completo.

En sus años tempranos, la carrocería y más específicamente la estructura del autobús era construida mayoritariamente por madera, material liviano y de bajo

³⁸ Fuente: https://es.wikipedia.org/wiki/Tipo_de_carrocer%C3%ADa

costo, sin embargo, como resultado de las innovaciones tecnológicas del siglo XX, en la demanda de transporte, los materiales han ido variando con el fin de mejorar los aspectos de eficiencia y seguridad. Actualmente las estructuras se manufacturan con acero inoxidable, acero galvanizado o aluminio, según sea el requerimiento de diseño o la demanda del cliente.

A pesar de que el aluminio tiene un excelente desempeño como material estructural, su desempeño ante la corrosión y a su bajo peso comparado con el acero, su uso se limita solo a ciertos segmentos del mercado de autobuses, esto debido a su alto costo de manufactura, es por este motivo que generalmente se carrozan autobuses con estructuras de acero.

En algunos casos, la mezcla de materiales puede ser posible, siempre y cuando el método de fijación o soldadura sea el adecuado para ambos materiales o bien, que sean unidos mediante fijaciones mecánicas aisladas adecuadamente, para evitar una posible corrosión galvánica.



Figura 4.10. - Autobús urbano con estructuras toldo y laterales fabricadas en aluminio. La estructura trasera, frontal y de piso están manufacturadas en acero.

Fuente: <https://www.indiamart.com/proddetail/aluminum-bus-body-14991956648.html>

Al ser un componente de seguridad, la estructura de una carrocería debe ser diseñada tomando en cuenta los parámetros de funcionamiento y carga del chasis donde será ensamblada la estructura. Hoy en día el diseño se realiza en un software CAD posteriormente, el modelo 3D se somete a un análisis estructural de los componentes estructurales principales, este análisis se realiza mediante softwares CAE especializados en el cálculo de elemento finito, simulando de esta manera el comportamiento esperado en una estructura sometida a cargas estáticas y dinámicas. El análisis de elemento finito previo a la manufactura de un prototipo permite reforzar u optimizar la estructura de modo que se ahorran costos de producción de prototipos.

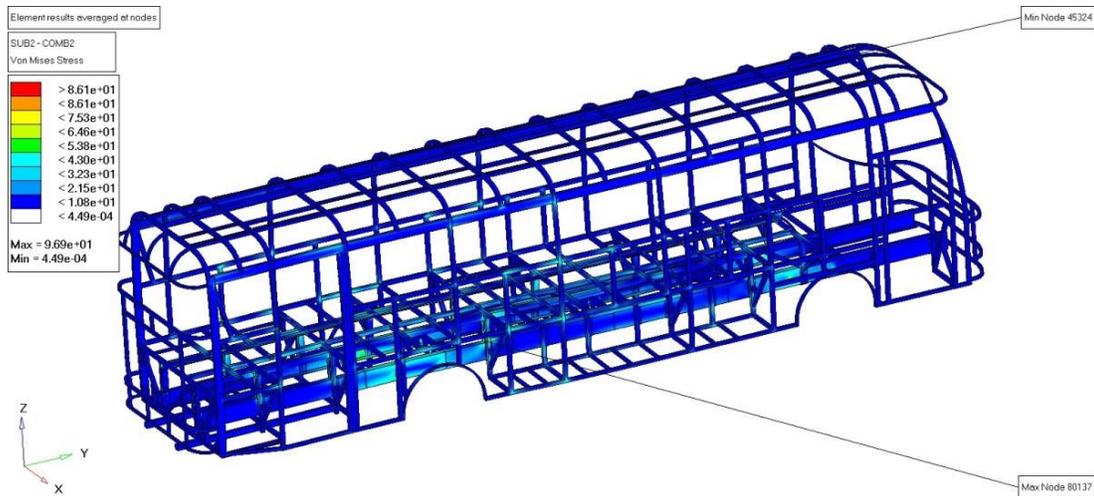


Figura 4.11. - Simulación de esfuerzos en un autobús 4x2 urbano.

Fuente: <http://blog.coinav.com/como-ejecutar-pruebas-de-impacto-de-un-autobús-en-computador/>

Posterior al proceso de diseño y en una etapa de industrialización, la estructura proveerá de soporte a los componentes internos y externos del vehículo, los cuales varían dependiendo de los requerimientos del cliente o las especificaciones de diseño.

En la figura 4.12 se esquematizan las principales estructuras que constituyen al “esqueleto” del autobús con un motor ubicado en la **banca trasera**. La ubicación del motor en la parte trasera es parte fundamental para el desarrollo de esta tesis, debido a que es la ubicación más común en el segmento de autobuses foráneos.

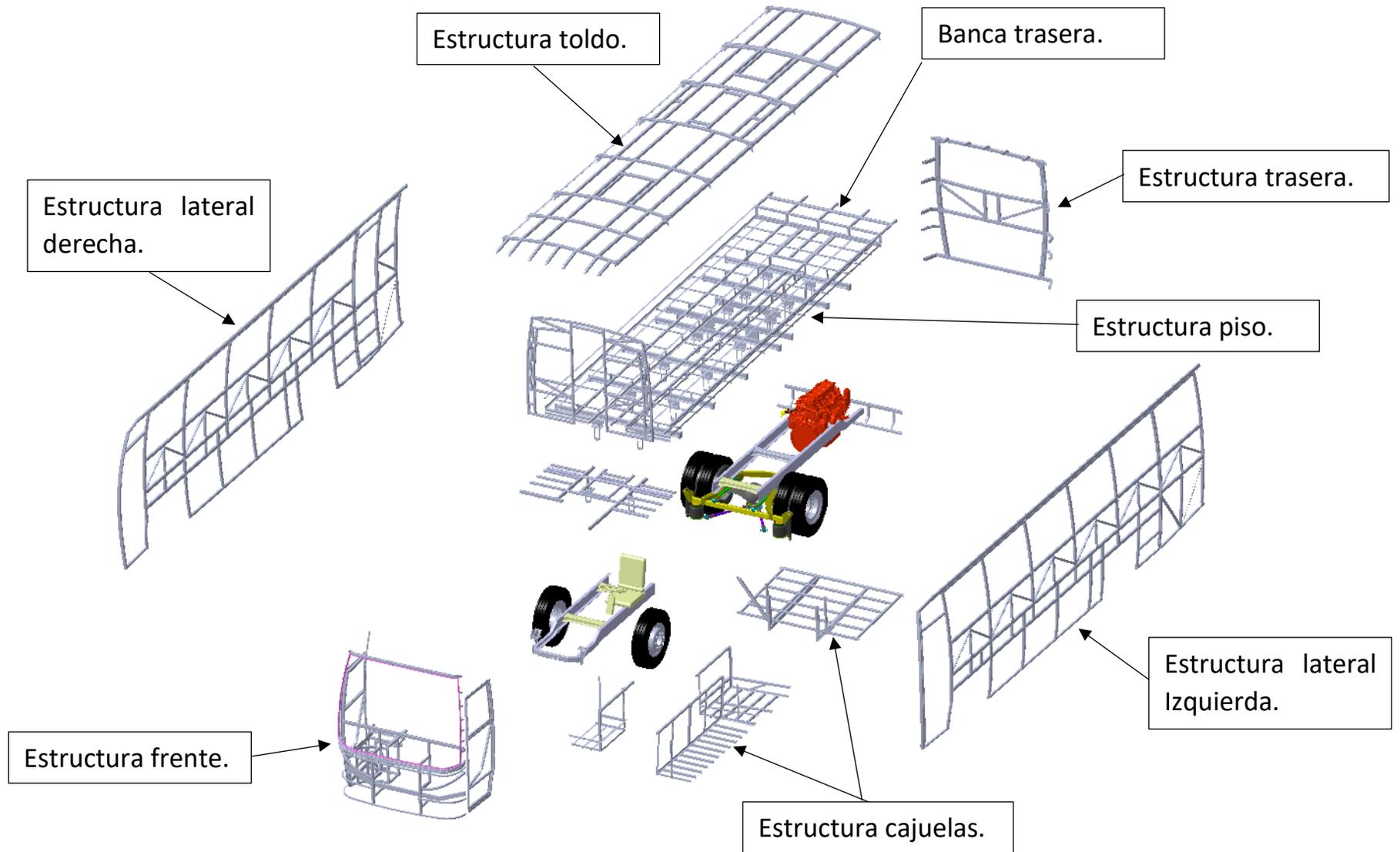


Figura 4.12. - Estructuras que constituyen un autobús con motor trasero.

Fuente: Autor

4.1.4. Acabados interiores y exteriores.

El diseño de un vehículo automotor siempre será el sello distintivo de la marca y del fabricante, al paso del tiempo las tendencias van cambiando y por consiguiente dan la pauta para definir el tipo de materiales, los colores y texturas que se aplicarán a un diseño tanto exterior como interior de un vehículo.

Para los usuarios de cualquier medio de transporte, la ergonomía es un factor fundamental que puede hacer que un vehículo sea exitoso en el mercado nacional o internacional. La línea de diseño de un autobús es definida principalmente por el segmento o servicio al que va dirigido el autobús, pues los estándares de calidad varían conforme al uso que se le dará a vehículo. Generalmente en el sector urbano, el uso de materiales y el diseño de espacios, es más enfocado a la seguridad y durabilidad del producto, por otro lado, el diseño de autobuses foráneos e interurbanos tiene un enfoque más estético orientado a la comodidad del pasajero.

En ambos casos, en este trabajo se mencionan 5 principales puntos que se deberían considerar para el diseño de interiores y exteriores con el fin de ofrecer productos con un alto grado de competitividad.

- Seguridad: La seguridad de un autobús es parte fundamental de la cultura corporativa de la mayoría de los fabricantes y prestadores de servicios de transporte de pasajeros. El desarrollo de los acabados interiores, ya sean textiles, plásticos, maderas y adhesivos deben apegarse a las normas

oficiales de cada región, sin descuidar el enfoque de comodidad que el usuario final requiere.

- **Fiabilidad:** Los materiales y componentes deben cumplir los procedimientos de homologación de los diferentes países y ofrecer las innovaciones tecnológicas del momento. Un producto que no se puede homologar con las normas de otro país limita su comercialización a una determinada región.
- **Confort:** Como se menciona al inicio de este subtema, el diseño de componentes como asientos, pasillos, baños, aire acondicionado, así como el diseño del espacio, el corte de pintura y las líneas de diseño exterior se deben concebir con un enfoque absoluto en usuario final. De esto depende que un producto tenga una mayor preferencia en el mercado por el cliente final. El reto al que las áreas de diseño siempre se han enfrentado, es el mantener un alto parámetro de calidad y confort a un bajo costo.
- **Robustez:** Los procesos de diseño, manufactura y ensamble de un autobús deben ser siempre robustos, respaldados por estándares internacionales como normas ISO. En el caso del desarrollo de componente o materiales, estos se deben someter a las pruebas correspondientes que garanticen su buen funcionamiento y durabilidad. La aplicación de herramientas y metodologías de calidad en el diseño como el AMEF (Análisis de modo falla y efecto), GD&T (tolerancias geométricas), Lean Manufacturing (Manufactura esbelta) Diagramas causa-efecto, entre otras hacen que un diseño sea confiable y robusto, por consecuencia, el producto final tendrá la fiabilidad y desempeño adecuado.

- Versatilidad: Apostar por la versatilidad de productos es una buena estrategia para la atracción del mercado, sin embargo, la versatilidad de diseño no solo se refiere a tener una amplia gama de modelos. Ser versátil en el diseño también implica hacer comunes partes que pueden encajar en distintos modelos, de esta manera se reducen costes de producción y administración de numerosas partes. La versatilidad de un diseño, ya sea, recubrimientos interiores o estructura se distingue por su adaptabilidad en soluciones diversas.

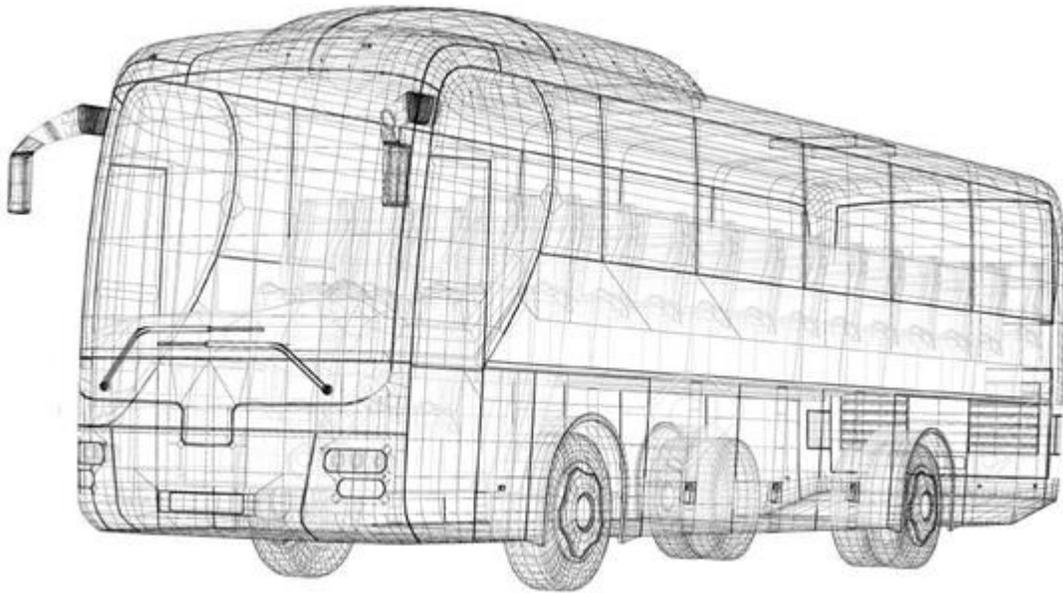


Figura 4.13. - Boceto de diseño exterior de un autobús interurbano 4x2.

Fuente: https://www.123rf.com/photo_31492428_bus-autobús-model-bo+dy-structure-wire-model.html

4.2.El Diseño Asistido por Computadora como herramienta para el diseño y simulación de autobuses.

La representación pictórica de objetos, vivencias y sobre todo de conocimiento, ha sido siempre una característica común entre la sociedad a lo largo de la historia y alrededor del mundo. El “Dibujo” se ha sintetizado en dos vertientes principales “el dibujo artístico y el dibujo técnico”. La primera vertiente del dibujo es una expresión de sentimientos, sensaciones e ideas, con el fin principal de influir en la imaginación del espectador, por otro lado, tenemos el dibujo técnico, cuya función es la representación gráfica de los objetos en forma y dimensión con el objetivo de emular al objeto lo más acertadamente posible.



Figura 4.14. - Oficina de construcción y reparación 1918.

Fuente: <http://themindcircle.com/before-autocad/>

Hasta antes de la mitad del siglo XX en la industria en general, la representación gráfica de los objetos era asentada en papel, los diseñadores se valían de instrumentos geométricos como compases, reglas y restiradores para plasmar una idea en un plano, que posteriormente entraría en un proceso de industrialización.

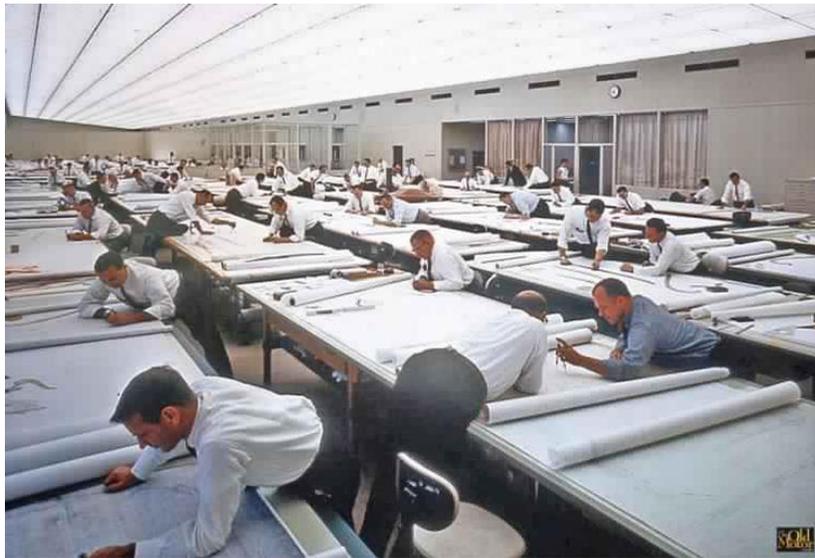


Figura 4.15.- Centro técnico de General Motors en Warren Michigan en la década de los 70's.

Fuente: <http://themindcircle.com/before-autocad/>

En la actualidad, gracias al desarrollo de herramientas CAD el dibujo artístico y el dibujo técnico confluyen en un mismo espacio, el resultado es simple, una recreación tridimensional del objeto que a su vez proporciona una fuerte carga de sugerencia y análisis al espectador.

En 1955 comenzó la investigación que haría posible el desarrollo del software CAD/CAM/CAE. En el laboratorio Lincoln del MIT, en una acción conjunta con la fuerza aérea norteamericana fue posible el desarrollo del primer sistema gráfico conocido como SAGE (Semi Automatic Ground Environment). Este sistema era una herramienta que permitía la visualización de objetos y procesamiento de datos de radar.

A principios de los años 60's en el mismo laboratorio del MIT fue desarrollado el primer software CAD llamado "Sketchpad". Debido a que, en ese tiempo, el costo del software era bastante alto, solamente grandes empresas aeronáuticas y de la industria automotriz podían costear el uso del software principalmente en actividades de investigación. Durante la década de los 70's el acceso a software de diseño se comenzó a popularizar, a pesar del costo elevado de dichas herramientas, el software CAD comenzó a pasar a una etapa de uso comercial, es decir, sus alcances no solo se enfocaron en el área de investigación, pronto industrias como General Motors, Mercedes-Benz, Renault, Nissan, Toyota, Lockheed, McDonnell-Douglas, Dassault adoptaron estas herramientas como parte de sus departamentos de diseño. El precio de los sistemas CAD en estos años finales de los 70 rondaba los 125,000 US\$.

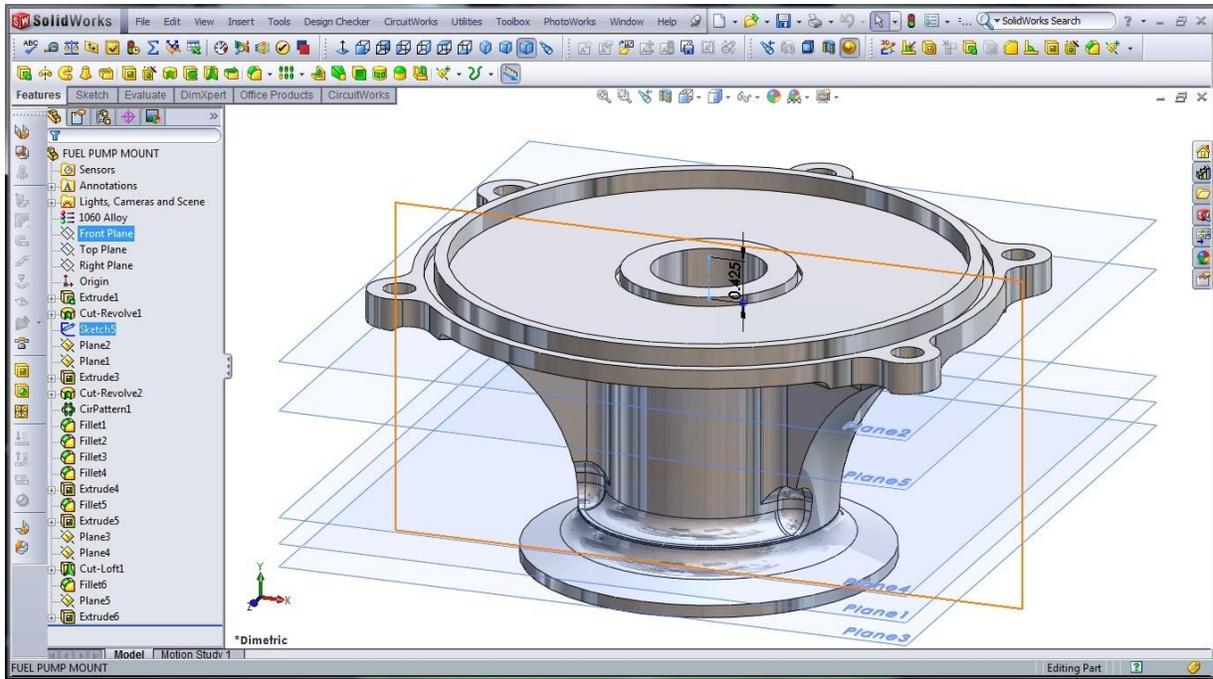
Con el paso de la década de los 80's y 90's, el software se convirtió paulatinamente en el reemplazo de los utensilios geométricos convencionales (reglas, compases restiradores, estilógrafos) para la producción de planos. Por consecuencia, nuevos proveedores de herramientas CAD surgieron en el mercado y por consiguiente, el costo de la implementación del software comenzó

a disminuir gradualmente. Con la popularización y acceso a las computadoras personales, además del rápido crecimiento de internet, en la década de los 90's el software CAD se volvió imprescindible en la industria, en tan variadas aplicaciones que van desde la industria metalúrgica, metalmecánica, automotriz, Aero espacial e incluso en industrias textiles y de diseño de modas.

Las herramientas CAD fueron la punta de lanza que abrió camino al desarrollo de más software que a la postre terminaron por ser complemento del diseño, a continuación, menciono una breve descripción del software CAD/CAM/CAE.

4.2.1. Herramientas Informáticas de diseño CAD.

Las siglas CAD son el acrónimo de "computer-aided design" (diseño asistido por computadora), software que básicamente permite la creación y visualización en 2D y 3D de un objeto. Esta paquetería informática también es capaz de agregar a un diseño predeterminado características específicas tales como: texturas, material e iluminación, esto comúnmente se conoce como **render**. Algunos campos más representativos de este tipo de software son: 1) En mecánica, para el diseño de maquinaria 2) en el área eléctrica para esquematizar conexiones y 3) en la ingeniería civil, para el diseño y conceptualización de estructuras.



*Figura 4.16. - Ensamble final de pieza metálica en software CAD SolidWorks.
Fuente: http://www.newdesignfile.com/postpic/2014/10/solidworks-3d-cad-models_132065.jpg*

4.2.2. Herramientas informáticas de diseño CAM.

Del inglés "computer aided manufacturing" (manufactura asistida por computadora), son software que funcionan como "puente" entre el software CAD en el que se diseñó la pieza y la máquina de control numérico (CNC) en el que se manufactura dicha pieza. Básicamente en este software el ingeniero realiza la selección de herramientas de desbaste, simulación de recorrido de la herramienta, cálculos de tiempos de maquinado y al final obtiene el código alfanumérico necesario para que la máquina CNC realice su proceso de maquinado. Actualmente el software CAM no solo se aplica a máquinas CNC de

desbaste como tornos, fresadoras o centros de maquinado, también es aplicado a impresoras 3D, siguiendo el mismo principio de simular el proceso y obtener el código alfanumérico.



Figura 4.17.- Simulación del mecanizado de una pieza metálica en software NX.

Fuente: <http://grupocarman.com/blog/tipos-de-software-cadcaecam/>

4.2.3. Herramientas Informáticas de diseño CAE.

Acrónimo de “Computed Aided Engineering” (Ingeniería Asistida por Computadora) es una clasificación de software que provee de grandes ventajas a la industria en general, su misión es analizar el modelo CAD desde el punto de vista de rentabilidad y funcionalidad. El software CAE es capaz de simular el objeto en condiciones de trabajo, es decir, se simulan fuerzas físicas a las que el

objeto será sometido después de su construcción. Gracias a esta herramienta es más fácil determinar la factibilidad de producción y desempeño de un producto antes de su industrialización.

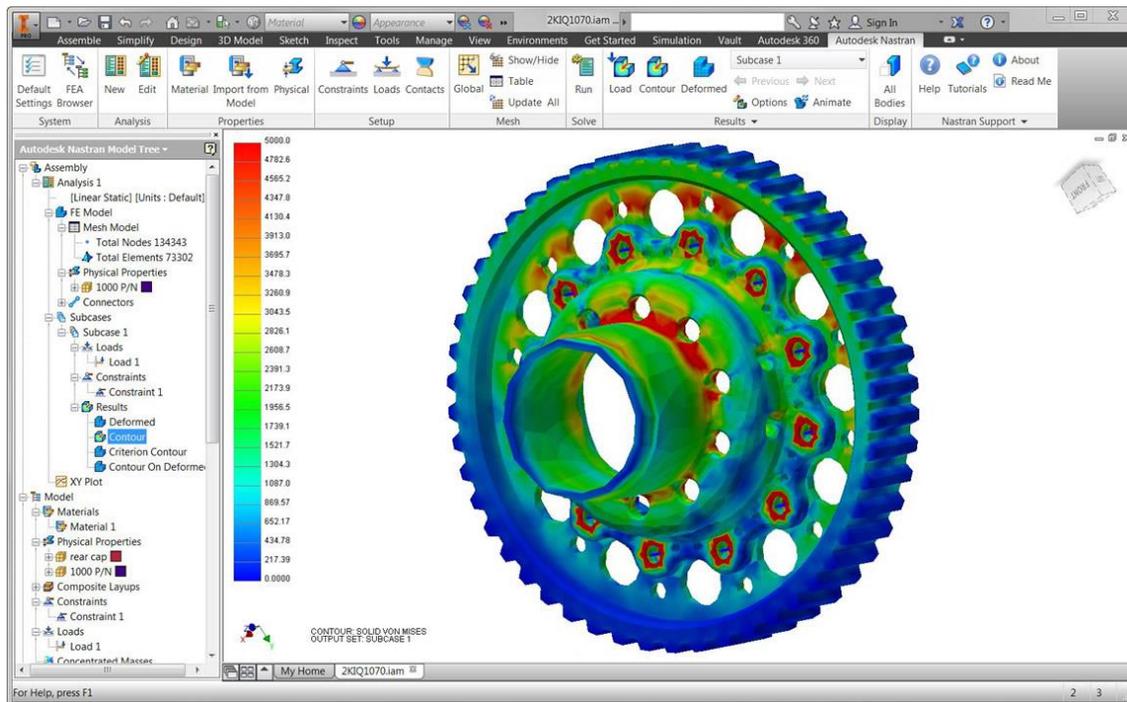


Figura 4.18.- Análisis de esfuerzos de un engrane en software Nastran.

Fuente: <http://www.semco.com.pe/web/cursos.jsp?idCurso=191>

Actualmente los líderes mundiales del mercado CAD/CAM, están en este orden:

1. Parametric Technology.
2. Dassault Systems.
3. EDS/Intergraph.
4. SDRC.
5. Autodesk.

4.3. Beneficios del diseño asistido por computadora.

A partir del desarrollo de las herramientas informáticas CAD/CAM/CAE, la industria en general ha obtenido importantes beneficios comerciales, solo por citar algunos:

- **Reducción en tiempos de desarrollo:** El tiempo que se toma en conceptualizar un producto terminado es menor, debido a que desde una etapa temprana de desarrollo es posible visualizar el producto terminado, incluso si así se requiere, es posible simular el funcionamiento del producto en cuestión.
- **Disminución de errores de diseño:** Gracias a que el software CAD permite visualizar un producto prácticamente en su estado final, es posible identificar errores potenciales y de esta manera corregirlos incluso antes de que un prototipo sea fabricado.
- **Optimización de materia prima:** Una de las mayores ventajas de visualizar un producto antes de su fabricación, es el poder hacer un cálculo exacto del material que dicho producto necesitará durante su construcción. Gracias a esto las industrias reducen costos de merma de materiales.
- **Reducción de costos de pruebas de ingeniería:** El software CAE es la opción más factible para llevar a cabo la simulación de un producto, ensamble o montajes, de esta manera, se puede tener un resultado preliminar muy fiable antes de hacer la inversión en prototipos y pruebas de un modelo físico. Las herramientas CAE ofrecen una amplia gama de aplicaciones y simulación para ingeniería, por ejemplo: Mecánica de fluidos, Resistencia de materiales, Simulación de Movimiento; Simulación

de líneas de montaje, Circuitos eléctricos, Procesos químicos y termodinámicos etc. Es evidente que con la información provista por un software CAE, la construcción de prototipos se hace de una forma más precisa, con un menor costo y con tiempos de fabricación muy competitivos.

- **Optimización de líneas de producción:** Software como DELMIA, ARENA, FLEXIM (por mencionar solo algunos) son Simuladores que permiten crear cadenas de montaje virtuales. La información derivada de un simulador de procesos industriales permite un análisis más exacto de tiempos y movimientos, balance de estaciones de ensamble, cadenas de suministro, logística etc. Con estos posible la optimización de la línea de ensamble incluso antes de que el producto llegue a su etapa final de diseño. Los beneficios económicos son significativos, pues se puede reducir riesgos de accidente, mudas en el proceso y se puede simular el balanceo de cada estación a lo largo de la línea de ensamble, logrando que el producto final tenga un valor agregado durante cada una de las etapas de su construcción.
- **Competitividad:** Las condiciones actuales del mercado globalizado, demandan a las empresas a ofertar productos innovadores con altos estándares de calidad, precios competitivos y cortos tiempos de entrega. La implementación de herramientas informáticas de diseño, proveen a las empresas de información fidedigna de la apariencia, funcionamiento y desempeño de sus productos incluso antes de que este sea manufacturado, gracias a esta versatilidad en el diseño, las empresas pueden satisfacer las demandas del mercado en tiempo y con costos

razonables para el cliente final. Sin el uso del software CAD/CAM/CAE, algunas empresas se ven limitadas en el alcance e impacto que su producto pudiera tener en el mercado.

4.4. Distribución de habitáculo del motor trasero.

La disposición de motor trasero es la opción reinante en el segmento de autobuses foráneos (de trayectos largos), dada la necesidad de que el autobús recorra la mayor distancia posible en cada viaje, los carroceros optan por este arreglo de motor para potenciar el ahorro de combustible, bajar los costos de mantenimiento y asegurar el confort y seguridad de los pasajeros.

A diferencia de un automóvil, la tracción y motor traseros favorecen al autobús por la distribución del peso. El arreglo de motor trasero en un automóvil proporciona una mayor potencia, por otro lado, reduce la estabilidad del vehículo en la parte frontal. En el caso de un autobús, el problema de la estabilidad se minimiza por causa de que este posee una distancia entre ejes mucho mayor que un automóvil, aunado a esto, el peso de la carrocería es mayor y además contribuye a que en la parte frontal se minimice la inestabilidad. Sumado a estas ventajas, la tracción trasera proporciona mayor potencia al vehículo.

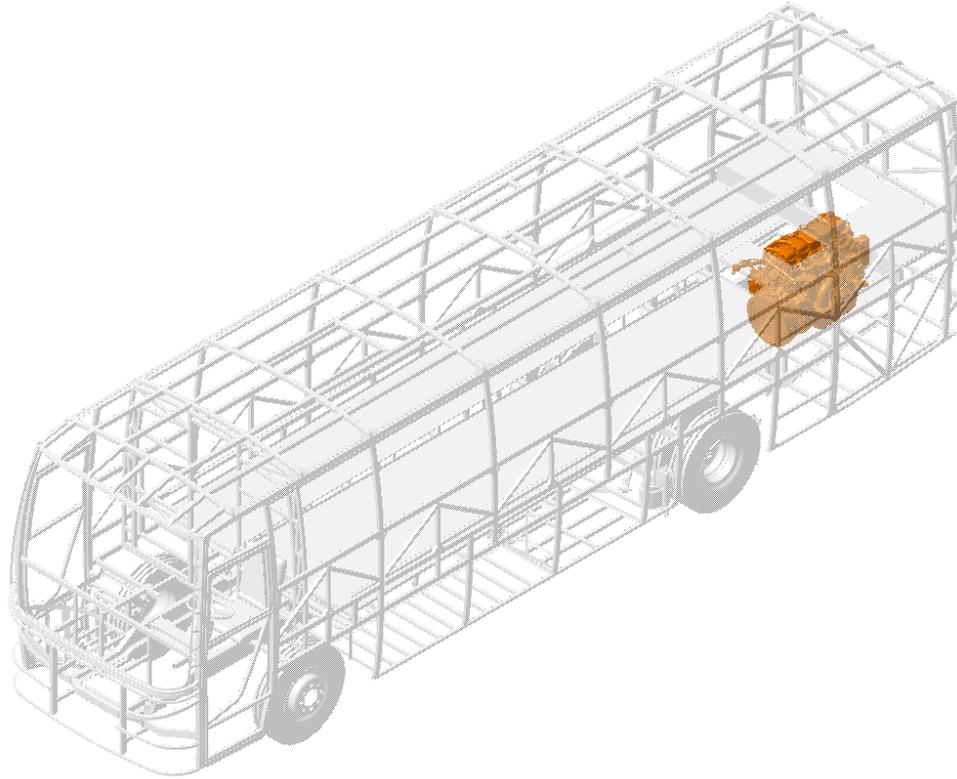


Figura 4.19. - Ubicación del motor en el área trasera en un autobús 4x2.

Fuente: Autor.

A pesar de que un autobús es un vehículo que en apariencia posee más espacio que un automóvil, también en este se trata de optimizar el mayor espacio posible, por lo tanto, en el habitáculo del motor (ya sea trasero o delantero) se montan componentes diversos que son necesarios para su buen funcionamiento, pero reducen el espacio dentro del ya mencionado habitáculo, por lo tanto, la circulación de aire frío que puede minimizar la transferencia de calor se ve mermado. En la figura 4.20 se muestra la distribución de los componentes visto desde la parte trasera del autobús foráneo, como se puede notar, el espacio entre motor y carrocería es pequeño. Por mencionar solo algunos componentes ubicados en el área del motor tenemos:

- Radiador.
- Transmisión.
- Compresor de aire.
- Catalizador de partículas.
- Arneses de potencia.
- Filtro de aire.



Figura 4.20. - Motor y otros componentes en el compartimiento motor trasero. en el lado derecho se observa el radiador, al centro el motor y en el lado izquierdo el compresor y ducto de aire de admisión.

Fuente: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/passenger-autobús-for-sale-gdw6840k-30-seater-coach-654939811.html>

Para hacer frente a un espacio reducido en el que se tiene una fuente de calor continuo, la carrocería se aísla con materiales que reducen el paso del calor y

ruido hacia la zona de pasajeros. De lo contrario los materiales alcanzarían en algún punto del recorrido el equilibrio térmico con la temperatura emanada del motor, que alcanza un rango de 90°C a 100°C en la periferia del motor.

El arreglo de los aislantes será analizado en los próximos subtemas. La configuración básica en un autobús se puede ver con mayor detalle en la figura 4.21, en la cual se muestra la sección transversal del compartimiento motor. Se puede observar el arreglo típico de un compartimiento de motor trasero **1) motor diésel**, **2) estructura tubular (perfiles rectangulares)**, **3) Piso interior de la unidad (madera o materiales compuestos)**, **4) material aislante interior**, **5) material aislante exterior (opcional)**.

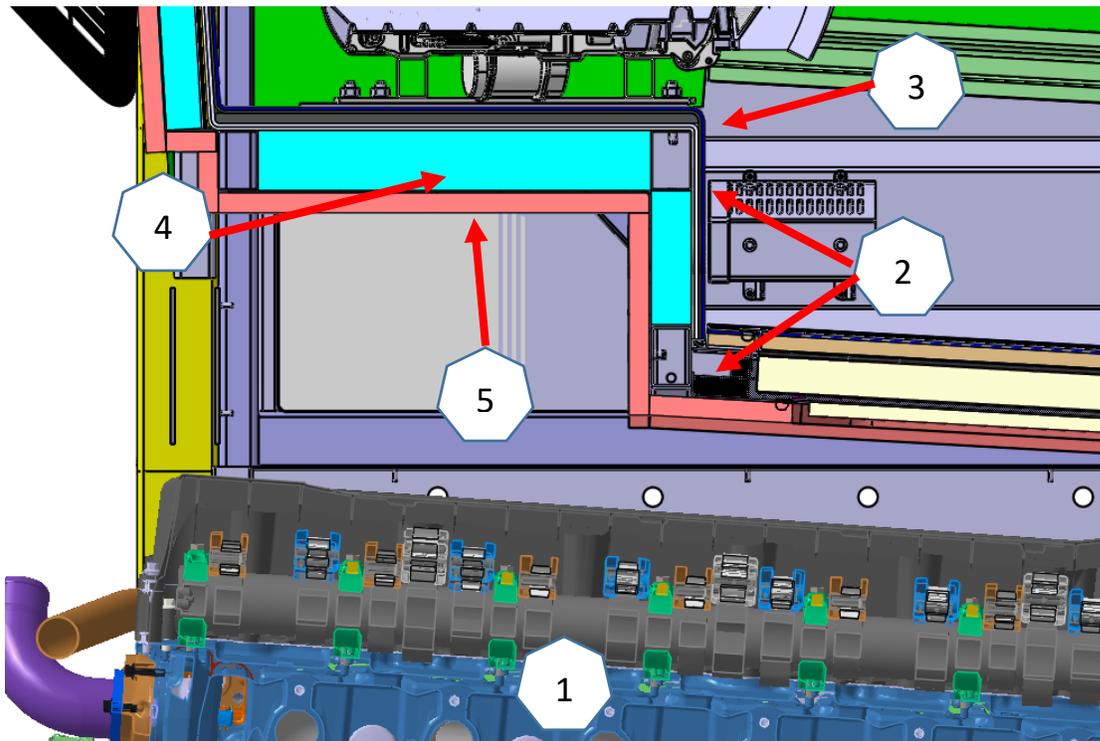


Figura 4.21. - Sección transversal tridimensional de habitáculo motor trasero.

Fuente Autor.

La anterior imagen es un arreglo convencional de banca trasera construida con perfil tubular rectangular de diversos espesores y medidas. En la parte baja (la cara que da al motor) se coloca una laminación de espesor delgado, que sirve como pared cortafuegos, proporcionando una base para el aislante interior y exterior. Al ser un arreglo tubular, quedan huecos entre los perfiles, este espacio se rellena con material aislante termoacústico, en la figura 4.22 muestro este arreglo. Al centro, el rectángulo anaranjado presenta la escotilla de mantenimiento para el motor, también es aislada térmicamente.

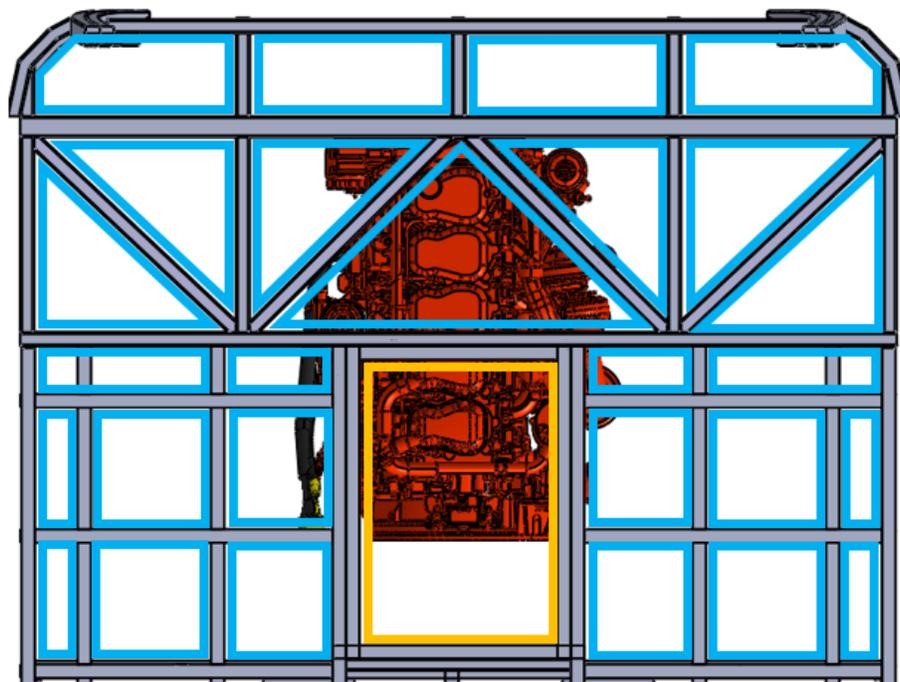


Figura 4.22. - Vista superior de la banca trasera, los huecos azules ejemplifican el material de aislamiento. En color rojo se ve el motor.

Fuente: Autor.

El piso interior se fabrica generalmente en madera por la relación de precio y sus capacidades de aislamiento³⁹, el piso se recubre con piso vinílico. Con la llegada de materiales compuestos se abren más opciones de pisos ligeros y con buenas prestaciones de resistividad térmica.

Los materiales aislantes en la banca trasera varían en su composición y espesor, la elección está intrínsecamente ligada a su costo y desempeño.

³⁹ En la actualidad, el piso de madera se comienza a reemplazar por materiales compuestos tales como plásti-maderas, honey-comb o paneles plásticos con núcleo de espuma.

CAPITULO II
RESULTADOS

5. CÁLCULO DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL HABITÁCULO MOTOR AL SALÓN DE PASAJEROS A TEMPERATURA DE OPERACIÓN DE 90° POR CONVECCIÓN Y CONDUCCIÓN.

Para comenzar con el análisis se empleará la metodología propuesta en el libro “*Fundamentos de transferencia de calor*”⁴⁰ en su página 22, donde se plantean los siguientes pasos a seguir para un análisis de transferencia de calor:

- *Lo que ya se conoce*: Planteamiento del problema y breve descripción.
- *Encontrar*: Plantear concisamente a que se pretende llegar.
- *Esquemas*: Esquemas del sistema físico. Esquematizar los métodos de transferencia de calor.
- *Suposiciones*: Enlistar las suposiciones de simplificación pertinente.
- *Propiedades*: Reunir los valores de las características necesarias para el análisis.
- *Análisis*: realización de cálculos basado en las ecuaciones necesarias. Desarrollar el análisis lo más completo posible antes de la sustitución de valores.
- *Comentarios*: Análisis de resultados obtenidos y comparación con las suposiciones iniciales.

⁴⁰Frank P. Incropera, David P. DeWitt “Fundamentos de transferencia de calor” Cuarta Edición Ed. Prentice hall.

5.1. Planteamiento del problema.

En el capítulo 3 de esta obra se ha tocado el tema del funcionamiento de las máquinas de combustión interna. El calor emanado de un motor diésel en un autobús se transfiere a otras zonas del vehículo a través de la convección del aire que se encuentra en la zona motor y a su vez por la acción de la conductividad térmica en la estructura metálica y los componentes aledaños a esta. El mayor problema se suscita cuando el calor se hace evidente en las áreas que están en contacto con los pasajeros, causando problemas que van desde reclamos del usuario hasta conatos de incendio en la zona motor.

5.1.1. Objetivo del análisis.

El objetivo principal es analizar de transferencia de calor en un autobús de motor trasero de 13lt, de esta manera concluir que tan apropiado es el material aislante, así como proponer métodos para impedir un aumento de temperatura en la zona trasera.

5.1.2. Esquemas.

Debido a que dentro de un habitáculo del motor no tenemos superficies completamente planas, ni geometrías simples, el análisis de transferencias de calor se realizará tomando una sección del ensamble del habitáculo y considerándolo como una pared multicapa plana con un área de 0.5 m^2 . El motor de igual manera será considerado como un cuerpo emisor de calor de geometría plana uniforme. Para entender, más claramente el arreglo de los materiales en

un primer caso y el tránsito del calor a través de ellos, en la figura 4.23 se esquematiza el arreglo que se analizará en esta tesis, esta combinación de materiales es usada frecuentemente por los carroceros, cabe aclarar que los materiales varían dependiendo del requerimiento del diseño (material, geometría de la estructura, espacio disponible, etc.).

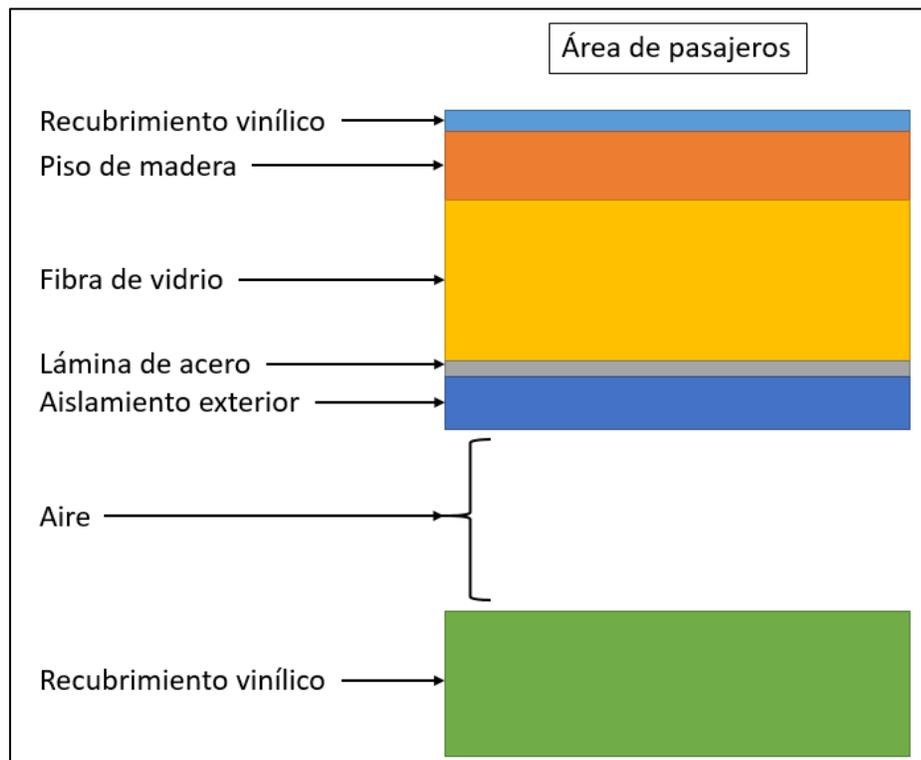


Figura 4.23. - Arreglo del ensamblado banca trasera visto como una pared multicapa.

Fuente: Autor.

5.1.3. Suposiciones.

Para la realización de este análisis se tomarán en cuenta las siguientes suposiciones:

- Condiciones de estado estable.
- Conducción unidimensional en la pared multicapa.
- Conductividad térmica constante en la pared multicapa
- Transferencia por radiación despreciable.

5.1.4. Propiedades.

A continuación, en la tabla 4.1 se enlistan las propiedades de transferencia de calor, así como el espesor de cada capa de material propuesto.

Tabla 4.1. - Coeficientes de conductividad térmica de una pared multicapa.

Fuente: Autor.

Material	Coeficiente de transferencia $\frac{W}{(m)(C^{\circ})}$	Espesor (m)
Linóleum	0.17	0.003
Madera	0.14	0.014
Fibra de vidrio	0.04	0.04
Acero	17	0.002
Caucho EPDM	0.25	0.01

Las temperaturas que se considerarán para este análisis serán las siguientes:

- 90 °C para la zona de motor.
- 22 °C como temperatura ideal para la zona pasajeros.

En el área motor se alcanzan diferentes temperaturas como se muestra en la figura 4.24. Se ha decidido tomar como temperatura crítica 90 °C debido a que, en una operación continua⁴¹, el motor alcanza mayores temperaturas que las que se muestran en la ya mencionada imagen. En el área de pasajeros, se pretende tener 22 °C para mayor confort de los usuarios.



Figura 4.24. - temperaturas de motor diésel Volvo de 13lt. Medición realizada con pirómetro digital.

Fuente Autor.

Debido a que el arreglo multicapa se encuentra entre dos flujos de aire, será necesario calcular el coeficiente de convección para el aire a 90 °C y 22 °C. para

⁴¹ Este dato se puede obtener midiendo la temperatura del aceite del motor. Es muy cierto que dentro de la cámara de combustión el rango de temperatura es mucho mayor (la temperatura de la flama ronda aproximadamente los 2500°C) sin embargo, este calor es disipado por el sistema de enfriamiento de la unidad.

este cálculo se procedió a medir la velocidad del aire en ambas caras de la pared multicapa con la ayuda de un anemómetro digital, como se muestra en la figura 4.25.



Imagen 4.25. - Velocidad del aire en el área pasajeros (derecha) y compartimiento motor (izquierda).

Fuente Autor.

Las lecturas registradas son las siguientes:

- Zona pasajeros 0.15 m/s
- Compartimiento motor 1.39 m/s

En la tabla 4.4 del anexo se muestran las propiedades del aire a diferentes temperaturas. Por interpolación⁴² obtenemos los valores de la densidad, calor específico y número de Prandtl para 22 °C. Los valores correspondientes a 90° ya están dados:

Tabla 4.2.- Propiedades del aire a 22 °C y 90 °C.

Fuente: Autor.

Temperatura del aire (°C)	Densidad (ρ). $\frac{Kg}{m^3}$	Calor específico (c_p)	Numero Prandtl (Pr).
22	1.196	1,007	0.73038
90	0.9718	1,008	0.7132

Se considera que el flujo de aire se desplaza en cada capa en un área de $0.5 m^2$. Consideremos una fuerza total de resistencia de 0.86 N para ambas capas. Para cada cara de la pared la resistencia es equivalente a la fuerza de fricción, por lo tanto, es posible deducir el coeficiente de convección h para el aire a 22°C por medio de la ecuación de fricción de un fluido:

$$F_f = C_f A \frac{\rho V^2}{2} \quad \text{Ec 4.1}$$

Despejando la incógnita C_f y sustituyendo:

⁴² <https://www.easycalculation.com/es/analytical/linear-interpolation.php>

$$C_f = \frac{F_f}{\rho AV^2/2} = \frac{0.86N}{\left(1.196 \frac{Kg}{m^3}\right) (0.5 m^2) (0.15 \frac{m}{s})^2/2} = 127.83$$

A partir de la analogía modificada de Reynolds ⁴³, podemos deducir ahora el coeficiente de convección h :

$$h = \frac{C_f \rho c_p}{2Pr^{2/3}} = \left(\frac{127.83}{2}\right) \left(\frac{\left(1.196 \frac{Kg}{m^3}\right) \left(0.15 \frac{m}{s}\right) \left(1007 \frac{J}{Kg \cdot ^\circ C}\right)}{0.73078^{2/3}}\right) \text{ Ec. 4.2}$$

$$= 14237.9 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C$$

Al repetir el mismo procedimiento para el aire a 90 grados obtendremos un coeficiente de convección de $1562.26 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ C$.

⁴³ Y. A. Çengel, & A. Ghajar, Transferencia de Calor y Masa, Fundamentos y Aplicaciones (pág. 402). México: McGraw Hill.

Tabla 4.3. - Coeficientes de Película, conductividad térmica por convección del aire.

Fuente: Autor.

Fluido	Temperatura (°C)	Coeficiente de transferencia por convección (h) $W/m^2 * °C$
Aire	90	1562.26
	22	14237.9

El análisis se lleva a cabo en un área de $0.5 m^2$.

5.1.5. Análisis.

El calor que emite el motor se transfiere a la estructura que lo rodea por medio de un proceso convectivo. Las partículas del fluido adyacentes a la estructura situada sobre el motor transfieren su energía calórica por conducción y posteriormente se repite este mismo proceso entre cada capa de material de la banca.

En la figura 4.26 se observa el tránsito teórico del flujo de calor desde una temperatura inicia (T_i) hasta llegar a la temperatura interna en el área de pasajeros (temperatura final ideal T_f). Al tratarse de una pared multicapa cada capa de material funge como una pared unitaria con una temperatura de inicio y

una temperatura final, el resultado final es la diferencia de temperaturas de inicial y final (Ecuación 4.3).

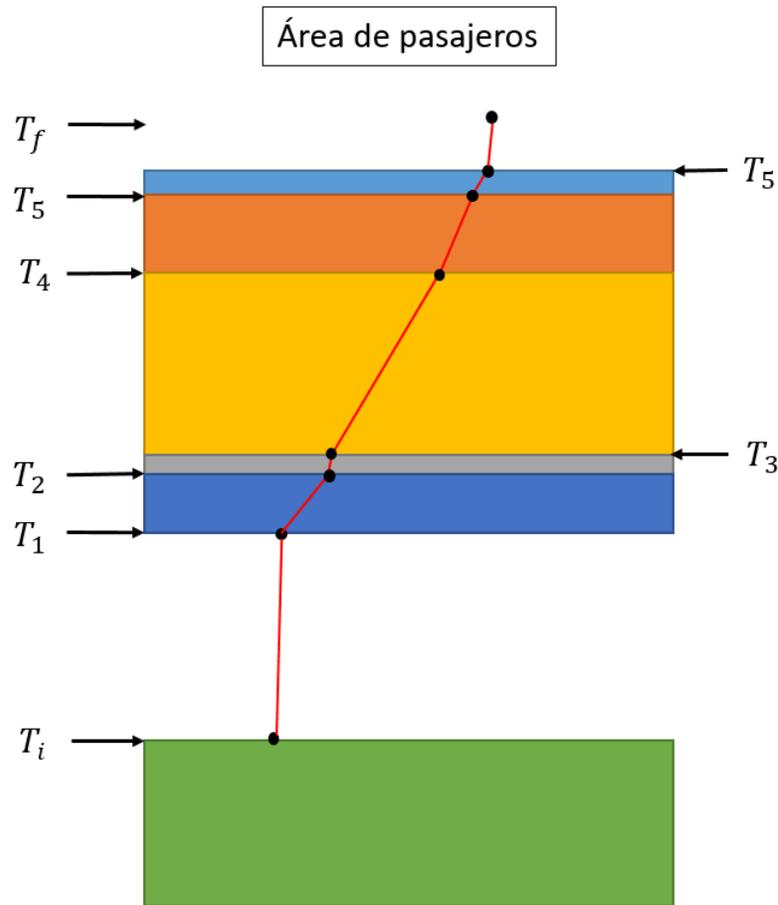


Figura 4.26. – Recorrido del flujo de calor a través de la pared multicapa de aislamiento.

Fuente: Autor.

Ahora bien, para el cálculo del flujo de calor a través de una pared multicapa plana partimos de la ley de Fourier (ecuación 1.3), sin embargo, se debe aplicar a cada capa de material, de modo que la ecuación para el flujo de calor a través de las capas queda de la siguiente manera:

$$Q = \frac{T_i - T_f}{\Sigma R_{n+1}} \quad \text{Ec. 4.3}$$

En dicha ecuación ΣR_{n+1} representa la sumatoria de todas las resistencias térmicas de la pared multicapa. En este caso tenemos 5 capas de material más dos coeficientes de convección h_1 y h_2 , interior y exterior, la igualdad queda de la siguiente manera:

$$Q = \frac{T_i - T_1}{\frac{1}{A \cdot h_1}} + \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{A \cdot k_1}} + \frac{T_2 - T_3}{\frac{e_2}{A \cdot k_2}} + \frac{T_3 - T_4}{\frac{e_3}{A \cdot k_3}} + \frac{T_4 - T_5}{\frac{e_4}{A \cdot k_4}} + \frac{T_5 - T_6}{\frac{e_5}{A \cdot k_5}} + \frac{T_6 - T_f}{\frac{1}{A \cdot h_2}} \quad \text{Ec. 4.4}$$

Simplificando la ecuación tomando solamente como numerador al ΔT , es decir, la diferencia de temperatura interior en el compartimiento motor y la temperatura del área de pasajeros $T_i - T_f$:

$$Q = \frac{T_i - T_f}{\frac{1}{A \cdot h_1} + \frac{e_1}{A \cdot k_1} + \frac{e_2}{A \cdot k_2} + \frac{e_3}{A \cdot k_3} + \frac{e_4}{A \cdot k_4} + \frac{e_5}{A \cdot k_5} + \frac{1}{A \cdot h_2}} \quad \text{Ec. 4.2}$$

Para la sustitución de valores retomaremos como temperatura crítica inicial (T_1) 90 °C y como temperatura final (T_2) 22 °C y un área de 0.5 m², por otra parte, las conductividades térmicas y sus respectivos espesores ya se han expuesto en la tabla 4.1, por lo tanto:

$$Q = \frac{90^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}}{\frac{1}{(1) \cdot (14237.9)} + \frac{(0.01)}{(1) \cdot (0.25)} + \frac{(0.002)}{(1) \cdot (17)} + \frac{(0.04)}{(1) \cdot (0.04)} + \frac{(0.014)}{(1) \cdot (0.14)} + \frac{(0.003)}{(1) \cdot (0.17)} + \frac{1}{(1) \cdot (2171.54)}}$$

Las resistencias asociadas a cada capa son las siguientes:

Tabla 4.4. – Valores de la resistencia térmica de cada material.

Fuente: Autor.

	Capa de material						
	Aire interior	EPDM	Acero inoxidable	Fibra de vidrio	Madera	Linóleum	Aire exterior
Resistencia $\frac{W}{(m)(C^{\circ})}$	1.00014	0.08	0.00023	2	0.2	0.035	0.00092

La tabla 4.3 muestra que la capa número 3, constituida por fibra de vidrio, es la que opone más resistencia al paso de calor, seguida de la capa de EPDM.

Simplificando:

$$Q = \frac{68^{\circ}C}{0.00014 + 0.08 + 0.00023 + 2 + 0.2 + 0.025 + 0.00092}$$

$$Q = \frac{68^{\circ}C}{2.31} = 29.35 W$$

El arreglo analizado posee un flujo de calor de 29.36 W a través de la pared multicapa. Con este dato es posible calcular el coeficiente global de transferencia

$U = \left[\frac{W}{m^2 \cdot ^{\circ}C} \right]$, obtenido a partir de la siguiente igualdad:

$$Q = UA(T_i - T_f) \quad \text{Ec. 4.4}$$

Despejando U:

$$U = \frac{Q}{T_i - T_f} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Al sustituir valores:

$$U = \frac{29.36W}{90^\circ\text{C} - 22^\circ\text{C}} = 0.43 \frac{W}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}}$$

El coeficiente global de transferencia de calor U nos permite saber la resistividad térmica total de la pared multicapa por unidad de área en este caso es de $0.43 \frac{W}{\text{m}^2 * ^\circ\text{C}}$. Recordemos que entre más alto sea el valor de la resistencia térmica, mejor aislado quedará nuestro ensamble.

Con los anteriores valores, nos es posible expresar el flujo de calor entre cada capa de material, de esta manera podemos obtener las temperaturas de cada superficie. Para obtener T_1 utilizamos la siguiente igualdad:

$$Q = \frac{T_i - T_1}{\frac{1}{h_1}} \quad \text{Ec. 4.5}$$

Despejando T_1 y sustituyendo los valores correspondientes:

$$T_1 = T_f - \left(\frac{Q}{h_1}\right) = 90 - 0.000103$$
$$T_1 = 89.98^\circ\text{C}$$

En la figura 4.26 podemos ver que la temperatura T_1 está situada al inicio de la pared multicapa. Por lo tanto, desde la fuente de calor hasta la primera capa

tenemos una disminución aproximada de 0.01°C. Esta disminución se debe a tres factores principales:

1. Distancia del motor a la pared multicapa.
2. Tipo de convección que se da entre el motor y la pared multicapa.
3. La velocidad y temperatura del aire.

Para las capas consecutivas, utilizaremos una igualdad similar a la ecuación 4.5, sin embargo, sustituiremos el coeficiente de película por la resistividad térmica de cada material:

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{e_1}{k_1}} \quad \text{Ec. 4.6}$$

Despejando e_1 y sustituyendo los valores correspondientes:

$$T_2 = T_1 - \left[(Q) \left(\frac{e_1}{k_1} \right) \right] = 89.98 - 2.34$$
$$T_2 = 87.63 \text{ } ^\circ\text{C}$$

La temperatura T_2 muestra la primera caída de temperatura a través de un aislante, en este caso la temperatura ha caído 2.34 grados. Continuando con el cálculo de temperaturas para cada capa de material, tenemos los siguientes resultados en cada superficie:

Tabla 4.5. – Distribución de temperaturas en cada capa de material.

Fuente Autor.

	Temperatura en cada capa							
	T_i	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_f
Temperatura (°C)	90	89.98	87.63	87.62	28.92	23.05	22.02	21.9

La tabla 4.4 nos demuestra que la fibra de vidrio nos provee una importante caída de temperatura, por otra parte, constatamos que el acero no opone mucha resistencia al paso de calor debido a su espesor y su alto coeficiente de conductividad, este material funge como una pared corta fuegos más que como parte de una solución de aislamiento.

5.1.6. Comentarios del análisis.

Bajo las condiciones de operación antes descritas, el aislamiento tiene un buen desempeño especialmente en la zona de la fibra de vidrio. En general mantiene un flujo de calor moderado considerando las temperaturas iniciales del motor.

En el anexo 2 se muestra diferentes tipos de fibra de vidrio, en función de su densidad, la fibra de vidrio puede proveer mayor aislamiento con un mismo espesor.

Otro factor considerable son los coeficientes de convección del aire. En la tabla 4.2 podemos notar que las propiedades del aire a temperatura de 22 y 90 °C no cambian de manera sustancial. En este caso queda demostrado que la velocidad del viento es el factor que nos determina el flujo de calor que tendremos en la capa de aire adyacente a la pared multicapa. En el lado de la pared calentado a 90 °C, mismo que presenta una mayor velocidad del flujo de aire tenemos un menor coeficiente de convección, en el lado opuesto donde el aire tiene temperatura de 22 °C el coeficiente es más elevado. Por lo tanto, podemos concluir que, a mayor flujo de aire, menor es la transferencia entre el fluido y el sólido.

Como se comentó en el subtema 2.2, el espesor en el aislamiento juega un papel muy importante. La primera capa de aislamiento correspondiente a la espuma EPDM, presenta un bajo desempeño a pesar de tener un coeficiente de transferencia de calor bajo. Si el espesor de esta capa incrementa al doble, se habría alcanzado una reducción de 4.5 °C en esta primera capa.

CAPITULO III
ANÁLISIS DE RESULTADOS Y SICUSIÓN

6. PROPUESTA Y RECOMENDACIONES PARA AISLAR TÉRMICAMENTE EL ALOJAMIENTO DE MOTORES DIÉSEL EN AUTOBUSES URBANOS Y FORÁNEOS.

Como resultado de este análisis he extraído las conclusiones que se detallan a continuación a manera de recomendaciones y propuestas para aislar térmicamente el compartimiento motor:

6.1. Diseño de la banca trasera.

Tomando como base la información del subtema 4.5, con el objetivo de minimizar la transferencia de calor se recomienda tomar en cuenta los siguientes puntos para el diseño de una banca trasera:

1. La estructura tubular de la banca debe quedar lo más alejado del motor, esto permitirá que haya un mayor espacio en el que el aire fungirá como la primera capa de aislamiento. Recordemos que después del vacío, el aire es uno de los mejores aislamientos, con una conductividad térmica de aproximadamente $0.26 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, desde la perspectiva económica, este es el mejor aislamiento disponible. Una mayor presencia de aire en el compartimiento motor no significa que este será enfriado mediante aire. Esta recomendación se debe tomar en cuenta siempre y cuando no se afecte la ergonomía del ensamble en el área de pasajeros.
2. El espacio adicional permitirá que la capa exterior de aislamiento sea más gruesa (figura 5.1) y por lo tanto su desempeño aumentará.

3. Como se sabe, las estructuras generalmente son de perfiles tubulares de acero, este material es un conductor nato, no es recomendable hacer uso de otro material estructural por los costos de éste y de ensamble que podría acarrear, sin embargo, la sección central del perfil puede ser adicionada con espumas de poliuretano de alta densidad (anexo tabla 2 Poliuretanos tipo IV-V), esta adhesión de material proveerá mayor resistividad térmica al ensamble.
4. Por cuestiones de calidad y sobre todo de seguridad, la estructura tubular debe tener una laminación corta fuegos. Esta laminación también sirve de soporte a los demás materiales de aislamiento.
5. Finalmente, el ensamble debe ser sellado en su totalidad, cualquier espacio abierto permitirá que el aire caliente pase al área de pasajeros. Se recomienda el uso de sellos resistentes al fuego.

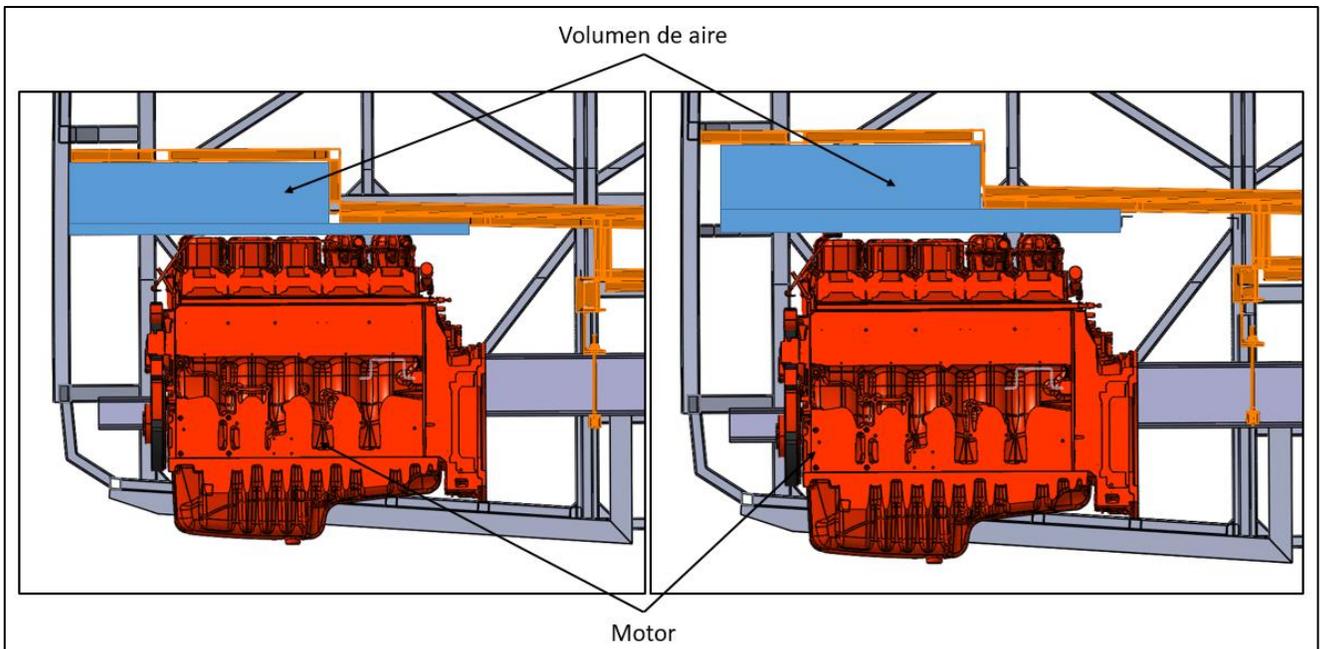


Figura 5.1. – Un mayor espacio entre estructura y motor permitirá un mayor flujo de aire. A la izquierda se muestra un espacio reducido entre motor y estructura. A la derecha tenemos el mismo ensamble, pero con mayor separación entre componentes.

Fuente: Autor

6.2. Selección de aislamiento.

En el capítulo dos se ha hablado sobre las opciones más sobresalientes que se ofertan en el mercado de materiales aislantes. Muchos de estos materiales tienen una amplia gama de aplicaciones en mercados muy diversos, desde la electrónica hasta la aeronáutica.

Sin duda alguna, el sector automotriz es de los más exigentes en cuanto a estándares de calidad y seguridad, por esta razón el cálculo, selección e

implementación de aislamiento debe apegarse a normas específicas nacionales e internacionales tales como la Norma FMVSS 302 (Federal Motor Vehicle Safety Standard) referente la resistencia que un material opone a la combustión.

En el caso específico de la industria carrocería de autobuses, la selección del aislamiento térmico de motores debe ser sometido a los siguientes criterios:

1. Conductividad térmica: Es evidente que al elegir un material como aislamiento se deba hacer en función de su conductividad térmica (o factor R), por otro lado, no siempre el material con mayor resistividad puede ser la mejor opción puesto que si el rango de operación es menor a la capacidad de aislamientos, entonces el material estará sobre especificado, por lo tanto, se tendrá un costo adicional no necesario. En el caso contrario, si se elige un material con una baja resistividad y el rango de temperatura de operación es mayor, el aislamiento fallará con consecuencias que irían desde un sobre calentamiento hasta un conato de incendio según sea la aplicación.
2. Estructura del autobús: Concerniente a este punto, se debe tomar en consideración el arreglo que tiene el habitáculo del motor, dicho de otra manera, el diseño de la estructura. La razón fundamental de mencionar este punto es que no todo el material tiene una presentación comercial o el proceso de instalación adecuado para ser montado en la estructura de un autobús. Por citar un ejemplo, los aislantes de origen mineral por lo general se venden en presentaciones de bloques rígidos, esta condición dificultaría su instalación en una superficie irregular (Figura 4.21,

componente número 5). En este caso, una espuma flexible auto adherente sería una opción más viable, aunque más cara. En los huecos de la estructura (figura 4.22) una espuma flexible auto adherente no sería recomendable, para rellenar los espacios es más recomendable el uso de cortes de material a partir de bloques rígidos o semirrígidos.

3. Presentación del material: con respecto al punto anterior, el material se selecciona con base en su presentación comercial, ya sea en espuma flexible, espuma rígida, láminas, bloques, fibras, espesor de material etc. Indudablemente la presentación comercial de un material influye en su costo, sin embargo, también afecta el tiempo de instalación del aislante en la unidad, pues se agregan procesos de corte, pegado, ajuste e instalación.
4. Costo del material: El costo del material siempre va a impactar al costo del producto final. En este caso la selección se debe llevar a cabo a partir de un estudio de las condiciones en las que va a operar una pared de aislamientos, es decir, se debe considerar los rangos de temperatura de operación, proceso de aplicación del material, tiempo de operación, gastos de logística y almacenamiento.

6.3. Equilibrio térmico.

Se define al equilibrio térmico como “el estado en que dos cuerpos en contacto mecánico, o separados por una superficie conductora, igualan sus temperaturas inicialmente dispares, debido a la irradiación de calor de uno hacia el otro hasta alcanzar un balance”⁴⁴. Se ha planteado desde el primer capítulo de esta obra,

⁴⁴ <https://concepto.de/equilibrio-termico/#ixzz5y6FI0pLa>

que hay un intercambio de energía calórica si y solo si hay una diferencia de temperaturas. Cuando las temperaturas de los cuerpos en un sistema alcanzan el equilibrio térmico se detiene la transferencia de calor entre los objetos.

Un factor que influye en el diseño de un autobús de manera determinante, es la zona geográfica en la que la unidad dará servicio. Los factores climáticos influyen en la selección de los equipos de aire acondicionado, calefacción y selección de aislamiento térmico-acústico. El diseño de un autobús debe considerar que en zonas templada y frías, el aislamiento en las paredes laterales deberá tener un factor de conductividad bajo, de esta manera se reducirá la pérdida de calor en la cabina de pasajeros.

En áreas geográficas cálidas, bajo condiciones de poca humedad de aire la carrocería absorberá más calor y el efecto de enfriamiento por convección será menor debido a la temperatura y velocidad del aire. Si el aire acondicionado de la unidad no provee un adecuado desempeño, el piso de pasajeros en la zona del motor incrementará su temperatura provocando una sensación de incomodidad en los usuarios.

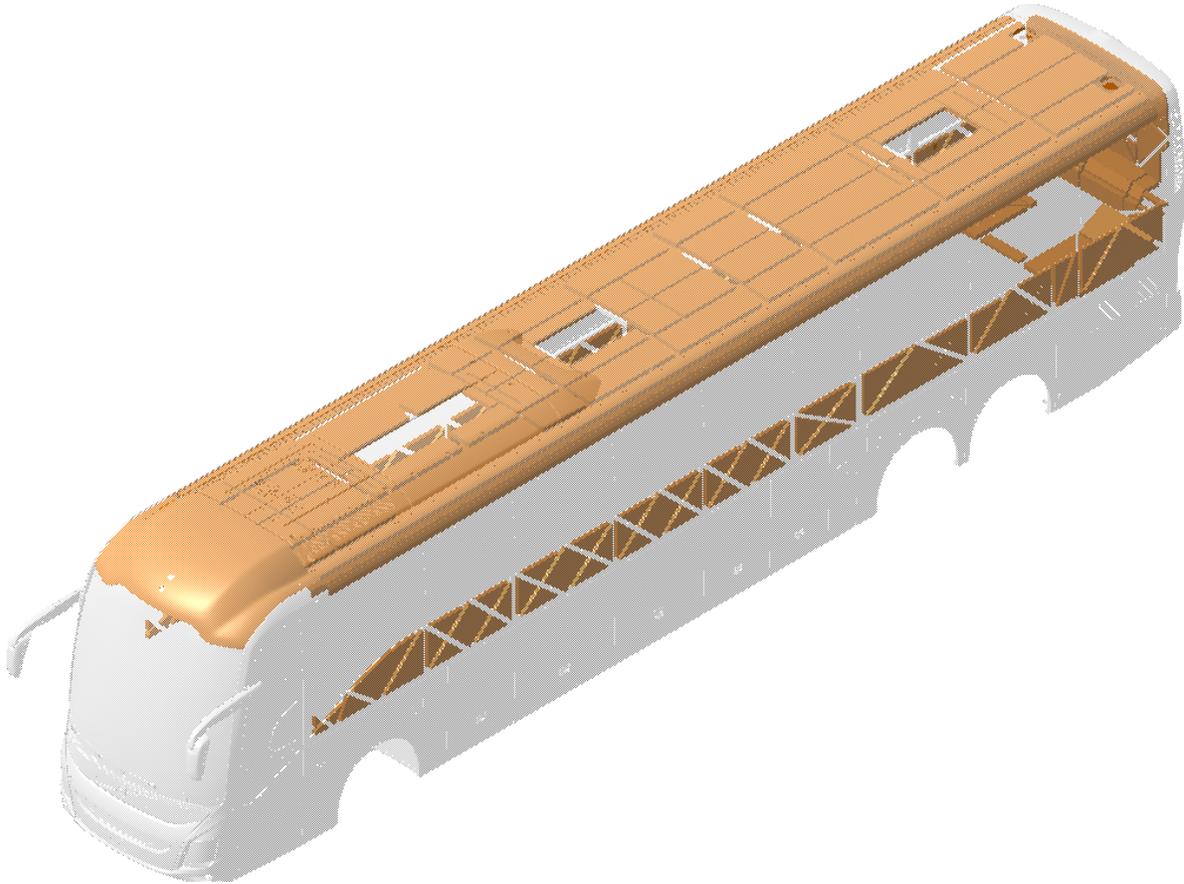


Figura 5.2. – arreglo tridimensional del aislamiento en paredes, toldo y estructura trasera de un autobús foráneo (CATIA V5).

Fuente: Autor.

Recordemos que un aislante es un material que opone resistencia al paso de calor, sin embargo, esto no significa que anula por completo el intercambio de calor entre objetos, por lo tanto, bajo condiciones como una conducción unidireccional y continua un aislante puede alcanzar el equilibrio térmico con respecto a una fuente de calor.

Tomando como base los párrafos anteriores, se plantean las siguientes recomendaciones:

1. En etapas tempranas del diseño, es recomendable tomar en consideración el promedio de temperatura de la zona geográfica en la que el autobús proveerá servicio. La selección de un adecuado material aislante tiene impactos directos en el costo y desempeño del producto.
2. Para climas cálidos se debe seleccionar un sistema de aire acondicionado que proporcione un flujo de aire continuo en toda la unidad (figura 5.3). Debido a la longitud de un autobús los ductos a lo largo de este deben ser sellados con el fin de evitar pérdidas en la presión de flujo de aire, esto garantizará que la zona del motor tenga una continua refrigeración que a su vez ayudará a evitar un incremento de la temperatura.
3. Si la unidad es diseñada para climas más fríos, se recomienda usar como aislamiento en el toldo y paredes espuma de poliuretano de alta densidad. Este material garantiza la menor pérdida de calor desde el interior de la unidad hacia su exterior.
4. Las ventanas de un autobús son pieza clave para un aislamiento adecuado. Se recomienda hacer uso de ventanillas dobles, es decir, ventanillas con dos capas de cristal que aprisionan una capa de aire en medio. El aire entre las capas de vidrio impedirá pérdidas de calor hacia el exterior o en caso contrario, minimiza la transferencia por convección del aire exterior.
5. Como se mencionó en el subtema 5.1, un mayor espacio entre motor y estructura facilita la circulación de aire en el habitáculo motor, por consiguiente, el flujo de calor del motor a la estructura será menor.

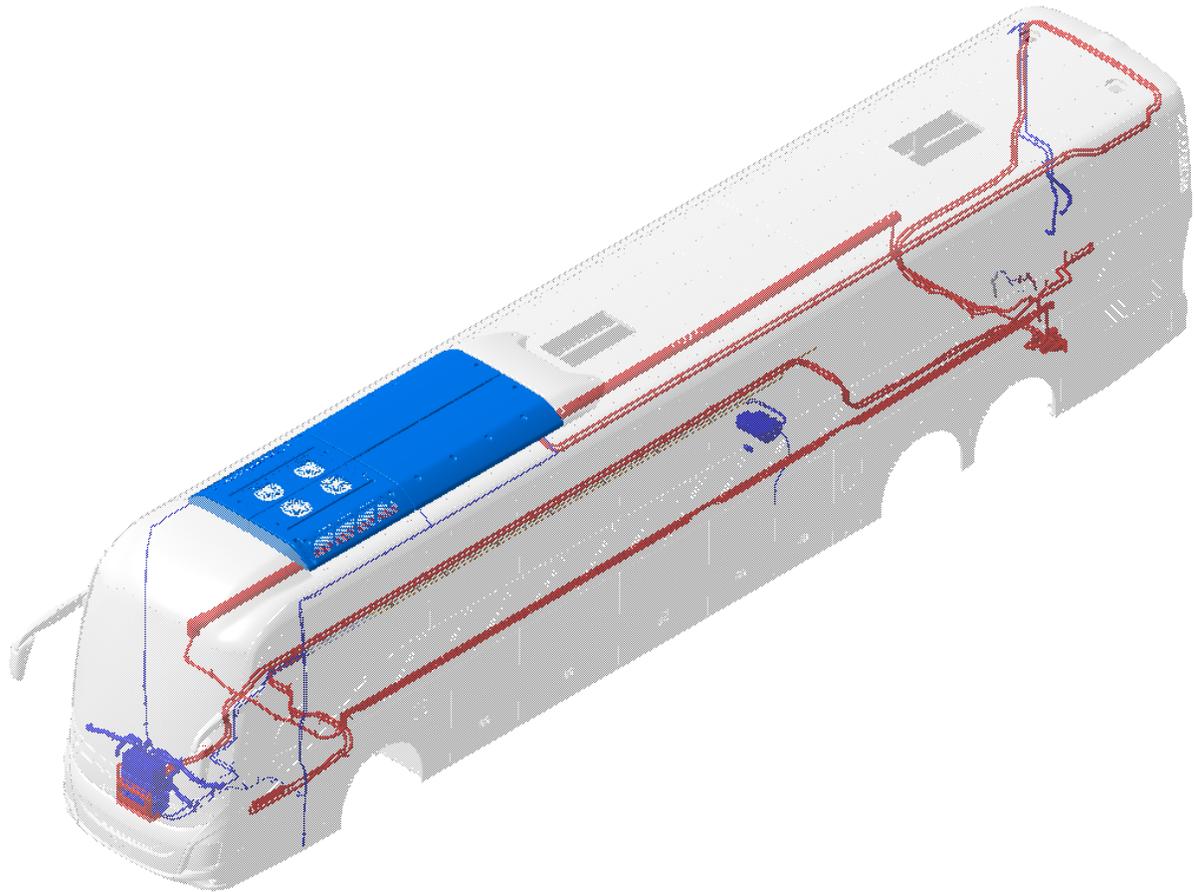


Figura 5.3. – Sistemas de aire acondicionado y calefacción de un autobús foráneo (CATIA V5).

Fuente: Autor.

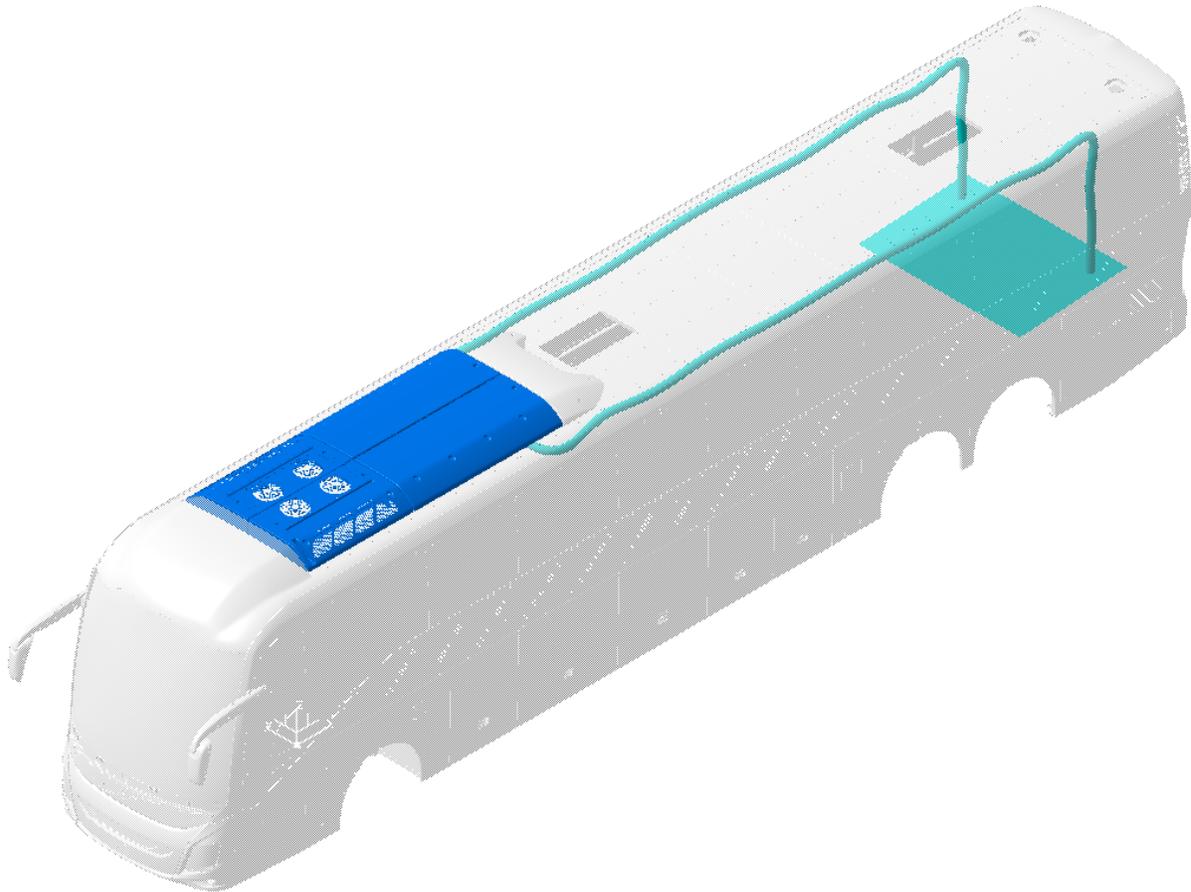


Figura 5.4. – Un flujo continuo de aire refrigerado hacia la banca trasera evitará el incremento de la temperatura interior en dicha zona (CATIA V5).

Fuente: Autor.

La propuesta analizada en el subtema 4.6 tiene un desempeño aceptable, la pared multicapa provee de una importante reducción de temperatura y el flujo de calor se mantiene bajo, no obstante, es posible mejorar el ensamble con las siguientes recomendaciones:

1. La primera capa de material EPDM se debe cambiar por un material con mayor resistividad térmica, podría sustituirse por una espuma de

poliuretano flexible, este material tiene una conductividad térmica aparente de $0.026 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, lo cual mejoraría sustancialmente la primera caída de temperatura de 87.63°C a 72°C . Esta mejora no contempla un incremento en el espesor del material.

2. El análisis arrojó que la fibra de vidrio es el reductor de temperatura más destacado del ensamble, a pesar de esto se puede sustituir de igual manera que la primera capa de material por una espuma de poliuretano, pero semirrígida. Con una conductividad térmica promedio de $0.026 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$, esta mejora nos daría como resultado una caída de temperatura de 28.92°C a 26.73°C . Si bien es una mejora de 2.19°C , esta propuesta se debe considerar solo en un caso crítico de pasos de calor al área pasajeros, esto debido a que la fibra de vidrio tiene un costo mucho menor que la espuma de poliuretano.
3. El piso de la propuesta contempla madera como material, pese a que la madera es un material de fácil manejo y con buenas prestaciones como aislante, hay materiales que están surgiendo como alternativa para pisos en autobuses, los cuales mejoran la resistividad térmica de la madera. Materiales como Honey-comb, perfiles de plasti-madera, paneles plásticos con núcleos de espuma polimérica proveen de aislamiento termoacústico, además de ser materiales resistentes y estructurales. La bondad de estos materiales es el aire que atrapan en sus estructuras, pese a esto esta propuesta también se debe evaluar en relación con el costo, actualmente los materiales compuestos siguen teniendo precios elevados.

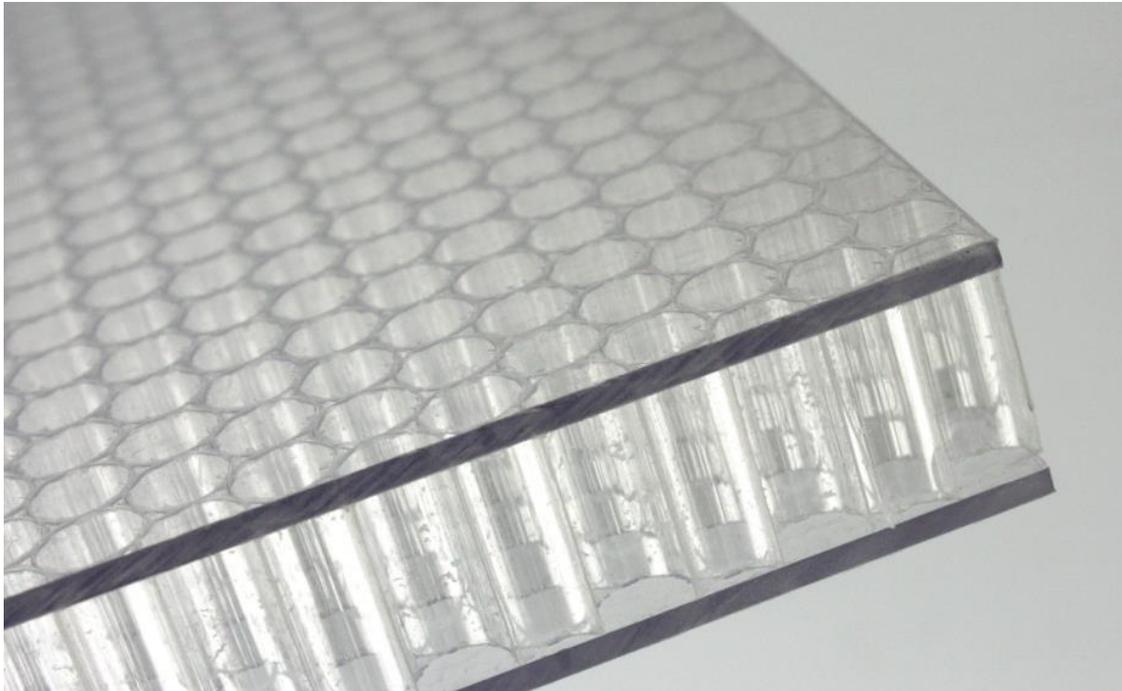


Figura 5.5.- Panel de policarbonato con núcleo tipo “panal”.

Fuente: <https://www.stylepark.com/en/design-composite/air-board-uv-pc>



Figura 5.6. – Panel compuesto. Capas de PVC con núcleo de Espuma de Poliéstireno.

Fuente: <https://irpen.wordpress.com/2017/02/27/pvc-paneles-compuestos-fo-60-especial-artes-graficas/>

CAPITULO IV
CONCLUSIONES

A través de este trabajo de investigación, me ha sido posible entender de manera más detallada cada uno de los mecanismos de transferencia de calor, así como el comportamiento que los materiales tienen a nivel molecular en presencia de energía calórica. Adicionalmente, el desarrollo de la ciencia de transferencia de calor producto de la necesidad de entender el “movimiento” de la energía calórica en los procesos industriales, permite que el lector comprenda la importancia que esta ciencia ha tenido para el desarrollo tecnológico de nuestras sociedades.

Las reseñas históricas referentes al desarrollo de los motores de combustión interna, así como el surgimiento de autobús como un medio de transporte masivo causan una profunda reflexión en torno a el tiempo y esfuerzo que ingenieros, físicos, inventores y emprendedores entusiastas dieron a cambio del desarrollo de un transporte accesible seguro y eficiente, mismo que actualmente tenemos disponible en casi la totalidad de las ciudades del mundo.

Tras analizar el comportamiento que tiene la energía calórica a través de una pared de aislamiento térmico multicapa, se facilita la comprensión de la importancia de cada tipo de materiales usado en la industria automotriz, pues el diseño de barreras protectoras de calor va más allá de solo colocar un material “resistente a las altas temperaturas” entre sistemas. El desarrollo de escudos de calor en ingeniería térmica implica principalmente la seguridad y confort del usuario final, la optimización de energía y el costo de los materiales.

Este análisis constata la factibilidad de un escudo de calor bajo condiciones reales de operación puesto que, se logra una clara reducción de la energía calórica en

tránsito a través de la pared de aislamiento. Si bien es virtualmente imposible impedir por completo una transferencia de calor entre cuerpos, si es posible disminuir el tránsito de la energía con materiales con un factor de transferencia de calor bajo. En este ejemplo, se logra una reducción de calor hasta una temperatura ambiente confortable de 22 °C, por lo tanto, la pared multicapa es funcional para lograr un ambiente térmico adecuado para los pasajeros de un autobús con este arreglo.

BIBLIOGRAFÍA.

1. Çengel, Y. A. & A. Ghajar (2011). *Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones*. Mexico: McGraw Hill.
2. Manrique Valdez J. A. (2005). *Transferencia de Calor*.
3. José Ángel Martínez Valdez (2005). *Transferencia de Calor*. Mexico: Alfa omega.
4. Incropera F. P, DeWitt D. P (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico: Prentice hall.
5. Cao E. (2004). *Transferencia de Calor en Ingeniería de procesos*. Argentina: Prentice Hall.
6. Müller E. A. (2002). *Termodinámica Básica*. Venezuela. Consultora Kemiteknik C.A.
7. Lienhard IV J. H., Lienhard IV J. H. (2008). *A Heat transfer texbook*. USA: Phlogiston Press.
8. Ordorica Morales M. G. "Termodinámica" Ed. IPN
9. Welty J. R., Wicks C. E. & Wilson E. R. (1994) *Fundamentos de transferencia de momento, calor y masa*. Mexico: Limusa.
10. Howell J. R., Buckius R. O. (1990). *Principios de termodinámica para ingenieros* Mexico. McGraw-Hill.
11. Montes Pita M. J., Muñoz Dominguez M., Rovira A., *Ingeniería Térmica* Universidad Nacional de Educación a Distancia Ed. Edición Digital.
12. Kern. D., *Procesos de Transferencia de Calor*. Mexico: Continental SA de CV
13. Wladyslaw Roman. P. (1984). *Funcionamiento de Motores de Combustión Interna*. Mexico: Ed. Universidad Autónoma de Nuevo León

14. <http://www.quimicafisica.com/escalas-de-temperatura.html>
15. <https://es.wikipedia.org/wiki/Temperatura>
16. <https://tublockupn.wordpress.com/escalas-de-temperatura/>
17. <https://www.ratsa.mx/publicacion/articulos/articulo2>
18. https://es.wikipedia.org/wiki/Aislamiento_t%C3%A9rmico
19. <https://es.wikipedia.org/wiki/Vermiculita>
20. <https://www.renoveconlanamineral.com/pdf/guia-de-la-lana-mineral.pdf>
21. <https://es.wikipedia.org/wiki/Diatomita>
22. <http://www.flexicon.es/Materiales-Manejados/Tierra-Diatomacea.html>
23. <https://www.arqhys.com/arquitectura/valorR-aislamiento.html>
24. <http://www.ecogreenlan.com/?product=aislante-de-lino>
25. <http://tecnicuport.com/calefacc/reglament/nbect79/anexo1.htm>
26. <http://marceloibarra94.blogspot.com/2011/04/historia-del-motor-gasolina.html>
27. https://en.wikipedia.org/wiki/Rudolf_Diésel
28. <http://grupocarman.com/blog/tipos-de-software-cadcaecam/>
29. https://elpais.com/sociedad/2014/04/23/actualidad/1398284814_615231.htm
30. <https://blogthinkbig.com/innovacion-en-el-transporte-de-las-ciudades>
31. <https://www.thefreedictionary.com/Chasis>
32. <https://www.unvibus.com/empresa/disenio/>
33. <https://grabcad.com/library>
34. <https://www.youtube.com/watch?v=pKIXrk9f-cQ>
35. <https://www.youtube.com/watch?v=AiEkw5LYH1k&t=531s>
36. https://www.interempresas.net/FeriaVirtual/Catalogos_y_documentos/206767/FICHA-TECNICA-PAVIMENTO-LINOLEO-ARMSTRONG-COLORETTE.pdf

37. <https://es.symbolab.com/solver/algebra-calculator>

GLOSARIO DE TERMINOS TECNICOS

Absortividad. - Se denomina absortividad a la medida de la cantidad de luz absorbida por una disolución, definida como la unidad de absorbancia por unidad de concentración por unidad de longitud de la trayectoria de luz. De acuerdo con la Ley de Beer-Lambert, la absortividad es proporcional a la concentración del soluto absorbente.

Antiguamente recibía los nombres de índice de absorbencia, constante de absorción, coeficiente de absorción y coeficiente de extinción.

Alveolar. - De los alveolos o relativos a ellos, en caso de material de aislamiento, alveolar hace referencia a la cavidad o intersticio que hay entre las capas de un material donde se aloja aire u otro gas con baja conductividad térmica.

Banca trasera: Estructura tubular fabricada generalmente con perfiles de acero que se ubica en la parte trasera del salón de pasajeros. Provee soporte a asiento, baños, pasajeros y cargas.

Carrocería: Estructura montada sobre un tren motriz o chasis que provee el espacio adecuado para el transporte de pasajeros o cargas.

Cenagosa. - Que está lleno o cubierto de cieno o lodo.

Desplazamiento: El Desplazamiento o cilindrada de un motor, es la suma de la capacidad volumétrica de sus cilindros. Usualmente se indica en centímetros

cúbicos (CC) o CID (Cubic Inch Displacement). La cilindrada total del motor también se expresa en litros.

Emisividad. - La emisividad, llamada antiguamente emitancia, es la proporción de radiación térmica emitida por una superficie u objeto debido a su temperatura.

Exfoliación. - Proceso de aplicación de calor al mineral de vermiculita, el mineral se reviente y se expande dando paso a la acumulación de aire entre las cavidades del mineral.

Intemperismo. - Es la descomposición, desgaste, desintegración y destrucción de las rocas, como respuesta a su exposición a los agentes de la intemperie (ej. agua, aire, variaciones de temperatura, acción de organismos).

Imputrescibles. - Material que no se pudre.

Parafinas: es el nombre común de un grupo de hidrocarburos alcanos de fórmula general C_nH_{2n+2} , donde n es el número de átomos de carbono.

Pared cortafuegos. - Elemento de un arreglo estructural que funge como protección contra flama directa. Es un retardante de flama.

Suberina: La suberina es un polímero natural (biopolímero) producido por las paredes celulares de algunas células de las plantas y que es pobremente

comprendido. Al igual que la cutina, la suberina es formada por ácidos grasos hidróxidos y epóxidos unidos por enlaces éster. La diferencia es que la suberina contiene ácidos dicarboxílicos, una mayor cantidad de componentes de cadena larga y una cantidad significativa de compuestos fenólicos como parte de su estructura.

Tren motriz: Es el conjunto de componentes en un vehículo que generan energía y lo convierten en desplazamiento sobre el terreno. Normalmente, esto incluye las siguientes partes: Motor, Transmisión, Ejes, Diferenciales, Dirección.

Triangulo lobular: Figura geométrica similar al triangulo, las aristas de esta figura son cóncavas en dirección fuera de la misma figura.

Varas: Elementos estructurales dispuestos en el chasis de manera longitudinal. Sobre las varas se fijan otros subsistemas como la dirección, los ejes y el tren motriz de la unidad.

ANEXO

Tabla 1. - Densidad y conductividad térmica a 20-25 °C de aislante de poliuretano.

Tipo	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)/(kcal·h ⁻¹ ·m ⁻¹ ·°C ⁻¹)
Espuma de poliuretano	30	0,026/0,0224
Plancha rígida de poliuretano expandido	30	0,02-0,025/0,0172-0,0215 promedio: 0,0225/0,0193
Plancha rígida de poliuretano expandido	40	0,023/0,02
Plancha rígida de poliuretano expandido	80	0,04/0,34
Poliuretano expandido in situ	24-40	0,023-0,026/0,0198-0,0224 promedio: 0,0245/0,0211

Tabla 2. - Densidad y conductividad térmica a 0 °C de aislante de fibra de vidrio.

Tipo	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)/(kcal h ⁻¹ m ⁻¹ °C ⁻¹)
Tipo I	10-18	0,044/0,038
Tipo II	19-30	0,037/0,032
Tipo III	31-45	0,034/0,029
Tipo IV	46-65	0,033/0,028
Tipo V	66-90	0,033/0,028
Tipo V	91	0,036/0,031
Fibra de vidrio, ligada con resina	64-144	0,036/0,031

Tabla 3. - Densidad y conductividad térmica a 20-25 °C de aislante de poliuretano.

Densidad y conductividad térmica a 20-25 °C del aislante de corcho

Tipo	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W m ⁻¹ °C ⁻¹)/(kcal h ⁻¹ m ⁻¹ °C ⁻¹)
Granulado suelto y seco	115	0,052/0,0447
Granulado	86	0,048/0,041
Bloque de corcho expandido	130	0,04/0,344
Plancha de corcho expandido	150	0,043/0,037
Expandido, ligado con resinas o brea	100-150	0,043/0,037
Expandido, ligado con resinas o brea	150-250	0,048/0,041

Fuente: Elaborado por los autores con datos de Melgarejo, 1995.

Fuente: <http://www.fao.org/3/y5013s/y5013s07.htm>

Tabla 4. - Propiedades del aire a presión de 1 atm.

TABLA A-15

Propiedades del aire a la presión de 1 atm

Temp., T , °C	Densidad, ρ , kg/m ³	Calor específico, c_p , J/kg · K	Conductividad térmica, k , W/m · K	Difusividad térmica, α , m ² /s ²	Viscosidad dinámica, μ , kg/m · s	Viscosidad cinemática, ν , m ² /s	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	4.158×10^{-6}	8.636×10^{-6}	3.013×10^{-6}	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	8.036×10^{-6}	1.189×10^{-6}	5.837×10^{-6}	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	1.252×10^{-5}	1.474×10^{-5}	9.319×10^{-6}	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	1.356×10^{-5}	1.527×10^{-5}	1.008×10^{-5}	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	1.465×10^{-5}	1.579×10^{-5}	1.087×10^{-5}	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	1.578×10^{-5}	1.630×10^{-5}	1.169×10^{-5}	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	1.696×10^{-5}	1.680×10^{-5}	1.252×10^{-5}	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	1.818×10^{-5}	1.729×10^{-5}	1.338×10^{-5}	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	1.880×10^{-5}	1.754×10^{-5}	1.382×10^{-5}	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	1.944×10^{-5}	1.778×10^{-5}	1.426×10^{-5}	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	2.009×10^{-5}	1.802×10^{-5}	1.470×10^{-5}	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	2.074×10^{-5}	1.825×10^{-5}	1.516×10^{-5}	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	2.141×10^{-5}	1.849×10^{-5}	1.562×10^{-5}	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	2.208×10^{-5}	1.872×10^{-5}	1.608×10^{-5}	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	2.277×10^{-5}	1.895×10^{-5}	1.655×10^{-5}	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	2.346×10^{-5}	1.918×10^{-5}	1.702×10^{-5}	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	2.416×10^{-5}	1.941×10^{-5}	1.750×10^{-5}	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	2.487×10^{-5}	1.963×10^{-5}	1.798×10^{-5}	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	2.632×10^{-5}	2.008×10^{-5}	1.896×10^{-5}	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	2.780×10^{-5}	2.052×10^{-5}	1.995×10^{-5}	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	2.931×10^{-5}	2.096×10^{-5}	2.097×10^{-5}	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	3.086×10^{-5}	2.139×10^{-5}	2.201×10^{-5}	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	3.243×10^{-5}	2.181×10^{-5}	2.306×10^{-5}	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	3.565×10^{-5}	2.264×10^{-5}	2.522×10^{-5}	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	3.898×10^{-5}	2.345×10^{-5}	2.745×10^{-5}	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	4.241×10^{-5}	2.420×10^{-5}	2.975×10^{-5}	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	4.593×10^{-5}	2.504×10^{-5}	3.212×10^{-5}	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	4.954×10^{-5}	2.577×10^{-5}	3.455×10^{-5}	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	5.890×10^{-5}	2.760×10^{-5}	4.091×10^{-5}	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	6.871×10^{-5}	2.934×10^{-5}	4.765×10^{-5}	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	7.892×10^{-5}	3.101×10^{-5}	5.475×10^{-5}	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	8.951×10^{-5}	3.261×10^{-5}	6.219×10^{-5}	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	1.004×10^{-4}	3.415×10^{-5}	6.997×10^{-5}	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	1.117×10^{-4}	3.563×10^{-5}	7.806×10^{-5}	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	1.352×10^{-4}	3.846×10^{-5}	9.515×10^{-5}	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	1.598×10^{-4}	4.111×10^{-5}	1.133×10^{-4}	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	1.855×10^{-4}	4.362×10^{-5}	1.326×10^{-4}	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	2.122×10^{-4}	4.600×10^{-5}	1.529×10^{-4}	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	2.398×10^{-4}	4.826×10^{-5}	1.741×10^{-4}	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	3.908×10^{-4}	5.817×10^{-5}	2.922×10^{-4}	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	5.664×10^{-4}	6.630×10^{-5}	4.270×10^{-4}	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades c_p , k , μ y Pr son independientes de la presión. Las propiedades ρ , ν y α a una presión P (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de ρ , ν y α a la temperatura dada, por P y al dividir ν y α entre P .

Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 1984, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Liley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFI/Plenum, NY, 1970, ISBN 0-306067020-8.

Fuente: Y. A. Çengel, & A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones* (pág. 911). México: McGraw Hill.

Tabla 5. - Propiedades de diversos materiales (Conductividad térmica, Calor específico y densidad).

MATERIAL ⇅	λ CONDUCTIVIDAD TÉRMICA ⇅ W(K·M) 23°C	CALOR ESPECÍFICO ⇅ J(KG·K) 25°C	DENSIDAD ⇅ KG/M³
Acero	50	450	7500
Acero inoxidable	17	460	7900
Agua	0.58	4186	1000
Aluminio	237	909	2700
Baquelita	0.24	900	1270
Bronce	116-186	360	8700
Carbono	129	710	2267
Caucho Celular	0.06	1500	130
Caucho de Silicona	0.24	1300-1500	1100
Caucho EPDM Etileno Propileno	0.25	1000	1150
Caucho Natural	0.13	1100	910
Caucho Policloropreno Neopreno®	0.23	2140	1300
Cobre	380	389	8900
Corcho	0.04	1880	120
Diamante	2300	509	3513
Etanol	0.013	1520	789
Fibra de vidrio	0.04	795	220
Fieltro lana	0.06	1300	200
Grafito	129	710	2260
Hidrógeno	0.182	14300	0,0898
Hielo	2.2	2090	917
Hierro	80	473	7870
Inconel® 625	9.8	410	8440
Latón	120	394	8400
Litio	301.2	360	530
Madera	0.04-04	1381	840
Mármol	2.09	879	2800
Mercurio	8.34	140	13579
Mica	0.52	880	2900
Niquel	90	460	8900

Nitrógeno	0.026	1040	1.25
Oro	317	128	19300
Oxígeno	0.026	920	1429
PA6 Poliamida	0.24-0.28	1700	1150
Para-aramida Kevlar®	0.04	1400	1440
PC Policarbonato	0.19-0.22	1200	1200
PEHD Polietileno alta densidad	0.5	1800	980
PELD Polietileno baja densidad	0.33	2200	920
Plata	429	232	10490
Platino	71.6	130	21450
Plomo	35.3	129	11340
PMMA Metacrilato	0.18	1500	1180
Poliuretano en espuma	0.029	1674	40
POM Poliacetal	0.22-0.24	1500	1420
PP Polipropileno	0.12	1800	960
PS Poliestireno	0.16	1300	1050
PTFE Politetrafluoretileno	0.25	1050	2200
PVC Cloruro de polivinilo	0.17	900	1390
PVDF Polifluoruro de Vinilideno	0.1-0.25	80-140	1770
Sodio	141	1230	968
Titanio	21.9	522	4500
Uranio	27.6	120	19050
Vermiculita expandida	0.07	837	100
Vidrio	0.81-1	833	2700
Cinc	116	390	7140

Tabla 6. - Propiedades de diversos materiales (Conductividad térmica, Calor específico y densidad).

	Material	λ	ρ	Cp	a	b
		W/mK	kg/m ³	J/kgK	m ² /s	J/m ² K's
1	Poliuretano	0,026	30	1400	6,19E-7	3,30E+1
2	Aire	0,026	1,223	1063	2,02E-5	5,85E+0
3	Poliestireno	0,035	50	1675	4,18E-7	5,41E+1
4	Espuma fenólica	0,038	30	1400	9,05E-7	3,99E+1
5	Lana de vidrio	0,041	200	656	3,13E-7	7,33E+1
6	Corcho comprimido	0,085	540	2000	7,87E-8	3,03E+2
7	Mortero de cemento	0,090	1920	669	7,01E-8	3,40E+2
8	Madera de construcción	0,130	630	1360	1,52E-7	3,34E+2
9	Madera de pino	0,148	640	2512	9,19E-8	4,87E+2
10	Madera pesada	0,200	700	1250	2,29E-7	4,18E+2
11	Concreto celular	0,220	600	880	4,17E-7	3,41E+2
12	Tierra con paja	0,300	400	900	8,33E-7	3,29E+2
13	Concreto celular	0,330	800	880	4,69E-7	4,82E+2
14	Yeso	0,488	1440	837	4,05E-7	7,67E+2
15	Mortero cemento/arena	0,530	1570	1000	3,38E-7	9,12E+2
16	Agua	0,582	1000	4187	1,39E-7	1,56E+3
17	Ladrillos de arcilla	0,814	1800	921	4,91E-7	1,16E+3
18	Tierra muro portante	0,850	2000	900	4,72E-7	1,24E+3
19	Vidrio plano	1,160	2490	830	5,61E-7	1,55E+3
20	Arcilla	1,279	1460	879	9,97E-7	1,28E+3
21	Piedra arenisca	1,300	2000	712	9,13E-7	1,36E+3
22	Concreto pesado	1,750	2300	920	8,27E-7	1,92E+3
23	Piedra	1,861	2250	712	1,16E-6	1,73E+3
24	Mármol	2,900	2590	800	1,40E-6	2,45E+3
25	Granito	3,500	2500	754	1,86E-6	2,57E+3
26	Acero	50	7800	512	1,25E-5	1,41E+4
27	Aluminio	160	2800	896	6,38E-5	2,00E+4
28	Cobre	389	8900	385	1,13E-4	3,65E+4
	Máx	389,000	8900	4187	1,13E-4	3,65E+4
	Mín	0,026	1	385	7,01E-8	5,85E+0
	Rango	388,974	8899	3802	1,13E-4	3,65E+4

Fuente: <http://www.chinaqbus.es/2-20-tour-coach.html>

Tabla 7. - Comparativa de coeficientes de conductividad térmica de espumas de PU y otros materiales.

Material	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m·K)
Chapa de Aluminio	2.700	2,04
Hormigón	2.400	1,63
Vidrio plano	2.500	0,81
Ladrillo macizo	1.600	0,81
Tejas (plana)	1.800	0,76
Yeso (placas)	1.000	0,44
Hormigón liviano	1.000	0,36
Nieve compactada	300	0,23
Madera (pino)	700	0,17
Lana de vidrio	11	0,041
Lana de vidrio	15	0,038
Lana de vidrio	35	0,038
Lana de vidrio	50	0,032
Lana de vidrio	70	0,031
Lana de vidrio	100	0,032
Poliuretano rígido	35	0,020
Poliuretano proyectado	30	0,024

Fuente: Norma IRMA 11601 (Argentina).

Tabla 8. - Valores R de componentes más comunes usados en la construcción.

TABLA 3-8					
Resistencia térmica unitaria (valor R) de componentes comunes usados en la construcción					
Componente	Valor R		Componente	Valor R	
	m ² · °C/W	ft ² · h · °F/Btu		m ² · °C/W	ft ² · h · °F/Btu
Superficie exterior (invierno)	0.030	0.17	Montante de madera nominal		
Superficie exterior (verano)	0.044	0.25	2 in × 6 in		
Superficie interior, aire estático	0.12	0.68	(5.5 in o 140 mm de ancho)	0.98	5.56
Espacio plano lleno de aire, vertical, superficies comunes ($e_{ef} = 0.82$):			Loseta de arcilla, 100 mm (4 in)	0.18	1.01
13 mm ($\frac{1}{2}$ in)	0.16	0.90	Loseta acústica	0.32	1.79
20 mm ($\frac{3}{4}$ in)	0.17	0.94	Teja de asfalto	0.077	0.44
40 mm (1.5 in)	0.16	0.90	Papel para construcción	0.011	0.06
90 mm (3.5 in)	0.16	0.91	Bloque de concreto, 100 mm (4 in):		
Aislamiento, 25 mm (1 in):			Ligero	0.27	1.51
Fibra de vidrio	0.70	4.00	Pesado	0.13	0.71
Lámina de fibra mineral	0.66	3.73	Tablero de yeso,		
Espuma rígida de uretano	0.98	5.56	13 mm ($\frac{1}{2}$ in)	0.079	0.45
Estuco, 25 mm (1 in)	0.037	0.21	Lámina de fibra de madera,		
Ladrillo de fachada,			13 mm ($\frac{1}{2}$ in)	0.23	1.31
100 mm (4 in)	0.075	0.43	Madera contrachapada,		
Ladrillo común, 100 mm (4 in)	0.12	0.79	13 mm ($\frac{1}{2}$ in)	0.11	0.62
Forro de acero	0.00	0.00	Concreto, 200 mm (8 in):		
Escoria, 13 mm ($\frac{1}{2}$ in)	0.067	0.38	Ligero	1.17	6.67
Madera, 25 mm (1 in)	0.22	1.25	Pesado	0.12	0.67
Montante de madera			Mortero de cemento,		
nominales 2 in × 4 in			13 mm ($\frac{1}{2}$ in)	0.018	0.10
(3.5 in o 90 mm de ancho)	0.63	3.58	Tablas de forro achaflanadas y		
			traslapadas de madera,		
			13 mm × 200 mm		
			($\frac{1}{2}$ in × 8 in)	0.14	0.81

Fuente: Y. A. Çengel, & A. Ghajar, *Transferencia de Calor y Masa Fundamentos y Aplicaciones* (pág. 185). México: McGraw Hill.