



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Diseño de una espuma de calcio para
retener agentes contaminantes**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Kevin Daniel Ruiz López

DIRECTOR DE TESIS

M. en C. Osvaldo Ruiz Cervantes



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017

Agradecimientos

En memoria de mi abuelita que tuvo su lugar como mi madre, la mujer que lo dio todo sin querer recibir nada a cambio, ella hoy es la reina del cielo, Tomasa Hernández Villafaña †. Tu amor, cariño, esfuerzo, dedicación, trabajo, lagrimas, a diario te agradeceré y viviré como me enseñaste, dando siempre lo mejor de mí. Te dedico este trabajo, con mucho cariño.

A mis padres Armando y Guillermina, no tengo palabras para expresar lo feliz que me siento de que sean ustedes mis guías y el apoyo infinito que a lo largo de estos años me han brindado, hoy su esfuerzo y perseverancia están plasmados en estas hojas junto con un sinnúmero de inigualables y maravillosos momentos en familia. Gracias por tanto amor y desvelos, son maravillosos.

A mi abuelito Guillermo, quien siempre tiene consejos para ofrecermelo, compartiendo sus vivencias y gustos conmigo. Me transmitió el gusto por la naturaleza, a querer profundamente las raíces de mi familia, por regalarme una de las más bonitas sensaciones de mi vida que es trabajar el campo, así fue como entendí el valor del esfuerzo, gracias papá Memo.

A mis abuelitos José y Esperanza. Hace muchos años sembraron un árbol y a lo largo de todo este tiempo lo alimentaron, cuidaron del calor y frío, brindaron la mayor parte de su tiempo y vida, esta familia creció para convertirnos en este presente y en el futuro, sin ustedes no sería posible estos frutos deliciosos que cosechamos el día de hoy.

A mis hermanos: Armando Pablo, Erick Ernesto, Jesús Israel, Irving Arturo, Brenda Paola, Brandon Ricardo. Hemos compartido todo tipo de emociones, aprendido juntos en este camino llamado vida. Gracias a los mayores por ser modelos a seguir, permítanme los menores esforzarme, dar todo de mí y ser un buen ejemplo para ustedes.

A mi compañera Sonia, por dedicarme lo mejor de su persona, por no quedarse conforme y siempre buscar mejorar a través de la comprensión, honestidad, humildad y su capacidad extraordinaria de amar en todo tipo de escenarios. Gracias por impulsarme, por darme lo mejor de ti y el apoyo para cumplir mis propósitos y sueños.

Un hermano no siempre es un amigo, pero un amigo siempre será un hermano. Mis carnalitos. Leonardo Vázquez, Ian Castillo, Oscar Santos, Brenda Cruz, Enrique Padilla. Con quienes colaboraron a que mi vida esté llena de sonrisas y de excelentes momentos que recuerdo con mucho cariño y emoción, son los mejores.

La casa máxima de estudios Universidad Nacional Autónoma de México por enriquecerme de los conocimientos más que necesarios para desempeñarme profesionalmente, a los profesores de la División de Ingeniería Mecánica e Industrial, así como de la Unidad de Investigación y Asistencia Técnica en Materiales por su valioso tiempo, dedicación, perseverancia y sobre todo paciencia.

Prólogo

Este trabajo está inspirado en los efectos negativos que ha causado la contaminación ambiental en la vida cotidiana de los habitantes de las grandes ciudades. Ciertamente el uso de automóviles de combustión interna es una herramienta primaria que la mayor parte de la población utiliza para satisfacer todo tipo de necesidades sociales sin conocer las consecuencias al medio ambiente. Cabe mencionar que la propuesta y parte de este trabajo se presentó en el segundo concurso de emprendedores SEFI (Sociedad de Exalumnos de la Facultad de Ingeniería), UNAM.

Se sabe que el resultado de la contaminación ambiental es producto del descuido en desechos generados por las industrias, automóviles que utilizan fuentes de combustible fósiles, sobrepoblación de vehículos, deficiencia en los programas de control ambiental que hasta el momento no han solucionado nada, limitada cultura de sanidad entre los ciudadanos, etc.

La estructura de esta tesis plantea una opción para disminuir el efecto de los gases contaminantes, en la cual el capítulo 1 analiza como la contaminación ambiental producida por vehículos de combustión interna ha alterado el calentamiento global, gases de efecto invernadero, desorden en los sistemas naturales, aumento de contaminación del aire, problemas de salud, afectaciones económicas de los ciudadanos, contingencias, impactos de movilidad, riesgos laborales y una gran lista interminable.

Si en la Ciudad de México se retiran 500 mil vehículos de las calles, se estaría obligando a más de 800 mil personas a usar el sistema de transporte público, el cual no tiene capacidad para trasladarlos, además contaminan entre cuatro y cinco veces más que los autos privados. Los medios públicos dejan de ser opción, los ciudadanos empiezan a tener más de dos autos por familia; dejar de circular y el pago de más impuestos no soluciona el conflicto [El Financiero, 2016].

Los programas ambientales como el Hoy No Circula en la Ciudad de México, perjudican a los habitantes, compromete gastos extras en la economía de cada familia; desafortunadamente se ha visto a lo largo de los años que no resuelve el problema de contaminación, se ven afectados muchos comercios y empleados al grado de suprimirlos. Estas medidas arruinan la forma y calidad de vida que se tiene, han sido decisiones que han tomado los representantes de la nación sin fundamento ni razonamiento, donde se pretende atacar las causas para combatir este problema, sin embargo, al poner en marcha estos métodos lo único que pasa es empeorar la situación actual.

En el capítulo 2 se da un recorrido del estado del arte, donde se resumen algunas de las propuestas de mejora en la calidad del aire y reducción de contaminación ambiental con mayor impacto en la sociedad, sin embargo, muchas de ellas han fracasado, algunas otras resultan viables, sin embargo, el costo supera el beneficio brindado, dejando de ser una opción competente.

El uso de las técnicas para producir sólidos celulares tiene distintas aplicaciones muy interesantes, ya que su estructura semejante a los panales de abeja con celdas interconectadas abiertas y cerradas los hace únicos en su clase, tales aplicaciones van desde: aislamiento, embalaje, flotabilidad, injertos, acústica, vibraciones, intercambiadores de calor y filtración.

Una cualidad importante de los sólidos celulares es la capacidad de respuesta inmediata de absorber energía, vibraciones, fluidos, cargas cíclicas y estáticas, gracias a las cavidades internas es esto posible, en este proceso las moléculas o átomos de una fase penetran dentro del sólido celular. En capítulo 2 se destaca el uso de sólidos celulares y el avance tecnológico en las aplicaciones de filtrado, donde se aprovechan al máximo las cualidades absorbentes de los sólidos celulares, específicamente los de tipo cerámicos, donde a través del desarrollo se proponen diferentes usos.

En esta tesis se argumenta el desarrollo conceptual de un esquema de solución sustentado en la representación teórica de una espuma de calcio; que, implementado al sistema de escape de gases de los automóviles de combustión interna, será capaz de absorber monóxido de carbono, dióxido de carbono y dióxido de azufre; que son los gases con mayor influencia en la contaminación ambiental, gases de efecto invernadero y calentamiento global; problemas que afectan al planeta tierra.

En el desarrollo del diseño conceptual se debe reforzar con alguna técnica o metodología que respalde el diseño del nuevo producto. Para esto, en el capítulo 3 se hará uso de las herramientas TRIZ (*Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch*, Teoría para la resolución de problemas inventivos) y QFD (*Quality Function Deployment*, Despliegue de la función de calidad), que en conjunto ayudaran con la solución y propuesta al problema.

En el caso del capítulo 4 se ponen en marcha las técnicas de diseño, no es necesario desarrollar cada una por separado, ya que tienen varios pasos en común, al final, la técnica QFD complementa la metodología TRIZ, logrando desarrollar el techo de la casa de la calidad, que es la parte medular y más importante para el diseño de este nuevo producto.

El interés primordial, es implementar la espuma a manera de filtro en los automóviles de la CDMX, con ayuda de los programas gubernamentales para la pequeña y mediana industria. El objetivo es reducir los problemas antes mencionados y normalizar los programas ambientales que perjudican al ciudadano. El alcance de este tema no es eliminar completamente la contaminación del aire, pero si para una mejor calidad de vida.

El desarrollo de este proyecto no busca comprometer las eficiencias de los motores de los automóviles, y que no sea un obstáculo o tapón para la salida de agentes contaminantes emitidos por el tubo de escape, sino sea un elemento de filtrado de estos. No se descarta que se tenga la capacidad de retener otros tipos de agentes contaminantes.

Contenido

Agradecimientos.....	I
Prólogo.....	II
Capítulo 1 Introducción.....	1
1.1 Cambio climático.....	1
1.2 Contaminación ambiental.....	2
1.2.1 Consecuencias en la salud.....	3
1.2.2 Consecuencias ecológicas.....	5
1.2.3 Consecuencias sociales en México.....	6
1.2.4 Consecuencias económicas en México.....	8
1.3 Bióxido de carbono y temperatura.....	9
1.4 Propuesta.....	11
Capítulo 2 Marco teórico, antecedentes de los sólidos celulares y aplicaciones en procesos de filtración.....	12
2.1 Estado del arte.....	12
2.2 Sólidos Celulares.....	13
2.2.1 Estructura.....	13
2.2.2 Fabricación.....	16
2.2.3 Cualidades.....	18
2.2.4 Aplicaciones.....	20
2.2.5 Ensayo de compresión.....	21
2.2.6 Comportamiento de la permeabilidad.....	23
2.2.7 Propiedades térmicas.....	24
2.3 Materiales cerámicos y aplicaciones.....	25
2.3.1 Carbonato y óxido de calcio.....	26
2.3.2 Hidróxido de calcio.....	28
2.3.3 Cloruro de calcio.....	28
2.3.4 Sulfato de calcio.....	28
2.4 Casos de aplicación de filtros con estructura celular.....	28
2.4.1 Caracterización de una esponja cerámica para un filtro para agua.....	28
2.4.2 Microestructura de esponjas cerámicas.....	29

Capítulo 3 Metodologías para diseño y desarrollo de un nuevo producto	31
3.1 Introducción.....	31
3.2 Diseño conceptual.....	33
3.2.1 Metodología QFD	34
3.2.2 Metodología TRIZ	36
3.2.3 TRIZ en la construcción de la casa de la calidad.....	37
3.3 Desarrollo de un nuevo producto	39
Capítulo 4 Propuesta de diseño para un filtro cerámico.....	40
4.2 Integración QFD y TRIZ	43
4.2.1 Definición estratégica	44
4.2.2 Depuración de objetivos	46
4.2.3 Árbol de objetivos.....	46
4.2.4 Procedimiento	47
4.2.5 Establecimiento de funciones	50
4.2.6 Análisis de funciones	50
4.2.7 Procedimiento	50
4.2.8 Fijación de requerimientos.....	51
4.2.9 Especificaciones de rendimiento.....	51
4.2.10 Procedimiento	51
4.3 Cuestionario de situación innovativa.....	52
4.4 La casa de la calidad.....	55
4.5 Diseño de detalle	57
4.5.1 Materiales.....	57
4.5.2 Procedimiento	58
4.6 Puesta en operación	61
Capítulo 5 Discusión de resultados	63
Conclusiones	66
Bibliografía.....	68
Anexo 1: Estudio de mercado	73
Anexo 2: 40 principios inventivos	80

Capítulo 1

Introducción

1.1 Cambio climático

El cambio climático que experimenta el planeta es una probable amenaza que enfrentamos los seres humanos, ya que se ve afectado por el cambio de temperatura más elevado a las condiciones normales, es importante precisar que el mínimo cambio de temperatura altera directamente el ciclo del agua, los efectos climatológicos y promueve los desastres naturales. El impacto del cambio climático afecta directamente la salud, los ecosistemas, métodos en los que se producen los alimentos, a las distintas formas de vida animales y vegetales, medios para producir, distribuir y consumir energía, las actividades económicas y movilidad de las ciudades, entre otros efectos.

A pesar de que el cambio climático es un proceso natural está directamente asociado a la acumulación en la atmósfera de gases de efecto invernadero lamentablemente estos gases son producto de las actividades humanas, particularmente en aquellas relacionadas con la combustión de los energéticos fósiles, así como en aquellos procesos que consumen energía donde se emiten enormes cantidades de bióxido de carbono, uno de los principales gases de efecto invernadero ligado al calentamiento global [PNUMA, 2007].

El efecto invernadero es generado por los gases que alteran el equilibrio en el sistema climático, dando como resultado el calentamiento global del planeta. Este tipo de gases tienen la característica de estar conformados por moléculas polares que absorben rayos infrarrojos y radiación térmica como se observa en la Figura 1.1 [IPCC, 2007].

Cabe mencionar que el gas más significativo debido a su exceso que contribuye al cambio climático es el bióxido de carbono, en aproximadamente un 79 por ciento [IPCC, 2007]. No todo el bióxido de carbono llega a la atmósfera, alrededor del 40 por ciento del bióxido de carbono que producen los seres humanos son absorbidos por bosques y océanos.

Los gases de efecto invernadero son importantes y necesarios para mantener temperaturas convenientes para el planeta, sin embargo, con mayor concentración provoca incrementos de temperatura, lo cual, complicaría las formas de vida. Las causas del incremento de gases invernadero son principalmente el uso de combustibles derivados del petróleo [PNUMA, 2007].

El cambio climático es un proceso irreversible, la aceleración de calentamiento global en la tierra es responsabilidad en un 80 por ciento de la humanidad, y el 20 por ciento restantes obedece a causas naturales, esto significa que se debe disminuir la quema de combustibles fósiles o buscar alternativas nuevas para que el daño ocasionado en el medio ambiente sea menor [Jiménez, 2010].

1.2 Contaminación ambiental

Por definición, la contaminación es la presencia de sustancias, organismos o clase de energía en ambientes a los que no pertenecen con efectos contrarios a la salud y comodidad de personas. Dañan directamente los recursos naturales y alteran el equilibrio ecológico. Otro de los efectos es el debilitamiento de la capa de ozono, que protege a los seres vivos de la radiación ultravioleta del Sol, debido a la destrucción del ozono procedentes de la contaminación o el calentamiento global, provocado por el aumento de la concentración de bióxido de carbono atmosférico que acompaña a la combustión masiva de materiales fósiles [Albert, 1995].

Los contaminantes gaseosos son los vapores y contaminantes que aparecen en diferentes concentraciones en un ambiente. Los contaminantes gaseosos más comunes son el bióxido de carbono, el monóxido de carbono, los hidrocarburos, los óxidos de nitrógeno, los óxidos de azufre y el ozono que forman parte de los gases de efecto invernadero.

Aunque la temperatura en el siglo XX haya aumentado, no quiere decir que haya sido por la contaminación ambiental, ya que esta siempre ha existido en la naturaleza; lamentablemente a partir de la Revolución Industrial y las actividades en las grandes ciudades han favorecido el descontrol. Hoy en día es un problema serio, así mismo, los empresarios y los gobiernos no concientizan sobre los daños al planeta, la naturaleza y el medio ambiente.

Es de gran importancia analizar las características, propiedades y origen de los contaminantes ambientales más importantes en función de su fuente de origen, ya que éste es el criterio más habitual. Las emisiones de contaminantes antropogénicos y fenómenos naturales se dividen como se muestra en la Figura 1.1 [SEMARNAT, 2008].

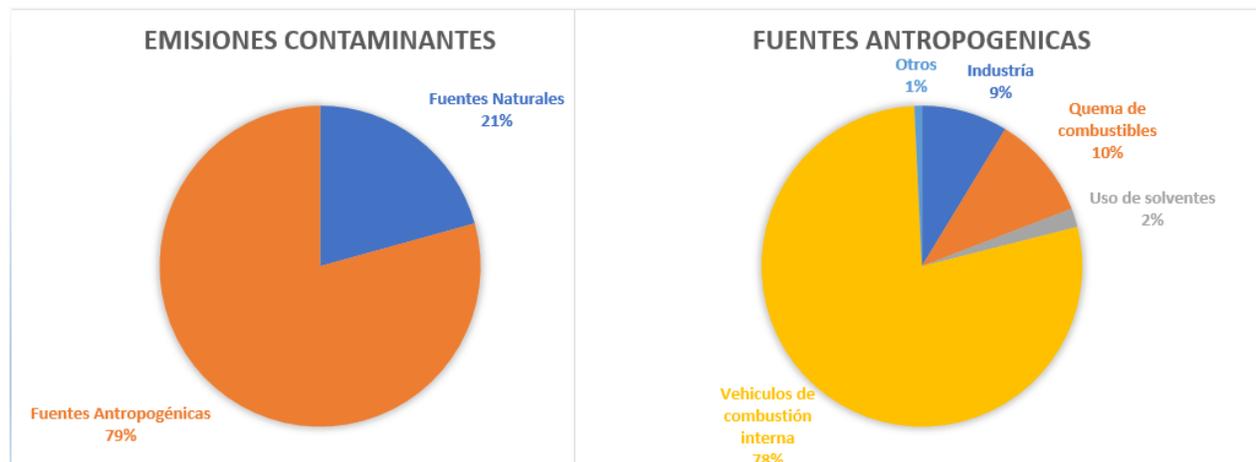


Figura 1.1: Fuentes contaminantes

La mayor parte de emisiones contaminantes corresponden a fuentes antropogénicas, es decir, contaminantes producidos por el hombre, siendo el uso de vehículos de combustión interna la principal causa.

1.2.1 Consecuencias en la salud

La contaminación ambiental de las grandes ciudades afecta la salud cardiovascular, existe una relación directa entre el aumento de las partículas contaminantes del aire de la ciudad y el engrosamiento de las arterias. El efecto persistente de la contaminación del aire respirado, en un proceso silencioso de años, conduce finalmente al desarrollo de afecciones cardiovasculares agudas, como el infarto.

Al respirar partículas ambientales con un diámetro menor de 2,5 micrómetros, ingresan en las vías respiratorias más pequeñas y luego irritan las paredes arteriales suponen mayor riesgo para la salud, debido a su pequeño tamaño y se generan por la combustión de vehículos, plantas de energía y fuegos forestales, entre otras causas, el humo del tabaco y el que en general proviene del sistema de escape de los autos producen la misma cantidad de esas partículas [OMS, 2016].

Durante el año 2011 hubo tres millones de muertes prematuras por mala calidad del aire, sólo en la capital de México se registraron 260 muertes que pudieron haberse evitado si se respetaran los niveles de calidad de aire y 1,089 decesos podría haberse prevenido si se cumpliera con los niveles y criterios que postula la Organización Mundial de Salud [OMS, 2012].

En el año 2015 sólo en el Valle de México murieron mil 823 personas, 4 mil 494 requirieron hospitalización por causas respiratorias y enfermedades cardiovasculares, además, 247 mil 729 entre ellas adultos mayores y menores de edad, acudieron a consultas médicas por infecciones respiratorias, asma y padecimientos isquémicos del corazón [IMCO, 2016].

La mala calidad del aire es una de las razones por las que en el mundo 8.2 millones de personas pierden la vida cada año. En México, se producen cerca 9 mil 300 muertes al año asociadas con la contaminación del aire, lo que lo coloca como el segundo país con mayor número de decesos por mala calidad en el aire.

Se menciona a continuación de manera breve el efecto de los principales contaminantes relacionados con la salud en los seres vivos y contaminación del ambiente [INE SEMARNAT, 2014]:

- Hidrocarburos: Las emisiones de hidrocarburos resultan cuando no se quema completamente el combustible en el motor. Existe una gran variedad de hidrocarburos emitidos a la atmósfera y de ellos los de mayor interés, por sus impactos en la salud y el ambiente, son los compuestos orgánicos volátiles.
- Metano: El metano es también un gas de efecto invernadero generado durante los procesos de combustión en los vehículos. Tiene un potencial de calentamiento 21 veces mayor al del bióxido de carbono.
- Óxido nitroso: Este contaminante, que pertenece a la familia de los óxidos de nitrógeno, también contribuye al efecto invernadero y su potencial de calentamiento es 310 veces mayor que el bióxido de carbono.

- **Monóxido de carbono:** El monóxido de carbono es un producto de la combustión incompleta de combustibles fósiles y ocurre cuando el carbono en el combustible se oxida sólo parcialmente. El monóxido de carbono se adhiere con facilidad a la hemoglobina de la sangre y reduce el flujo de oxígeno en el torrente sanguíneo ocasionando alteraciones en los sistemas nervioso y cardiovascular.
- **Óxidos de nitrógeno:** Bajo las condiciones de alta temperatura y presión que imperan en el motor, los átomos de nitrógeno y oxígeno del aire reaccionan para formar monóxido de nitrógeno, bióxido de nitrógeno y otros óxidos de nitrógeno menos comunes, que se conocen de manera colectiva como óxidos de nitrógeno. Así mismo, con la presencia de humedad en la atmósfera se convierten en ácido nítrico, contribuyendo de esta forma al fenómeno conocido como lluvia ácida. La exposición aguda al bióxido de nitrógeno puede incrementar las enfermedades respiratorias, especialmente en niños, adultos y personas asmáticas.
- **Bióxido de azufre:** Este es un gas incoloro de fuerte olor, que se produce debido a la presencia de azufre en el combustible. Al oxidarse en la atmósfera produce sulfatos. La exposición prolongada al bióxido de azufre reduce el funcionamiento pulmonar.
- **Amoniaco:** Las emisiones de amoniaco cobran importancia ambiental por el hecho de que este contaminante suele reaccionar con óxidos de sulfuro y óxidos nitrosos para formar partículas secundarias tales como el sulfato de amonio y el nitrato de amonio, las cuales tienen un impacto significativo en la reducción de la visibilidad. La exposición a concentraciones altas de este contaminante puede provocar irritación de la piel, inflamación pulmonar e incluso edema pulmonar.
- **Bióxido de carbono:** El bióxido de carbono no atenta contra la salud, pero es un gas con importante efecto invernadero que atrapa el calor de la tierra y contribuye seriamente al calentamiento global.

La contaminación genera una mala calidad en la salud de los ciudadanos; el plomo, por ejemplo, puede incrementar la incidencia de aborto en mujeres, perjudicar la función renal y aumentar la presión arterial, retardar el desarrollo intelectual de los niños y afectar su comportamiento, además, las partículas ultrafinas, al penetrar en la parte más profunda del tracto respiratorio, causan problemas respiratorios, exacerbando el asma y dañan la función pulmonar. Por si fuera poco, las partículas derivadas del uso de diésel pueden representar riesgo de cáncer.

No existe un sólo ciudadano en toda la Ciudad de México y área metropolitana que respire buena calidad del aire; ocurrió un aumento de 86 por ciento, en comparación con 2015, en casos de conjuntivitis y un aumento de 56 por ciento en neumonía y bronconeumonía, relacionado con la mala calidad del aire; en 2016, hubo 7 mil 237 casos de asma y 844 mil 156 casos de infecciones respiratorias agudas relacionados con la mala calidad del aire [SUAVE, 2016]. En 2016, la Ciudad de México y área metropolitana registró 212 días con mala calidad del aire, y en cada uno de estos, los 29.7 millones de ciudadanos respiraron contaminantes equivalentes a fumarse 40 cigarros al día enfrentándose a numerosas enfermedades respiratorias, cardiovasculares e incluso cerebrales.

1.2.2 Consecuencias ecológicas

El calentamiento global producido por la contaminación ambiental de gases de invernadero está derritiendo los hielos de la Antártida y Groenlandia de manera alarmante. Lo grave es que el proceso es más rápido de lo que se pensaba y debe esperarse para muy pronto el alza del nivel del mar en cantidades significativas.

Las capas de hielo polar están cambiando en una escala de tiempo relativamente corta, esto es en décadas en lugar de miles de años. Las capas de hielos de la Antártica y Groenlandia juntas, contienen agua, en forma de hielo, suficiente como para hacer subir el nivel del mar en 70 metros. El mar sube actualmente de nivel a razón de 1,8 milímetros por año impactando la circulación del océano y el clima [NASA 2015].

El nivel del mar se ha elevado alrededor de 18 centímetros en el siglo XX (entre 1,5 y 2 mm/año). La velocidad con que ahora aumenta el nivel del mar es el doble que hace más de 150 años cuando la actividad humana no producía gases de efecto invernadero, este cambio se debe principalmente a la revolución industrial, donde se reemplazó el trabajo del obrero por máquinas de combustible fósil.

El nivel de los océanos aumentaba 1 milímetro al año antes del siglo XVIII. Pero desde entonces el nivel aumenta en 2 milímetros por año. La Figura 1.2 refleja esta realidad a través de un análisis de satélites Topex durante el periodo 1994-2006, el crecimiento del océano es de 45mm [IPCC, 2007].

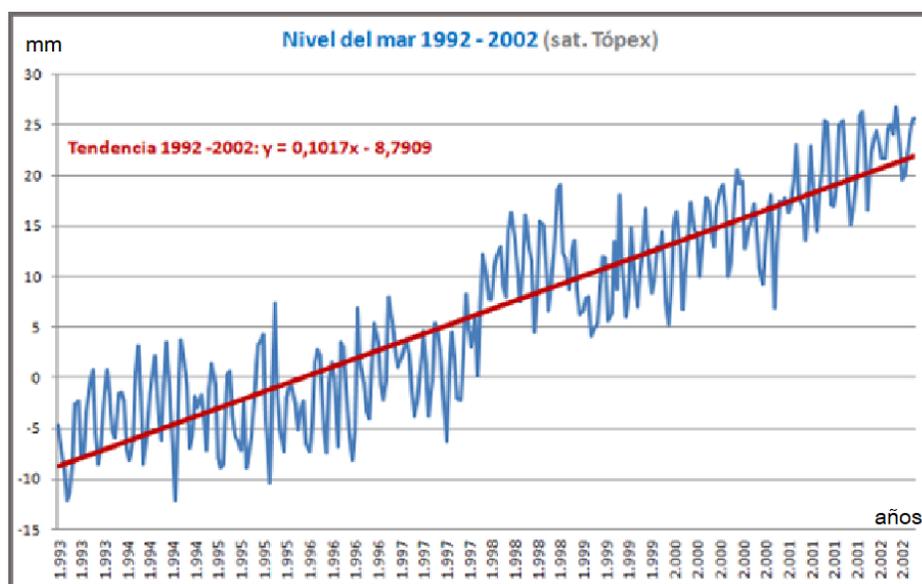


Figura 1.2: Determinación de aumento de nivel del mar por satélites Tópex

Durante el siglo XX la temperatura en la superficie de la tierra aumento 0.74 grados centígrados, las emisiones que tuvieron lugar en este siglo producirán un aumento adicional a la temperatura del siglo XXI al mismo tiempo que se suman el incremento de emisiones actuales. En algunas regiones, se verán amenazadas las tareas de subsistencia, así como la perdida de diversidad biológica.

1.2.3 Consecuencias sociales en México

La mala calidad del aire en México es una violación a los derechos humanos, en cuanto a los efectos negativos que se tiene en el derecho a la salud, educación y en el deterioro a la calidad de vida, el problema de contaminación no se resuelve únicamente con políticas públicas y temporales como la extensión de programas de medio ambiente y uso restrictivo de automóviles.

La movilidad en la Ciudad de México tiene implicaciones más allá de la contaminación, los gastos económicos, el tiempo, la distancia, la seguridad e incluso el estrés, son temas que afectan a los ciudadanos que diariamente deben desplazarse para desarrollar actividades cotidianas como trabajar o estudiar. Los mexicanos pasan entre 3.6 y 3.7 años de su vida a bordo de algún tipo de transporte y la tendencia va en aumento, acercándose en poco tiempo a cinco años [AMTM, 2016].

La ciudad ha estado contaminada al borde del colapso ambiental desde los años 80, debido a políticas ambientales que fueron monitoreadas de manera insuficiente y que no fueron actualizadas. El problema con la calidad del aire en la Ciudad de México se da por su ubicación geográfica, ya que se trata de un valle rodeado por montañas en el que el smog queda atrapado. Esto ocurre con mayor frecuencia en los meses calurosos y secos de primavera, antes del comienzo de las lluvias, cuando se generan más contaminantes.

El Programa Hoy No Circula es un plan gubernamental mexicano que establece medidas que limitan el flujo vehicular en la Ciudad de México y Estado de México. Es una prueba para medir la eficiencia en el consumo de un motor en la mezcla aire combustible, con el objetivo de minimizar el gasto de combustible, con este análisis se recibe un holograma tras hacer verificaciones vehiculares no gratuitas cada seis meses.

Cuando se implementó este programa los automóviles funcionaban con carburadores, no había computadoras a bordo que combinaran de forma automática la relación aire combustible ya que este se hacía de forma manual e irregular por medio de condiciones geográficas, barométricas y ambientales: altitud, presión y temperatura. Lamentablemente este programa se utiliza en la actualidad como recaudación de dinero.

Un gran sector de la población desconoce que cuando su automóvil consume más oxígeno de lo normal, no pasa la verificación, significa que la mezcla es demasiado rica y desperdicia oxígeno, por lo tanto, consume mayor combustible; por el contrario, cuando emite más dióxido de carbono que el ideal, tampoco pasa la verificación porque la mezcla es demasiado pobre y desperdicia gasolina, por lo tanto, consume mayor oxígeno del necesario [Bosch, 2016].

Para establecer el óptimo consumo de oxígeno y gasolina de un motor, lo correcto sería que la prueba se llevara a cabo, atendiendo a las características específicas del motor y no a las del año de fabricación. Por lo que el error más grande es que una prueba que determina el funcionamiento de un motor específico, sea aplicada de manera general a todos los vehículos [Bosch, 2016].

El sistema de verificación fue alcanzado por la corrupción desde hace mucho tiempo, lo cual ha provocado que cada vez menos autos puedan transitar, las malas decisiones recientes de la autoridad capitalina y la Suprema Corte de Justicia de la Nación han provocado este colapso, ya que han permitido hacer cambios en el Hoy No Circula con lo que los autos no pueden obtener la libertad de transitar, sin importar su antigüedad.

Una causa raíz de la contaminación del aire, es el alto número de vehículos que están circulando hoy en día en la Zona Metropolitana, ya son 5.5 millones los que recorren la capital diariamente y 250 mil autos cada año se integran a las estadísticas. Actualmente no se cuenta un sistema de verificación vehicular libre de corrupción, está claro que los hologramas se pueden conseguir por la vía ilegal.

Desde la aparición de contingencias ambientales y el uso restrictivo del automóvil, el número de estos han ido en aumento, alrededor de ocho por ciento en México, se compran más carros que el número de niños que nacen anualmente, esto no es solo un problema de contaminación, es un problema del número de vehículos que circulan en la ciudad que tiene un territorio delimitado y crea condiciones difíciles para transitar e impactos negativos; el proceso de verificación también trae consecuencias adversas, sin importar que los vehículos sean de último modelo, durante los últimos dos años 6 de cada 10 vehículos no han aprobado las pruebas ambientales [El Financiero, 2016].

Si en la Ciudad de México y el área metropolitana se toman acciones preventivas, en cuatro años el número de automotores en circulación podría pasar de 10 a 20 millones, es decir, el doble, lo que convertiría a la megalópolis en un lugar aún más intransitable y contaminada; tan solo en el periodo de Julio a Diciembre del año 2016, el parque vehicular aumento en 1.7 millones de unidades; las nuevas normas al programa de contingencia ambiental y al Hoy No Circula han dejado a más de un millón de automóviles sin circular [The Economist, 2016].

Uno de los problemas que a la brevedad se tendrían que resolver es el smog generado por microbuses concesionados que representan la mitad de los desplazamientos de pasajeros en la Ciudad de México que es el transporte público menos eficiente y no castigar a las familias mexicanas con programas ambientales que generalmente paga los platos rotos ante políticas deficientes.

El número de vehículos crece mucho más rápido que la infraestructura urbana o la disponibilidad de servicios de transporte público, lo cual produce los embotellamientos que sufren diariamente los pobladores de la capital; sin mencionar el constante 20 por ciento del área metropolitana que se encuentra en mantenimiento, que reduce las vías para transitar y en el peor de los casos cierra por completo a sus alrededores provocando que el tráfico aumente. El exceso de usuarios, la mala calidad del servicio y la inseguridad son principales problemas percibidos en el transporte público.

1.2.4 Consecuencias económicas en México

El costo de la contaminación y de la degradación del medioambiente es difícil de calcular con exactitud, los ejemplos de repercusiones económicas y sociales son numerosas; en el caso de la contaminación atmosférica prevalecen los siguientes: pérdidas debidas a los efectos sobre la salud física del hombre, consecuencias contraproducentes sobre la agricultura y ganadería, pérdidas debidas a la corrosión en metales y pinturas, aumento del costo de energía eléctrica consumida en eliminar polvo y en tratamientos anticontaminantes, gastos en el control de nivel de contaminación y en investigación.

Las enfermedades que la contaminación le produce al hombre, pueden afectar la economía; a través del bajo rendimiento en el trabajo causando que la productividad disminuya, todo esto hace que la empresa produzca menos y por ende deja de obtener mayores utilidades, pero en el mundo en que vivimos las industrias no creen que la contaminación sea un factor por el cual el rendimiento de los empleados disminuya.

Los causantes de emisiones de bióxido de carbono en las ciudades desarrolladas son producidos por la industria, el transporte, los procesos de producción, el sector electrónico, entre otros, los cuales generan que un empleado se exponga a una gran cantidad de enfermedades, los seres humanos pasamos del 70 al 90 por ciento en lugares cerrados; en muchos lugares laborales las condiciones de trabajo son aisladas, en donde se generan contaminantes que afectan a los empleados, por medio de la basura que se genera, la mala ventilación, los lugares oscuros, el polvo, etc.

Como consecuencia de las contingencias ambientales prevalece el riesgo de cierre de 80 mil negocios y compromete 160 mil empleos; durante abril de 2016, los negocios comerciales registraron pérdidas de 767 millones de pesos, resultado de la poca actividad vehicular, gastos adicionales de transporte y fletes, salarios, horas extras, etc. Con las restricciones impuestas a la circulación vehicular se generaron pérdidas totales de 2 mil 970 millones en el periodo de marzo a mayo de 2016 [CONACO, 2016].

Simplemente estos problemas de contaminación y colapso vial en cada estado de la republica provoca una pérdida del 1 por ciento del Producto Interno Bruto; en la Ciudad de México, Monterrey, Guadalajara, Puebla y Toluca, la perdida es entre el 4 y 5 por ciento del Producto Interno porque las ciudades se están colapsando [INEGI, 2016].

Los costos en salud son cercanos a mil 600 millones de pesos en 2015 y 728 millones de pesos en 2016; sí durante este tiempo no se toman las medidas adecuadas para mejorar la calidad del aire, los efectos en salud sumarían 37,488 muertes prematuras, 103,629 hospitalizaciones y 6,059,118 consultas; generando una pérdida económica por más de 20 mil millones de pesos [IMCO, 2016].

1.3 Bióxido de carbono y temperatura

La actividad humana emite actualmente a la atmósfera más de 26 mil millones de toneladas anuales de bióxido de carbono, el gas de efecto invernadero más importante (Fig. 1.3). Este gas permanece en la atmósfera alrededor de un siglo antes de ser absorbido por los océanos y por los ecosistemas terrestres, está presente en el 50 por ciento de gases de efecto invernadero.

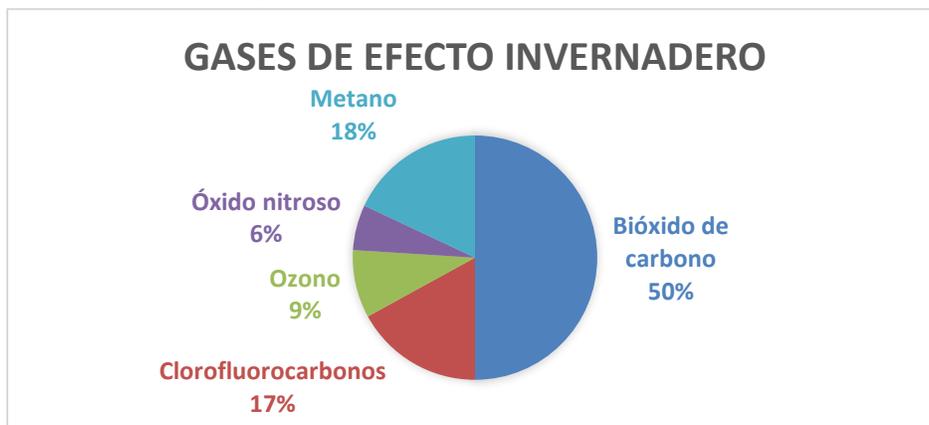


Figura 1.3: Gases de efecto invernadero

Es interesante resaltar que, durante más de medio millón de años, los niveles de bióxido de carbono en la atmósfera se estabilizaron en alrededor de 240 partes por millón, mientras que en los últimos siglos el nivel ha incrementado en casi 380 partes por millón [NOAA, 2009].

Dada la larga vida atmosférica de este gas y el aumento de las emisiones de bióxido de carbono derivadas de la actividad humana más evidentes desde la revolución industrial, se ha producido un incremento de su concentración en la atmósfera: la tasa actual de aumento de concentración es de entre una y dos partes por millón al año. México se posiciona en el lugar número 13 de los países en el mundo con mayores emisiones; las cifras alcanzan 435,6 millones de toneladas de bióxido de carbono al año. [El eco de Sunchales, 2014].

Resulta evidente que las emisiones de bióxido de carbono han aumentado en los últimos años, China es el país con más emisiones de bióxido de carbono al producir 8.2 mil millones de toneladas métricas, seguido de cerca por E.U.A. con 5.4 mil millones de toneladas métricas, India con 2 mil millones, Rusia 1.7 mil millones y Japón con 1.2 mil millones de toneladas métricas.

Con el propósito de comprender mejor las consecuencias del cambio climático, es preciso informar cómo ha sido el comportamiento de la temperatura en el planeta (Fig. 1.4), comparando las magnitudes registradas durante el siglo XX y comparar las tasas de cambio en las concentraciones de bióxido de carbono suspendido en la atmósfera [Law Dome y de Mauna Loa, 2010]. El incremento o decremento de las concentraciones de bióxido de carbono afecta directamente a la temperatura, debido a que este gas regula el efecto invernadero. La concentración de bióxido de carbono atmosférico es determinada por la temperatura.

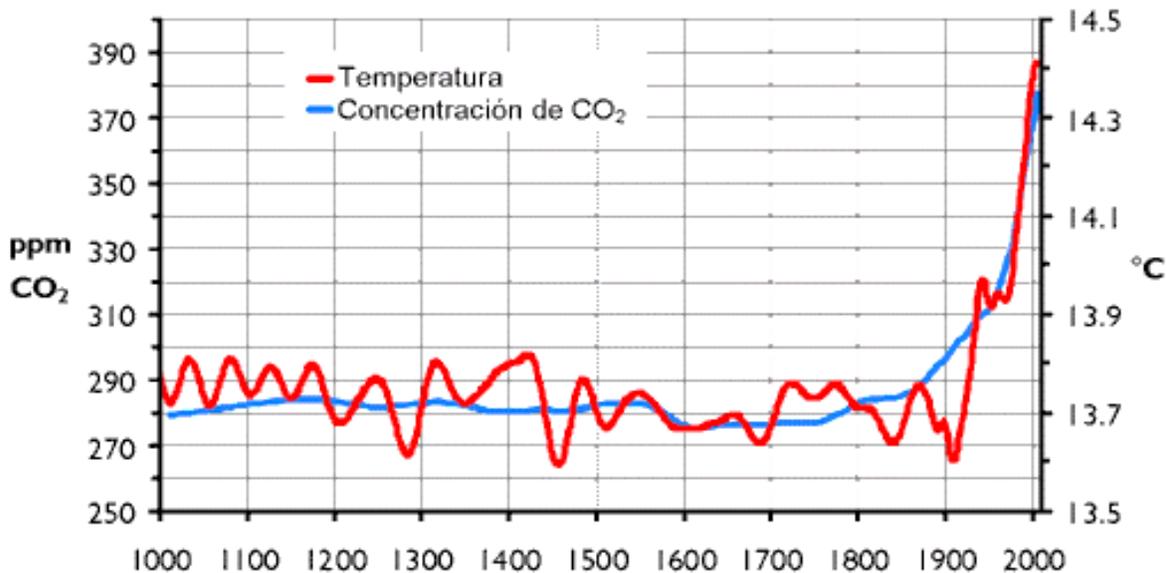


Figura 1.4: Evolución de concentraciones de bióxido de carbono y temperatura

Se interpreta que durante los años antes del presente la concentración de bióxido de carbono ha oscilado entre 270 y 290 partes por millón, mientras que a partir del siglo XX como ya se mencionó en el apartado anterior la concentración de bióxido de carbono aumentó a 380 partes por millón. Se espera que de no hacer acciones que contrarresten los efectos del calentamiento global para el año 2050 el bióxido de carbono haya alcanzado las 800 partes por millón.

Se infiere que el comportamiento de la temperatura global y el nivel de bióxido de carbono han seguido trayectorias semejantes en este último milenio, es decir, cuando la concentración estuvo en sus puntos más bajos, se correspondieron con las temperaturas más bajas registradas. Esto evidencia que existe al menos algún tipo de relación directa o indirecta.

El decremento de bióxido de carbono atmosférico es que a medida que las temperaturas bajan los océanos más fríos disuelven con mayor efectividad el bióxido de carbono. Pero el gas se disuelve y también es liberado en la atmósfera, por eso un aumento de la temperatura disminuye la capacidad de océanos y bosques de retener al bióxido de carbono y este escapa a la atmósfera.

Mientras que el clima se enfría las concentraciones de bióxido de carbono disminuyen produciendo enfriamiento y cuando el clima se está calentando se libera más bióxido de carbono a la atmósfera aumentando las temperaturas globales. Por lo que la tasa de cambio de bióxido de carbono no será siempre responsable de los efectos climáticos que experimentamos.

En la evolución del último milenio se aprecia claramente el aumento de las concentraciones de bióxido de carbono y temperatura asociados a un crecimiento exponencial en el año 1760, momento cuando inició la Revolución Industrial. Esto es una evidencia contundente que la responsabilidad del cambio climático reside en las actividades humanas.

1.4 Propuesta

En esta tesis se argumenta el desarrollo conceptual reforzado en metodologías de diseño TRIZ y QFD de una esponja capaz de retener agentes contaminantes como son: monóxido de carbono, bióxido de carbono, bióxido de azufre y óxidos de nitrógeno a través de espumas con estructura de sólidos celulares de celda abierta.

Existe gran variedad de espumas manufacturadas por diferentes métodos que se explicarán detalladamente en el capítulo 2. Las espumas de celda abierta con tamaño de poro controlado tienen un gran potencial para filtrar gases y fluidos, las espumas y los paneles de abeja son muy buenos aislantes térmicos ya que contienen en su interior grandes cantidades de aire, similarmente, su elevada porosidad le confiere buenas propiedades acústicas.

Este tipo de espumas será la herramienta que se propone para mitigar los problemas antes mencionados, reducir las concentraciones elevadas de carbono y retener los agentes contaminantes emitidos por efecto de la combustión en los automóviles. Trayendo como beneficio almacenar las partículas contaminantes en un filtro para su tratamiento adecuado.

La captura y almacenamiento de las moléculas de estos gases puede conseguirse mediante las cualidades naturales de las espumas, principalmente la cualidad natural de absorber, puesto que es un material con cavidades internas. En este proceso las moléculas o los átomos de una fase penetran uniformemente a los de otra fase, dicho de otra manera, es la operación unitaria de transferencia de masa que se utiliza para separar uno o varios componentes de una corriente gaseosa.

La utilidad práctica para esta espuma es la recuperación de componentes gaseosos a través de una corriente de fluido, este proceso de absorción va acompañado de una reacción química asociado al carbonato de calcio.

Capítulo 2

Marco teórico, antecedentes de los sólidos celulares y aplicaciones en procesos de filtración

2.1 Estado del arte

A través de estos tiempos en los que se desarrolla la humanidad y los problemas ambientales persisten, se han buscado diversas soluciones para disminuir el daño causado al planeta, a continuación, en la Tabla 2.1 se describen cuáles han sido los recursos y medidas de fuerte impacto usados como remedios ante el cambio climático, economía, movilidad, salud y contaminación.

Tabla 2.1: Recursos de mitigación

Recursos de mitigación	
Programas ambientales en vehículos	Los resultados de estos programas no han sido de beneficio para el medio ambiente, al contrario, mayor número de personas están dispuestas a tener un segundo o tercer automóvil para poder circular diario, la venta de automóviles nuevos y usados ha incrementado considerablemente provocando mayor índice de emisiones y calentamiento global.
Catalizadores en automóviles	El catalizador es un recipiente de acero inoxidable, frecuentemente provisto de una carcasa-pantalla metálica antitérmica, tiene como objetivo disminuir los elementos contaminantes contenidos en los gases de escape de un vehículo mediante la técnica de la catálisis. Se trata de un dispositivo instalado en el tubo de escape, cerca del motor, ya que ahí los gases mantienen la temperatura más elevada del proceso de combustión.
Dispositivos de filtrado	El objetivo de este dispositivo que ya se encuentra disponible para venta, es evitar que las personas sigan respirando aire contaminado, sin embargo, estos dispositivos comprometen la eficiencia de los motores al tratar de recolectar hasta el 93 por ciento de los gases contaminantes y no evita que el dióxido de carbono llegue a la atmosfera.
Filtros para unidades de carga	El costo de estos filtros llega a 10 mil dólares por cada uno, en el año 2017 se inició la implementación de estos filtros en el sistema de transporte público en 105 unidades con una inversión aproximada de 30 millones de pesos; uno de los objetivos es que 30 mil vehículos de transporte público cuenten con esta herramienta. El beneficio para los transportistas es no perder un ingreso seguro, ya que por cada viaje perdido se pierden hasta 5 millones de pesos.
Automóviles híbridos y eléctricos	Reducen significativamente la emisión de gases contaminantes, tienen mayor eficiencia en el consumo de combustible, son potentes, dinámicos y las baterías no descargan al usarse. Se debe considerar que estos automóviles cuentan con mayor dificultad a la hora de reparar alguna avería, entre sus componentes con bastante cantidad de materiales escasos en la naturaleza u obtenibles sólo a través de procesos químicos, como el neodimio y el lantano. La tendencia pronostica que en el futuro muchos de estos automóviles terminarán siendo basura tóxica, ya que será más económico comprar otro automóvil nuevo que reparar el antiguo.

2.2 Sólidos Celulares

La palabra célula proviene del latín *cella* que significa “pequeño compartimiento, espacio cerrado”. Se puede deducir que la denominación sólido celular hace referencia a un material compuesto por un conjunto de pequeños compartimientos. Puede definirse a un sólido celular (Fig. 2.1) como aquel formado por una red de celdas compuesto con pequeños huecos unidos entre sí formando mallas tridimensionales, que son estructuras distintas a un sólido poroso [Gibson y Ashby, 1999].

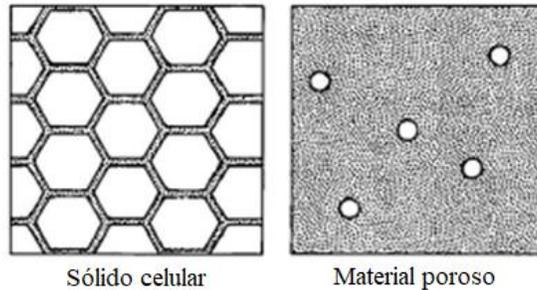


Figura 2.1. Comparación de un sólido celular y un material poroso

La densidad relativa ρ , definida como ρ^*/ρ_s , donde ρ^* es la densidad del material celular y ρ_s la del material que forma el sólido macizo; Los materiales celulares pueden alcanzar densidades relativas de hasta el orden de 10^{-3} , siendo las más usuales para esta propiedad física valores en el intervalo de 0.03 al 0.2.

La clasificación de los sólidos porosos y celulares es la siguiente:

- Naturales: madera, corcho, esponja, coral y hueso.
- Artificiales: espumas, poliuretano, polietileno, esponjas metálicas y cerámicos celulares.

2.2.1 Estructura

La estructura de los materiales celulares puede ser clasificada en tres tipos (Fig. 2.2). El primero es la que está formada por una matriz bidimensional de polígonos que se agrupan para cubrir un área plana, como las celdas hexagonales de las abejas; las estructuras de los sólidos celulares a su vez pueden dividirse en dos grupos, celdas abiertas o cerradas [Gibson y Ashby, 1999].

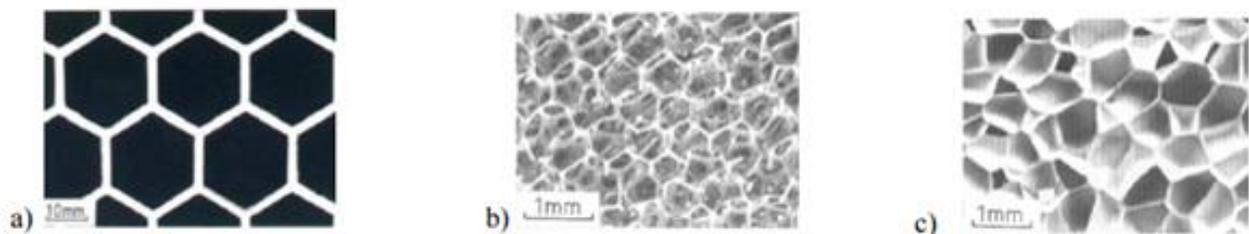


Figura 2.2: a) Sólido bidimensional, b) Sólido tridimensional celdas abiertas, c) Sólido tridimensional de celdas cerradas

Los materiales de celdas abiertas consisten en una red interconectada de varillas donde el material se encuentra en el borde de las celdas. Las estructuras de celda cerrada están formadas por una red interconectada de placas o cáscaras, aislando cada celda de las adyacentes [Grenestedt, 1999].

A continuación, (Fig. 2.3) se muestran las formas poligonales típicas que pueden adoptar las celdas para generar un sólido bidimensional [Gibson y Ashby, 1999].

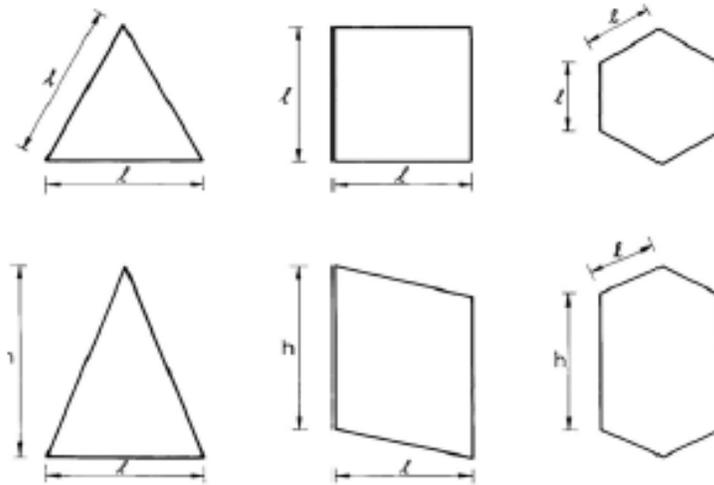


Figura 2.3: Formas poligonales de celda unitaria en materiales celulares tridimensionales

Los polígonos pueden agruparse de varias formas generando diferentes mallas, una característica importante de la malla es el número de conectividades, definido como la cantidad de bordes de celda que concurren en un punto (Fig. 2.4) para sólidos bidimensionales [Gibson y Ashby, 1999].

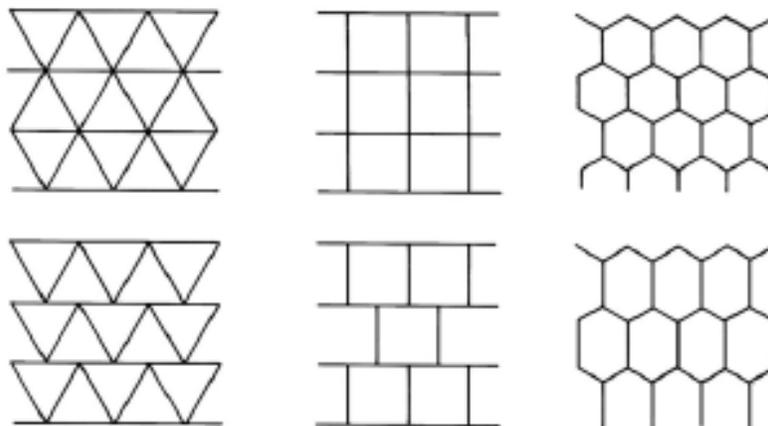


Figura 2.4: Celdas formando mallas bidimensionales

Para sólidos tridimensionales existe una amplia variedad de celdas unitarias poliédricas como se aprecia en la Figura 2.5 [Gibson y Ashby, 1999].

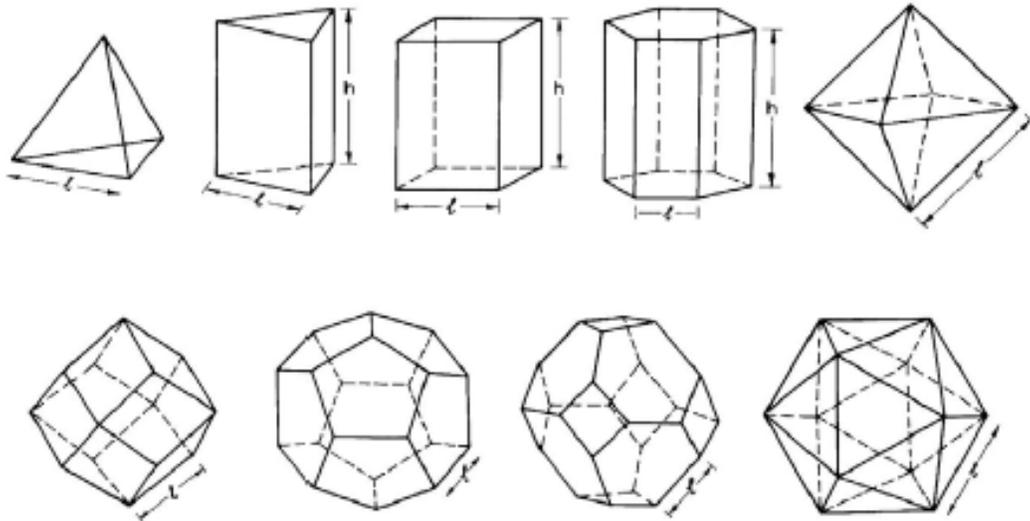


Figura 2.5: Formas poliédricas de celda unitaria en sólidos celulares tridimensionales

Estos poliedros agrupados crean cuerpos tridimensionales, (Fig. 2.6) la forma sugerida es teórica, pues las formas reales se encuentran distorsionadas. En este caso pueden definirse dos conectividades, conectividad de bordes (igual que para sólidos bidimensionales) y conectividad de caras (número de caras que concurren a un vértice). Las conectividades, junto con otros parámetros como el número de bordes promedio por cara y el número de caras promedio por celda se utilizan para el cálculo de la densidad relativa ρ^*/ρ_s [Gibson y Ashby, 1999].

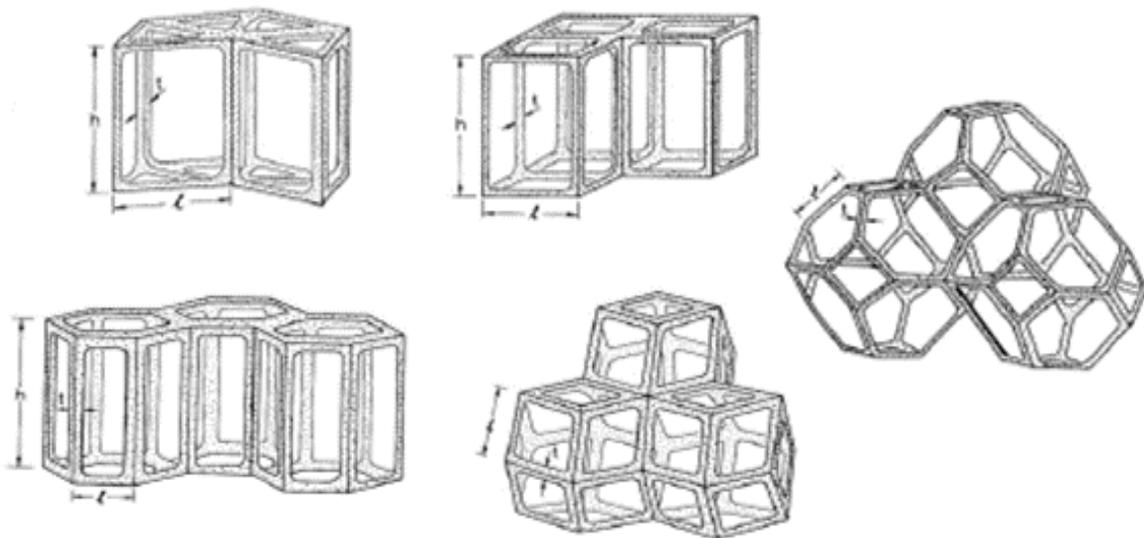


Figura 2.6: Agrupamiento de celadas formado mallas tridimensionales

Las conectividades, formas y tamaños de las celdas son muy variables. Así, espumas como la madera balsa o corcho son de celda cerrada y muy regulares, en cambio otras como las esponjas o huesos están formados por una red abierta con conectividades variables. La distribución de tamaños de celdas en algunas espumas es aleatoria.

En un mismo cuerpo pueden encontrarse celdas muy pequeñas y celdas de tamaño varias veces mayor que las primeras. Esta gran dispersión no implica un material anisótropo; se genera anisotropía cuando las paredes de las celdas están orientadas según una dirección determinada; un material es anisótropo si sus propiedades mecánicas son diferentes en diferentes direcciones, las propiedades mecánicas no son simétricas con respecto a ningún plano o eje. La anisotropía puede caracterizarse mediante la relación de anisotropía: $R = \bar{L}_1 / \bar{L}_2$ donde \bar{L}_1 y \bar{L}_2 son los valores promedios de las dimensiones de las celdas en dos direcciones principales. En tres dimensiones se incorpora \bar{L}_3 lo que permite calcular dos relaciones de anisotropía $R_{12} = \bar{L}_1 / \bar{L}_2$ y $R_{13} = \bar{L}_1 / \bar{L}_3$.

La caracterización estructural de un sólido celular está referida a los siguientes parámetros: material que constituye al sólido, densidad, tipo de celda (abierta o cerrada), conectividad de bordes, conectividad de caras, número de bordes promedio por cara, número de caras promedio por celda, forma de la celda, simetría de la estructura, espesor de los bordes, espesor de las caras, fracción de material en los bordes de las celdas, mayor dimensión principal de celda \bar{L}_1 , menor dimensión principal de celda \bar{L}_2 , dimensión principal de celda \bar{L}_3 , radios de anisotropía R_{12} y R_{13} , y desviación estándar del tamaño de las celdas [Gibson y Ashby, 1999].

2.2.2 Fabricación

Los sólidos celulares pueden elaborarse a partir de casi cualquier material; los materiales más utilizados son los polímeros, pero pueden utilizarse también metales, cerámicas, vidrios e incluso materiales compuestos. Aunque los procesos de fabricación son numerosos y muy variados, se pueden resumir en los siguientes [Gibson y Ashby, 1999]:

- | | |
|------------------------------------|--|
| • Fabricación de paneles de abeja: | • Fabricación de espumas: |
| Corrugación | Mediante agentes espumantes |
| Expansión | Inclusión de sólidos en estado líquido |
| Moldeo | Anodizado |
| Extrusión | Sinterización |

Existen otras maneras de producir sólidos celulares, por ejemplo, uniendo esferas o material previamente expandido (el poliestireno se obtiene de esta forma), algunas espumas de vidrio y metal pueden obtenerse mediante la sinterización de esferas huecas. Para los sólidos celulares naturales, la mayoría se generan a partir de procesos de crecimiento, como ocurre con la madera, huesos o el agrupamiento de organismos como en los corales y ciertos nidos de insectos.

Comúnmente suelen denominarse espumas de metal o espumas metálicas a aquellos materiales metálicos que contienen vacíos. En un sentido más estricto, es conveniente mencionar que las espumas metálicas son un caso particular de sólidos celulares y que, como tales, poseen características específicas que los distinguen de otros, pues existen:

- Materiales celulares
- Materiales porosos
- Espumas metálicas
- Esponjas metálicas

Los materiales celulares y porosos se han descrito anteriormente, mientras que las espumas metálicas son una clase especial de materiales celulares que se originan fundamentalmente por la adición de gas a un metal o aleación metálica en estado líquido y, por ende, tienen una morfología restringida, estas son similares a cualquier otra espuma en relación a las que se forman en bebidas, alimentos y a las fabricadas de polímeros, ya que la mayor parte de su estructura, típicamente entre el 70 y 95% de la misma, está formada por poros que pueden estar conectados entre sí o separados.

A diferencia de las espumas poliméricas, son rígidas y en ocasiones tienen la apariencia de un metal macizo si no han sido cortadas. Son conocidas por su interesante combinación de propiedades físicas y mecánicas tales como su elevada rigidez junto a un muy bajo peso específico, o alta resistencia de compresión y absorción de energía [Scheffler y Colombo, 2005].

El proceso de fabricación de los cerámicos celulares puede ser muy basto ya que un solo proceso no es lo suficientemente flexible para su fabricación. Esto ha conducido a una gran variedad de rutas siendo desarrolladas, pueden ser dividido en tres categorías [Scheffler y Colombo, 2005]:

- Replicación de espumas de polímeros: mediante la aplicación de una suspensión cerámica a una matriz polimérica de celda abierta, esta suspensión se seca en el lugar de la plantilla de polímero, siendo esta quemada y la cerámica sinterizada. Este tipo de proceso da lugar a materiales de celdas muy abiertas que debido a la quema del polímero deja huecos puntuales que reducen las propiedades mecánicas de la espuma final.
- Formación de espumas por agitación mecánica o desprendimiento de gases: este enfoque produce probablemente la más amplia gama de estructuras celulares y sus propiedades, estas son generalmente estructuras menos abiertas que las espumas por replica, aunque se considera una gran gama de aplicaciones, muchas están en proceso de desarrollo todavía; este método consiste básicamente en dispersar un gas en forma de burbujas en una suspensión cerámica, existen dos enfoques básicos para lograrlo, la primer forma es incorporar un gas externo mediante la formación de espuma, inyectando una corriente de gas o aplicación de un aerosol; la segunda es por medio del desprendimiento de un gas.
- Incorporación de aditivos de sacrificio: aditivos volátiles o combustibles que se pierden durante la cocción pueden ser incorporados en la cerámica, un enfoque particular para la formación de cerámicas porosas utiliza almidón como aglutinante y formador de poros. Otro material orgánico que se utiliza para la formación de espumas es la clara de huevo.

2.2.3 Cualidades

Los sólidos celulares (cerámicos, polímeros, metales) tienen propiedades que dependen tanto de la topología como del material que está hecho. De las tres clases, las espumas de polímeros son las más ampliamente investigadas y es a partir de estos estudios que se deriva la gran parte de la comprensión actual de estos materiales, sin embargo, los cerámicos celulares son los menos caracterizados [Scheffler y Colombo, 2005].

Los principios que influyen en las propiedades celulares son comunes en las tres clases. Los tres factores dominantes son:

- Las propiedades del sólido del que está hecha la espuma o el sólido celular.
- La topología (conectividad) y la forma de las celdas.
- La densidad relativa de la espuma o el sólido celular.

Las espumas y los paneles de abeja son muy buenos aislantes térmicos ya que contienen en su interior grandes cantidades de aire, similarmente, su elevada porosidad le confiere buenas propiedades acústicas.

Las propiedades de un sólido celular dependen en gran parte de su densidad relativa ρ^*/ρ_s , este parámetro es de mucha utilidad ya que puede calcularse fácilmente; sin embargo, existen modelos para las propiedades de las espumas y paneles de abeja donde intervienen distintas propiedades de las paredes de celda; tales modelos no son muy utilizados en la práctica puesto que intervienen los mencionados parámetros microscópicos que son difíciles de cuantificar. La densidad relativa, por el contrario, puede calcularse sin mayor complejidad a través de mediciones experimentales.

Los sólidos celulares poseen la cualidad natural de absorber, puesto que es un material con cavidades internas. En este proceso las moléculas o los átomos de una fase penetran uniformemente a los de otra fase, dicho de otra manera, es la operación unitaria de transferencia de masa que se utiliza para separar uno o varios componentes de una corriente gaseosa. Una utilidad práctica para los sólidos celulares de celda abierta es la recuperación de componentes gaseosos a través de una corriente de fluido, muchos procesos industriales de absorción van acompañados de una reacción química.

En la absorción participan por lo menos tres sustancias: el componente gaseoso a separar (absorbato), el gas portador y el disolvente (absorbente). Según la naturaleza del componente gaseoso a separar, tiene que emplearse un disolvente que disuelva selectivamente dicho componente. En este caso, selectivamente significa que el disolvente absorbe principalmente el o los componentes a separar, y no el gas portador.

Presiones elevadas y temperaturas bajas favorecen la absorción. Dependiendo del tipo del disolvente, el gas se absorbe por disolución física (absorción física) o por reacción química (absorción química) [Scheffler y Colombo, 2005].

Al igual que los sólidos densos los materiales celulares poseen propiedades físicas, mecánicas y térmicas que pueden medirse a través de los mismos métodos. El amplio rango que abarcan las propiedades de estos materiales los hace aptos para cumplir funciones que los sólidos densos o convencionales no son capaces de cumplir; los rangos (Fig. 2.7) de las cuatro propiedades son: la densidad, la conductividad térmica, el módulo de Young y la resistencia a la compresión la barra azul muestra el rango que abarca la propiedad para los sólidos convencionales. La barra roja muestra el rango posible para espumas, este enorme rango en las propiedades crea aplicaciones para espumas que no pueden ser cumplidas por sólidos convencionales [Gibson y Ashby, 1999].

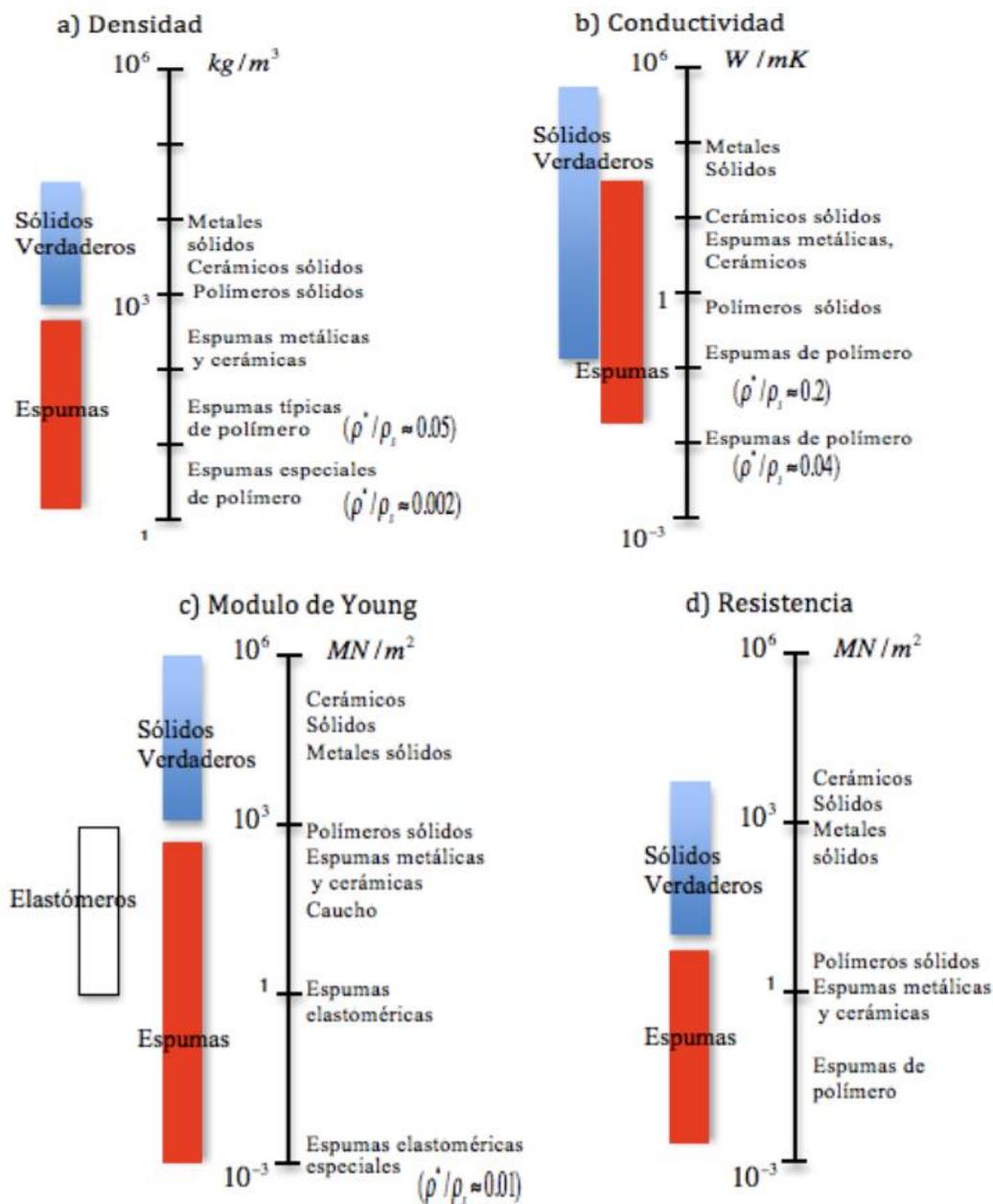


Figura 2.7: Rango de propiedades: a) densidad, b) conductividad térmica, c) módulo de Young, d) resistencia

Lo anterior ofrece un campo potencial para la inventiva ingenieril, las bajas densidades en estos materiales permiten el diseño de componentes ligeros y rígidos tales como panales, grandes estructuras portátiles y todo tipo de componentes con flotabilidad.

La baja conductividad térmica permite un aislamiento térmico seguro y económico. La baja rigidez hace a las espumas ideales para un amplio rango de aplicaciones de amortiguamiento, por ejemplo, espumas elastoméricas que son los materiales estándares usados para asientos. La baja rigidez y la gran deformación en compresión hace a las espumas atractivas para aplicaciones de absorción de energía, el intervalo de propiedades de los materiales celulares los hace aptos para cumplir funciones que los otros sólidos no pueden.

2.2.4 Aplicaciones

Las aplicaciones que se mencionan a continuación se relacionan con las propiedades más importantes de los materiales celulares: resistencia, aislamiento térmico, empaquetamiento, usos estructurales y flotabilidad entre o tras [Gibson y Ashby, 1999].

a) Estructural

Muchos materiales celulares que se encuentran en la naturaleza son estructurales: madera, hueso y coral. Todos ellos soportan grandes cargas estáticas y cíclicas por largos periodos de tiempo, de igual forma, materiales artificiales como los paneles sándwiches de fibras de vidrio o panales de abeja de aluminio son rígidos y resistentes para cumplir esta función en aviones, vehículos y embarcaciones.

b) Vibraciones

La capacidad de amortiguamiento de las espumas es hasta diez veces mayor que la de los metales sólidos, tienen elevadas frecuencias naturales de resonancia, pudiendo por tanto reducir el intervalo de vibraciones. Pueden usarse como relleno de perfiles huecos para amortiguación y en cobertores y contenedores sujetos a vibración.

c) Intercambiadores

Las espumas de celda abierta tienen mucha área superficial y alta conductividad térmica en sus bordes de celda, lo que le otorga cualidades excepcionales para transferir energía en dispositivos tales como bombas o intercambiadores de calor.

d) Filtración

Las espumas metálicas de celda abierta con tamaño de poro controlado tienen un gran potencial para filtrar gases y fluidos. Una aplicación concreta que tienen en este sentido es en depuradores de bióxido de carbono, entre las aplicaciones están filtros de aceite y tubos de escape de vehículos.

2.2.5 Ensayo de compresión

Este determina el comportamiento de los materiales sometidos a cargas aplastantes con la ayuda de máquinas universales de ensayos; el procedimiento consiste en comprimir una probeta del material y se registra la deformación con distintas variables; el esfuerzo y deformación de compresión se calculan y se trazan como un diagrama tensión-deformación, utilizado para determinar el límite elástico, el límite proporcional, el punto de fluencia, el esfuerzo de fluencia y, en algunos materiales, la resistencia a la compresión.

Los ensayos de compresión estándar se realizan bajo normas ASTM (American Society for Testing and Materials): en ASTM C-773 (cerámica de gran resistencia), ASTM E-9 (metales), ASTM E-209 (metales a elevadas temperaturas) y ASTM D-695 (plásticos).

Los ensayos de compresión se utilizan cuando se desea conocer el comportamiento del material bajo deformaciones plásticas permanentes, tal como ocurre cuando tienen un comportamiento frágil a tracción, bajo cargas dinámicas las propiedades de las espumas no han podido ser precisadas, ya que se han encontrado resultados discordantes al estudiar su sensibilidad a la velocidad de deformación.

En el ensayo de compresión se lleva un registro de la carga aplicada a la probeta y la diferencia del cambio de longitud, con este ensayo es posible obtener ciertas propiedades mecánicas muy importantes del material, tales como el esfuerzo de compresión y la deformación; para muestras cerámicas a compresión, el esfuerzo “ σ ” se calcula como la fuerza aplicada por la máquina entre el área de la sección transversal de la muestra.

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

La deformación “ ε ” producida en el sólido celular a medida que se le aplica la fuerza se calcula como:

$$\varepsilon = \frac{l_1 - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

en donde:

l_0 es la longitud original antes de aplicar la carga

l_1 es la longitud instantánea

Δl es el alargamiento producido por la deformación

En el ensayo de compresión uniaxial se utilizan máquinas de ensayo universal y probetas cilíndricas o prismáticas, con medidas de longitud 1.5 mayor que el ancho, el desplazamiento de la probeta se mide a través de los sensores de movimiento del cabezal o extensómetros de la máquina de ensayos, se colocan las probetas entre los platos de carga de la máquina.

Este ensayo registra mediciones precisas y evitan los efectos de borde, pero tienen la desventaja de ser difíciles de adherir al material, es común que los valores de módulo de Young estimados mediante extensómetros sean entre el 5 por ciento y 10 por ciento mayores que los medidos por desplazamiento de cabezal [Gibson y Ashby, 1999].

Es importante lubricar las caras de la probeta para que tengan contacto directo con los platos de carga, para evitar que el rozamiento entre ambas superficies ocasione deformación e imprecisión en el resultado de las propiedades mecánicas. La resistencia a compresión “ σ_c ” es el pico de tensión inicial de la curva tensión-deformación, si no se registra este pico, se toma como la tensión correspondiente a la intersección entre las pendientes de la zona elástica y de la meseta de tensión [Gibson y Ashby, 1999]. Este ensayo se aplica para determinar las propiedades dinámicas de aleaciones metálicas, polímeros, cerámicos y compuestos.

No se puede demostrar fácilmente la deformación en sólidos cerámicos celulares, esto es debido al elevado módulo de elasticidad y a las limitaciones geométricas, por tanto, el módulo de elasticidad y la resistencia a compresión en estos materiales viene dado por el módulo elástico y las dimensiones de las celdas del sólido celular [Gibson y Ashby, 1999].

La tenacidad de fractura de las espumas frágiles se puede calcular a partir de un balance simple de energía de fractura que iguala la energía necesaria para romper una única barra con aquella necesaria para producir un área unitaria de superficie de fractura en el material de la matriz. La tenacidad de fractura y la resistencia a flexión de una espuma cerámica está dada por tres modos:

$$K_{IC}^* = C_4 \sigma_{fs} \sqrt{\pi l} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2}$$

$$K_{IC}^* = C_5 K_{ICs} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^{3/2}$$

$$\sigma_{ft}^* = C_6 \sigma_{fs} \sqrt{l/a} \left(\frac{\rho^*}{\rho_s} \right)^p$$

Las primeras dos ecuaciones predicen una dependencia de la tenacidad de fractura y de la resistencia a tracción con la raíz cuadrada del tamaño de celda, si las otras variables de la ecuación permanecen independientes de este parámetro e indican que un material con tamaño de celda grande puede tener una tenacidad y resistencia mejores que uno de celda pequeña. En estos materiales el tamaño de grieta macroscópico está limitado por el tamaño de celda, y la última ecuación solo es válida para valores de a iguales o superiores a dicho tamaño. K_{ICs} es la tenacidad de fractura del material sólido que compone las barras y a es el tamaño macroscópico del defecto dentro de la espuma y C_n son las constantes geométricas de la celda unitaria. y σ_{fs} depende del tamaño de celda y de la densidad [Gibson y Ashby, 1999].

La literatura reporta la identificación dos efectos en la fabricación comercial de espumas cerámicas de celda abierta mediante recubrimiento por un cerámico de espumas de celda abierta de poliuretano (técnica de réplica de la espuma de poliuretano de partida). Esta técnica normalmente da lugar a barras cerámicas huecas debido a la penetración incompleta de la estructura de la espuma de poliuretano por la capa de cerámico y posterior eliminación del poliuretano al quemar el cerámico. Estas barras no reducen normalmente las propiedades mecánicas, y pueden de hecho ser beneficiosas debido a la reducción de la densidad que suponen, mejorando por tanto las propiedades específicas. Frecuentemente se pueden producir grietas en las barras cerámicas que pueden originarse por diferencias en la contracción de secado, defectos de fabricación y por la expansión térmica del poliuretano y del cerámico, este efecto produce una disminución de las propiedades mecánicas del sólido celular cerámico resultante.

2.2.6 Comportamiento de la permeabilidad

La permeabilidad se puede definir como una medida macroscópica de la facilidad con la que un fluido, conducido por un gradiente de presiones, fluye a través de los huecos de un medio poroso, la permeabilidad no es una propiedad del fluido ni del medio poroso, sino que refleja la interacción entre ambos. La permeabilidad de un medio poroso se suele expresar a partir de parámetros que se derivan de dos ecuaciones principales: Ley de Darcy y la ecuación de Forchheimer:

$$-\left(\frac{dP}{dx}\right) = \left(\frac{\mu}{k_1}\right) v_s$$

$$-\left(\frac{dP}{dx}\right) = \left(\frac{\mu}{k_1}\right) v_s + \left(\frac{\rho}{k_2}\right) v_s^2$$

k_1 y k_2 son las permeabilidades Darciana y No Darciana

$-\left(\frac{dP}{dx}\right)$ es el gradiente de presiones a lo largo de la dirección del flujo

μ y ρ es la viscosidad absoluta y la densidad del fluido

$v_s = \frac{Q}{A}$ es la velocidad superficial del fluido

Q y A es el caudal volumétrico y el área normal superficial del medio poroso expuesto

La Ley de Darcy, que se deriva de experimentos realizados a velocidades muy bajas, considera sólo los efectos viscosos en la pérdida de presión del fluido y establece una dependencia lineal entre el gradiente de presiones y la velocidad del fluido a través del medio poroso. la ecuación de Forchheimer depende en gran medida de la determinación correcta del régimen del fluido dentro del sistema poroso. En contraste con los líquidos, los gases y los vapores se expanden a lo largo del camino por el que fluyen y así la velocidad del fluido a la salida del medio poroso se hace mayor que a la entrada, y esto afecta al perfil de caída de presión.

Es necesario estudiar las formas integradas de la ley de Darcy y de la ecuación de Forchheimer (Tabla 2.2), teniendo en cuenta si el fluido es compresible o incompresible [Presas, 2010].

Tabla 2.2: Ecuaciones de permeabilidad

Ecuación	Fluidos Incompresibles	Fluidos Compresibles
Darcy	$\left(\frac{\Delta P}{L}\right) = \left(\frac{\mu}{k_1}\right) v_s$	$\frac{P_{i^2} - P_{0^2}}{2PL} = \frac{\mu}{k_1} v_s$
Forchheimer	$\frac{\Delta P}{L} = \frac{u}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2 \left(\frac{\Delta P}{L}\right) = \left(\frac{\mu}{k}\right) v_s$	$\frac{P_{i^2} - P_{0^2}}{2PL} = \frac{\mu}{k_1} v_s + \frac{\rho}{k_2} v_s^2$

$\Delta P = P_i - P_0$ es el gradiente de presiones

L es el ancho medio a lo largo de la dirección de flujo.

P_i es el valor absoluto de la presión del fluido a la entrada del medio

P_0 el mismo valor a la salida del medio

P es la presión absoluta del fluido, la cual se calculan o se miden los valores de v_s , μ y ρ

Estas leyes son válidas en un medio saturado, continuo, homogéneo e isótropo y cuando las fuerzas inerciales son despreciables. La permeabilidad es el equivalente en flujo de fluidos de la conductividad eléctrica o térmica y el recíproco de la permeabilidad representa la resistividad viscosa del medio poroso al flujo de fluidos.

La permeabilidad de Darcy de las espumas reticuladas de celda abierta oscila entre los valores de $10^{-11}m^2$ y $10^{-11}m^2$. Los parámetros básicos que influyen en el valor de esta propiedad son la distribución del tamaño de celda y la porosidad total. Si la porosidad aumenta hasta valores entre el 80 por ciento y el 90 por ciento y el tamaño de celda se hace mayor se producen incrementos no lineales de gran magnitud en el valor de la permeabilidad de Darcy.

2.2.7 Propiedades térmicas

El punto de fusión, calor específico y coeficiente de expansión de las espumas son los mismos que aquellos del material del que están hechos, se utiliza la expresión:

$$\frac{P^*}{P_s} = \omega \left(\frac{\rho^*}{\rho_s}\right)^n$$

La conductividad térmica es una propiedad física de los materiales que mide la capacidad de conducción de calor, es la capacidad de una sustancia de transferir la energía cinética de sus moléculas a otras moléculas adyacentes.

2.3 Materiales cerámicos y aplicaciones

El término “cerámico” proviene de la palabra griega “keramikos” que significa “cosa quemada”, este término se utilizó para indicar que las propiedades deseadas de estos materiales se alcanzan después de un tratamiento térmico a alta temperatura que se denomina cocción [Callister, 2003].

La mayor parte de los materiales cerámicos son cristalinos, los cuales microestructuralmente se caracterizan fundamentalmente por un orden y una periodicidad, los átomos, moléculas o iones que forman los cerámicos se disponen ordenados geométricamente en el espacio, la estructura ordenada no se aprecia en muchos casos microscópicamente porque están formados por un conjunto de monocristales orientados en diferentes direcciones formando una estructura policristalina, aparentemente amorfa.

Los materiales cerámicos presentan una complejidad mayor que los metales y los polímeros en su estructura cristalina ya que muestran una combinación de celdas unitarias debido principalmente a la necesidad de un equilibrio de cargas eléctricas entre los distintos átomos presentes; estos son compuestos químicos inorgánicos formados generalmente por elementos metálicos y no metálicos. Debido a que este tipo de materiales tienen una amplia gama de propiedades mecánicas y físicas las aplicaciones varían desde productos de alfarería, fabricación de ladrillos y azulejos, utensilios de cocina, tubos de albañilería, vidrio, materiales refractarios, fibras y abrasivos.

Una de las principales propiedades de los cerámicos son los enlaces atómicos de tipo iónico y/o covalente, más fuertes y específicos que los enlaces metálicos, puede variar desde un enlace completamente iónico, hasta un enlace totalmente covalente, lo que significa que estos materiales poseen estructuras que no tienen muchos electrones libres; los electrones están compartidos covalentemente entre átomos adyacentes pero también son transferidos de un átomo a otro para dar lugar a un enlace iónico originándose un catión (átomo que cede el electrón en el enlace) y un anión (átomo que gana el electrón en el enlace). En estos materiales predomina el enlace iónico, por lo general son duros, frágiles, con un alto punto de fusión, baja conductividad eléctrica y térmica, buena estabilidad química y térmica y elevada resistencia mecánica.

Teóricamente la resistencia de los materiales cerámicos debe ser más alta que la de los metales, debido a que los enlaces atómicos que los constituyen son más fuertes que los enlaces metálicos. Comparado con otros, la mayoría de los materiales cerámicos son más ligeros que los metales y más pesados que los polímeros.

Los puntos de fusión son más altos que la de los metales. La conductividad térmica y eléctrica, así como los coeficientes de expansión son mucho menores que en los metales [Groover, 2004]. Existen tantas clasificaciones de los materiales cerámicos como criterios que se adopten para las mismas. Una clasificación más generalizada es la basada de acuerdo al proceso que son sometidos, por lo que pueden como cerámicos tradicionales y cerámicos refractarios.

Los cerámicos cristalinos poseen un comportamiento frágil debido a la naturaleza de sus enlaces atómicos iónicos y/o covalentes, la deformación plástica tiene lugar por el movimiento de dislocaciones en la estructura cristalina sobre planos de deslizamiento cristalinos, los monocristales de cerámicos sólidos enlazados iónicamente, pueden presentar deformación plástica considerable bajo esfuerzos de compresión a temperatura ambiente, sin embargo, los cerámicos policristalinos enlazados iónicamente son frágiles, formándose las grietas en los bordes de grano.

Debido a la fragilidad, los defectos que estos materiales presenten en su estructura pueden producir el fallo del material. El tamaño y el número de las imperfecciones difieren en cada pieza cerámica individual y las propiedades mecánicas sólo pueden describirse de manera estadística, por estas razones, el comportamiento mecánico de los materiales cerámicos es menos predecible que el de los metales [Gibson y Ashby, 1999].

El fallo mecánico de los materiales cerámicos tiene lugar principalmente por defectos estructurales, las causas principales de las fracturas en cerámicos policristalinos han de buscarse en las grietas superficiales producidas durante los procesos de acabado superficial, poros, inclusiones y granos grandes, producidos durante el procesado.

Una de las características más positivas de los materiales cerámicos es su elevada resistencia a la corrosión y a la oxidación, frente a los diferentes agentes químicos. Los materiales cerámicos están compuestos por óxidos metálicos fundamentalmente, por lo que resulta prácticamente imposible una oxidación, es decir, las cerámicas son productos ya quemados y corroídos y, en consecuencia, no pueden someterse a otra degradación de este tipo, constituyendo unos excelentes materiales inoxidables. Poseen una gran estabilidad química, que se manifiesta a través de la impermeabilidad a la degradación ambiental (como la disolución en solventes) [Gibson y Ashby, 1999].

2.3.1 Carbonato y óxido de calcio

El carbonato de calcio es el principal mineral componente de la piedra caliza y existe en dos formas minerales y cristalinas: la calcita, de forma hexagonal. Los carbonatos naturales son los minerales de calcio más abundantes. El espató de Islandia y la calcita son formas esencialmente puras de carbonato, mientras que el mármol es impuro y mucho más compacto.

La calcita es un mineral de formación de roca, es muy común encontrarla en rocas sedimentarias, metamórficas y ígneas rocas; es el constituyente principal de la piedra caliza y mármol, estas rocas son extremadamente comunes y constituyen una porción significativa de la corteza terrestre y sirven como uno de los mayores depósitos de carbono en nuestro planeta [Camargo, 2003].

Tiene gran demanda como material de construcción. Aunque el carbonato de calcio es muy poco soluble en agua, pero aumenta la solubilidad considerablemente en agua que contenga dióxido de carbono disuelto, debido a la formación de bicarbonato de calcio más soluble, así se explica la formación de cavernas, donde los depósitos de piedra caliza están en contacto con fluidos ácidos.

Cuando el carbonato de calcio se calienta por encima de 840 grados centígrados, se descompone liberando dióxido de carbono gaseoso y dejando el óxido de calcio este es conocido como cal y es uno de los 10 productos químicos producidos anualmente por descomposición térmica de la caliza.

La descomposición térmica de carbonato de calcio es una de las reacciones químicas más antiguas conocidos. Desde hace varios miles de años, la cal se ha utilizado en el mortero (una pasta de cal, arena y agua) para consolidar piedras unos a otros en edificios, muros y carreteras.

Muchos lagos se han convertido en lugares ácidos debido a la contaminación aérea, para contrarrestar los daños ocasionados estos se pulverizan con carbonato de calcio en polvo o se aplica piedra caliza en polvo para neutralizar los ácidos; el sulfito de calcio puede absorber contaminantes, la cal viva se utiliza en grandes cantidades para limpiar el medio ambiente.

La piedra caliza y cal viva se utilizan para eliminar el dióxido de azufre producido en la quema de carbón en centrales eléctricas, incluso el carbón 'limpio' puede contener aproximadamente 1 por ciento de azufre. Los efluentes gases de combustión, a partir de la quema de carbón se pasan a través de una pulverización de piedra caliza finamente molida o cal viva en suspensión en agua con la finalidad de retener el bióxido de azufre y bióxido de carbono [Camargo, 2003].

Durante periodos de tiempo largo la cal reacciona con el dióxido de carbono del aire para formar cristales de carbonato de calcio, estos granos de se unen entre sí para formar un material parecido a una roca dura. Los absorbentes son sustancias que tienen la capacidad de "capturar" otra sustancia. La piedra caliza se trata a menudo y se utiliza como material absorbente durante la quema de combustibles fósiles. El carbonato de calcio reacciona con dióxido de azufre y otros gases en las emisiones de combustión, los absorbe, y evita que se escape a la atmósfera [Camargo, 2003].

El dióxido de carbono es un gas importante en el entorno de la Tierra, en la atmósfera que sirve como un gas de efecto invernadero que funciona para atrapar y retener el calor cerca de la superficie del planeta. El proceso de formación de piedra caliza elimina el dióxido de carbono de la atmósfera y lo almacena de distancia durante largos períodos de tiempo.

El óxido de calcio se obtiene mediante la calcinación de la caliza a una temperatura superior a los 900 grados centígrados y junto a un gran contenido en carbonato de calcio El óxido de calcio tiene numerosos usos y aplicaciones en diversos campos como, por ejemplo: depuración de gases, tratamiento de agua, industria del papel, elaboración de jabón, estabilización del suelo, fabricación de caucho, fabricación del carburo cálcico, se usa ampliamente un removedor de ácido en el tratamiento de humos en diversas industrias, tales como metales que producen, por lo tanto, el óxido de calcio absorbe bióxido de carbono de aire a temperatura ambiente [Sun, 2008].

2.3.2 Hidróxido de calcio

También es conocido como cal apagada o carburo de calcio que es un absorbente excelente para el dióxido de carbono, al producir el carbonato que es muy insoluble. El siliciuro de calcio es preparado en horno eléctrico a partir de cal, sílice y agentes reductores carbonosos, es útil como agente desoxidante del acero. El carburo de calcio se produce al calentar una mezcla de cal y carbón a 3,000 grados centígrados en un horno eléctrico y es un acetiluro que produce acetileno por hidrólisis. El acetileno es el material base de un gran número de productos químicos importantes [Ingram, 1990].

2.3.3 Cloruro de calcio

Los halogenuros de calcio incluyen el fluoruro fosforescente, que es el compuesto de calcio más abundante y con aplicaciones importantes en espectroscopia. El cloruro de calcio posee, en la forma anhidra, capacidad notoria de deliquesencia que lo hace útil como agente deshidratante industrial y como factor de control de tolvaneras en carreteras. El hipoclorito de calcio (polvo blanqueador) se produce en la industria al pasar cloro dentro de una solución de cal, y se ha utilizado como agente blanqueador y purificador de agua [Ingram, 1990].

2.3.4 Sulfato de calcio

El sulfato de calcio dihidratado es el yeso mineral, se emplea para reducir la alcalinidad de los suelos. Un hemihidrato del sulfato de calcio se produce por calentamiento del yeso a temperaturas altas, y se vende con el nombre comercial de estuco de París [Shazni, 2015].

2.4 Casos de aplicación de filtros con estructura celular

Actualmente los materiales cerámicos tienen un papel muy importante en la investigación y experimentación para ciertas aplicaciones en concreto, una de estas es la utilidad de los sólidos celulares en el filtrado de fluidos a través de una corriente, como los siguientes casos de aplicación.

2.4.1 Caracterización de una esponja cerámica para un filtro para agua

En el año 2014 una investigación reportó la síntesis y caracterización de una esponja cerámica, la cual se basa en la sedimentación de elementos cerámicos con el fin de obtener un filtro para agua potable capaz de remover impurezas por medio de una estructura celular, a través de un proceso químico [Sharmiwati, 2014]. En la actualidad existen diversas clases de filtros usados para la actividad doméstica, la mayoría de estos constan de 5 capas de elementos los cuales son: carbón activo, sílice, zeolita, bioball y arena mineral.

Esta esponja se produjo por el método de réplica de esponja con ayuda de una solución cerámica, secado y sinterizado. Producir esponjas con este método asegura que el tipo de celda del sólido celular sea abierta y resulte porosa. Además, existe un mayor control con la estabilidad a alta temperatura, alta resistencia a productos químicos, corrosión y alta dureza [Sharmiwati, 2014].

El óxido de la cerámica es el refuerzo de la esponja que ofrece una excelente resistencia a la fluencia a altas temperaturas y a la oxidación, mientras que la cerámica sin óxido contiene abrasivos; con estas características es posible que una esponja de este tipo sirva como catalizador entre gases de un combustible.

Sharmiwati en investigaciones anteriores dedujo que existe una relación directa entre la densidad y el tamaño de poro. Se utilizaron diferentes tamaños de esponjas poliméricas, entre los cuales son 20, 50, 80 y 100 poros por pulgada, con cortes de esponja entre 30 y 60 milímetros, en cambio, la preparación de la solución cerámica se caracterizó con densidades de 1.1845, 1.2798, 1.3567, 1.54332, 1.6543 y 1.7234 gramos por centímetro cúbico. Para la sinterización correspondiente, fue producida de acuerdo a la norma ASTM C271-94.

En los resultados se obtuvo que la densidad es directamente proporcional al tamaño de poro, debido a la baja viscosidad en la suspensión cerámica, a medida que aumenta el tamaño de poro por pulgada aumenta la contracción lineal. Durante el proceso de sinterización, los agujeros de la esponja polimérica se hicieron más pequeños y encogieron espuma.

La contracción lineal también afecta con porcentajes de carga sólida y temperatura de sinterización. El tamaño de poro de la esponja de cerámica depende del tamaño de poro de esponja polimérica, comúnmente para tamaño de esponja de 30 poros por pulgada el vacío es más grande. El tamaño máximo para el tamaño de poro es 1.601 mm^2 y puede proporcionar una alta permeabilidad a la esponja cerámica.

Para comprobar que la esponja cerámica es capaz de filtrar el agua, él autor experimento con el cartucho de un filtro común e introdujo la espuma cerámica, haciendo la misma tarea. Al finalizar se logró obtener agua limpia, sin embargo, no es para consumo humano ya que no se ha tratado químicamente para la eliminación de bacterias. Sharmiwati demostró un excelente uso de las esponjas cerámicas fabricadas por el método de réplica de esponja, ante esta posibilidad se puede someter a otros sistemas, puede soportar una temperatura de hasta 1250°C , una temperatura mayor afectará las propiedades mecánicas de la esponja.

2.4.2 Microestructura de esponjas cerámicas

Las esponjas cerámicas son altamente porosas, estos materiales se utilizan principalmente en aplicaciones donde se requiere transporte interno en la microestructura. Estas incluyen filtración de metal fundido, filtración de gas caliente, catalizadores. El método de réplica de espuma de polímero patentado por Schwartzwalder y Somers en 1963 parece ser el método más popular empleado para producir espuma de cerámica con celdas abiertas. Un posible inconveniente de este método es la tendencia a dejar un poro o residuo carbonoso en el centro de cada esqueleto del polímero cuyo evento persistió en los experimentos.

Con una espuma de poliuretano y los componentes, difenilmetano y base diisocianato Conde y Goodall diseñaron el sistema para formar una alta fracción de espuma de poliuretano. El componente de la solución cerámica consistió en una mezcla preformulada de catalizadores, estabilizadores celulares, agentes de soplado y otros aditivos que junto con el componente de isocianato determina el tipo de espuma de poliuretano producida.

El isocianato y el componente difenilmetano diisocianato, se mezclan con el polvo de cerámica seleccionado para los avances de la síntesis fue RA45E que es predominantemente alúmina d50 de 0.48 milímetros. Las espumas de cerámica disponibles comercialmente usados para la comparación fueron los grados PRO-AL10, 20, 25 y 30.

Las densidades de muestras cilíndricas deducidas de geometría y masa fueron 10, 17 y 28% de teórica respectivamente. La mezcla se hizo pasar en un agitador a 2400 revoluciones por minuto, durante un tiempo de 300 segundos, posteriormente se impregno la esponja de poliuretano durante 24 horas para poder entrar al horno de sinterización, empezando desde los 0°C y aumentando 10°C cada minuto hasta llegar a los 450°C, después se aumentó 5°C por hora hasta alcanzar los 1650°C.

Durante el inicio de la reacción a aproximadamente 60 segundos el poliuretano se expandió suficientemente para producir espumas de gran dimensión correspondientes al 93 por ciento de fracción vacía. En general, la espuma cerámica tiene una estructura similar a la espuma de poliuretano. En ninguno de los casos había una anisotropía perceptible de forma de celda asociada con la dirección de expansión.

Para una espuma cerámica producida por el método de réplica se observa que el embalaje de celdas casi esféricas que tienen casi el mismo tamaño se puede considerar como una matriz centrada en la cara con número de coordinación 12. Muchos modelos teóricos para los materiales celulares asumen que los materiales celulares o los poros son matrices cúbicas, Existen muchos informes de modelos para materiales celulares basados en número de coordinación de 12 y 14 que son revisados por los autores Gibson y Ashby.

La espuma de poliuretano de celda abierta tiene la estructura cúbica centrada del embalaje con el número de coordinación 8. Las estructuras celulares presentadas por las espumas cerámicas desarrolladas por Conde sugieren un número de coordinación de 12 que es más apropiado.

El tamaño de celda de los sólidos celulares de celdas abiertas es de 150 micrómetros debido a la distribución uniforme del tamaño de las celdas y el alto grado de reticulación han sido preparados desde un punto de vista comercial para sinterizarlos con poliuretano. Las espumas de este tipo no tienen defectos internos. Un modelo simple basado en la malla cúbica centrada en la cara relaciona adecuadamente los poros con la relación al del diámetro de la celda con la fracción de volumen vacío y esto se correlaciona con medidas microestructurales tanto en espumas hechas por la técnica descrita en este documento y comercialmente las espumas cerámicas de alta porosidad disponibles.

Capítulo 3

Metodologías para diseño y desarrollo de un nuevo producto

3.1 Introducción

Diseñar es el proceso para crear un plan que solucione una necesidad o resolver un conflicto, si en el proceso se involucra la innovación de un nuevo producto o de algo real en forma física entonces el dispositivo debe ser funcional, seguro, confiable, competitivo, útil, sea manufacturable y sea distribuible. Formular el diseño de un producto, requiere de ideas innovadoras, toma de la mejor decisión en la ruta de trabajo, en muchas ocasiones se requiere tomar decisiones aun cuando existe poca información del producto o condiciones de este.

En general, el proceso de diseño (Fig. 3.1) comienza con la identificación de una necesidad y la decisión de solucionar el problema, posteriormente se evalúa la presentación de planes para satisfacer esa necesidad. Estos pasos no necesariamente tienen que ir en este orden, se pueden iterar en secciones durante el tiempo del proceso de diseño [Shigley, 2008].



Figura 3.1: Proceso de diseño

En la definición del problema se agregan todas las especificaciones que el objeto debe tener por cualidades (cantidades de entradas y salidas, características, dimensiones, espacio del objeto, y limitaciones), estas definirán el costo, cantidades a utilizar, ciclo de vida esperado, confiabilidad, efectividad, etc.

En el diseño se juega con el proceso iterativo en el cual se evalúan diferentes pasos para lograr resultados donde se estudiará la viabilidad de la solución y luego se regresa a una fase inicial del procedimiento. De esta manera es posible sintetizar varios componentes de un sistema, analizar y optimizarlos y regresar a la síntesis para ver qué efectos tiene sobre las partes restantes del sistema.

El diseño de un nuevo producto busca la mejor solución a un problema planteado. En general, los problemas que se presentan al ingeniero tienen una característica en común: son abiertos, esto quiere decir, que admiten múltiples soluciones; a una de ellas se considera la mejor por 'mejor' se entiende la que satisface simultáneamente una serie de restricciones (tiempo, costo, calidad, entre otros) en cierto modo opuestas, y optimiza un conjunto de criterios de selección.

No todos los problemas que resuelve el ingeniero son abiertos; muchos de ellos solamente tienen una única solución que se obtiene, generalmente, a través de métodos matemáticos. Con frecuencia, durante el proceso de diseño de la solución a un problema abierto debe resolverse una serie de subproblemas específicos, muchos de los cuales se consideran cerrados: solamente admiten una solución.

Dentro de los objetivos principales que persigue el diseño son: conocer las características de un problema abierto, aprender a usar un método de diseño en ingeniería, comprender la importancia de las actitudes en la solución de problemas en ingeniería, describir los pasos del método escogido para el diseño, identificar las habilidades para cada uno de los procesos e identificar las habilidades requeridas para avanzar eficientemente en la solución de un problema.

Una de las principales actividades de los ingenieros es demostrar que el conocimiento científico e ingenieril es aplicable en la solución de problemas profesionales, técnicos o sociales que se experimenta a diario; la solución propuesta debe ser diseñada y perfeccionada para cumplir con los requerimientos y restricciones que exija su aplicación.

Es importante establecer los límites y el alcance de solución del problema para la propuesta metodológica del diseño; indicando que se pretende hacer y a qué punto se quiere llegar. Esta etapa puede ser de las más complicadas, ya que una equivocación a esta altura podría representar un error al final del proceso de diseño.

El proceso del diseño creativo se hace intuitivamente, como un arte, esta técnica es una de las pocas áreas donde la experiencia es más importante que el conocimiento técnico y teórico. En la actualidad se necesita una base firme para el diseño, que pueda dar al ingeniero el beneficio de las herramientas científicas que le asegure el éxito completo en el desarrollo de productos [Shigley, 2008].

3.2 Diseño conceptual

El diseño conceptual es el método de evaluar diferentes propuestas de solución para un problema de ingeniería a través de la generación de conceptos. Este proceso va ligado a la innovación del producto o servicio que sorprenda al cliente, una respuesta directa a una necesidad de mercado conocida o un incremento en el desempeño competitivo de un producto.

Existen diferentes métodos de diseño, sin embargo, el diseño conceptual se ha basado en técnicas poco formales. Aunque las herramientas usadas por los ingenieros de análisis son muy eficientes, hay una incongruencia, porque en muchos casos se están tratando de optimizar mediante dichas herramientas, conceptos de solución erróneos, esto puede dar como resultado un dispositivo con desempeño bajo, desperdicio de materiales, dinero y tiempo [Fawlkes, 1995].

En el presente capítulo se describen las principales actividades desarrolladas para integrar la metodología TRIZ y QFD para el diseño de una esponja de calcio abarcando los aspectos de reconocimiento de cualidades, definición de lineamientos y criterios para el diseño del producto que definen las estrategias consideradas como determinantes, para aportar soluciones.

Por lo anterior, es preciso utilizar metodologías que refuercen el diseño conceptual; para este caso se valdrá de dos importantes: QFD [*Quality Function Deployment*, Despliegue de la función de calidad] y TRIZ [*Teoriya Resheniya Izobretatelskikh Zadatch*, Teoría para la resolución de problemas inventivos]. En este trabajo se buscará identificar en qué etapas del diseño se puede hacer uso de TRIZ para facilitar el diseño conceptual y complementar otras técnicas como QFD.

Las herramientas metodológicas TRIZ y QFD tienen características que posibilitan su integración para complementarse y facilitar el diseño conceptual, así el proceso es más eficiente para el desarrollo de nuevos productos. En este capítulo se pretende identificar en qué etapas del diseño se puede hacer uso de la metodología TRIZ para facilitar el diseño conceptual y complementar el proceso de diseño con la técnica QFD.

Dichas herramientas permitirán generar un modelo que aprueben la confiabilidad, accesibilidad y se logrará que estas metodologías en forma integral generan el mejor proceso para el desarrollo del producto en el menor lapso de tiempo. La integración de ambas técnicas se complementa facilitando el diseño conceptual y mejor utilidad en el resultado de del proceso de desarrollo de nuevos productos. Esto se logra integrando los aspectos comunes y eliminando repeticiones innecesarias.

3.2.1 Metodología QFD

Esta metodología trabaja a través de una matriz de calidad que sintetiza la relación entre necesidades potenciales del producto y las características de calidad incorporada al producto, los principales objetivos se plasman en la siguiente lista:

- Establecimiento de la calidad de diseño y la calidad planificada
- Desarrollo de nuevos productos
- Acumulación y análisis de información sobre la calidad
- Comunicación a procesos posteriores de información relacionada con la calidad
- Identificación de puntos de control para el piso de la planta
- Reducción del número de problemas iniciales de calidad y cambios del diseño
- Reducción del tiempo y de los costos de desarrollo

La metodología QFD es un mapa conceptual que relaciona los requerimientos de los clientes (que abreviamos RC) con las características técnicas (CT) necesarias para satisfacerlos. Estas relaciones se presentan en forma de una tabla elaborada llamada "matriz de la calidad". Tomados en su conjunto, los RC definen la calidad de un producto y son las expresiones que los clientes utilizan para describir los productos y sus características deseables. Asociada con cada CT existe una métrica, que se usa para determinar el grado de satisfacción de los clientes con cada uno de sus requerimientos. Esta medida es fundamental para la mejora continua [Cristofari, 1996].

Los RC se indican en la dimensión vertical de la matriz de la calidad; las CT, en la horizontal. Tanto los primeros como las segundas suelen ser numerosos y se agrupan en varios niveles, según su grado de abstracción. Esta multiplicidad no es caprichosa. El gran número de los RC responde a las variadas dimensiones de la calidad y la cantidad de las CT es consecuencia de la creciente complejidad tecnológica de los productos modernos.

Dado que no todas las CT contribuyen a conformar un RC dado, debe indicarse la relación entre las distintas combinaciones de RC y CT; esta relación se muestra en los cruces de las filas y columnas de la matriz, con símbolos que reflejan la intensidad del vínculo. Una adecuada comprensión de las relaciones entre RC y CT facilita el balance entre las demandas de los clientes con el potencial tecnológico de la empresa; este balance ejerce un impacto, finalmente, en la ecuación económica.

La matriz de la calidad contiene otros elementos importantes:

- Una columna con la prioridad que los clientes asignan a cada RC
- Una columna que compara, para cada RC, el producto a diseñar con los de la competencia
- Una fila que pondera numéricamente la importancia de cada CT con respecto a las demás
- Un valor objetivo fijado para cada CT
- Un panel triangular que indica la correlación existente entre las distintas CT

Antes de presentar el desarrollo metodológico, se presentan los beneficios de trabajar con QFD:

- Herramienta muy importante en el marketing
- Fomento de innovación y ventajas competitivas
- Mejor comunicación interfuncional
- Determinación de prioridades de mejora continua
- Análisis de costos y beneficios

Los factores funcionales representados en la casa de calidad son representaciones del árbol funcional y no deben contener decisiones de diseño, esto es, no debe haber ninguna característica de calidad que permita identificar el producto sino solamente las que representen lo que hace el producto, debido a que se podrían limitar las oportunidades de diseño creativo [Clausing, 1993].

Se puede establecer el estado que debe tener el producto o las restricciones de diseño, por ejemplo: peso, resistencia a la corrosión, ergonomía, apariencia, sabor, olor, etc. Puede haber muchos tipos de restricciones como costo, forma geométrica, peso y apariencia o calidad estética. Las restricciones difieren de los factores funcionales en que, mientras el diseño del producto no viole las restricciones, la solución es aceptable.

Otro apoyo para identificar las características de calidad apropiadas es distinguir los factores funcionales de los efectos perjudiciales laterales o los modos de falla del sistema [Fowlkes, 1995]. Hay que enfocarse en la parte útil y eficiente de las transformaciones de energía durante el funcionamiento del producto. El funcionamiento ideal debe expresarse como una relación dinámica, usando la salida deseada del sistema como si no tuviera pérdidas ni efectos perjudiciales. A continuación, se indican algunas propiedades deseadas que deben satisfacer las características de calidad [Fowlkes, 1995]:

1. Las características deberán ser continuas, cuantitativas y fáciles de medir. Para medir propiamente el flujo de energía a través del diseño, se debe seleccionar una variable continua como una medida del desempeño funcional. No se deben usar medidas indirectas que sean típicas de un comportamiento observable por el cliente. Todas las características de calidad deben poder ser medidas, por lo tanto, en este paso el equipo de diseño debe de dejar bien definido la forma en que se van a medir cada una de ellas, debe asegurarse de que exista un test para medir esos parámetros y si no existe diseñarlo y debe definir los aparatos de medición que serán usados para cuantificarlas.
2. Las características de calidad deberán tener un cero absoluto. Un cero absoluto significa que no puede haber valores negativos en los resultados.
3. Las características deberán ser aditivas o al menos iguales relativas a sus efectos. La complejidad o lo directo de la relación entre las características de calidad y los factores de control determinan si el sistema es aditivo, igual o interactivo. Si un sistema es aditivo o igual esto depende del concepto de diseño, los parámetros de diseño y la calidad.

4. Las características deberán ser completas. Una característica de calidad es completa si provee toda la información necesaria para describir el funcionamiento ideal.
5. Las características deberán ser fundamentales. Una respuesta es fundamental si no entremezcla mecanismos y no es influenciada por factores externos al sistema.

Además de estas guías para identificar las características de calidad de la metodología QFD, ahora se puede hacer uso de la metodología TRIZ presentada a continuación.

3.2.2 Metodología TRIZ

Esta metodología es una estructura para resolver problemas basados en ciencia y tecnología que requieran un alto grado de creatividad e inventiva, los cuales pueden ser de cualquier área tecnológica; con ello, se ha identificado los principios y la organización del conocimiento para la resolución de problemas técnicos de gran dificultad, que requieren soluciones totalmente innovadoras e ingeniosas. TRIZ permite:

- Simplificar técnicamente los productos y los procesos, ganando en costos, fiabilidad y vida media. La mejor máquina es la que no existe, pero sus funciones siguen dando servicio.
- Resolver conflictos y contradicciones técnicas sin necesidad de soluciones intermedias ni de optimización del compromiso.
- Concebir de forma rápida, las próximas generaciones de productos y procesos. Reducir el ciclo de desarrollo partiendo inicialmente de un concepto correcto.
- Resuelve los conflictos técnicos (cuando la mejora de un parámetro o componente de un sistema, conlleva la penalización de otro), aplicando principios de invención estandarizados. TRIZ evita llegar a soluciones intermedias o de optimización del compromiso.
- Conduce hacia el conocimiento científico y técnico, necesarios para resolver el problema. En muchas situaciones la dificultad del problema estriba en que la solución está fuera del campo de especialidad del técnico, de la empresa, del sector, o incluso industrial
- Es una excelente herramienta para la previsión tecnológica. Esto es, dada una necesidad funcional cualquiera, TRIZ predice con detalle un diseño que satisfará la función.
- Las soluciones obtenidas son en muchos casos patentables, y la propia metodología ayuda a conseguir una mejor calidad en la cartera de patentes.

TRIZ se aplica a problemas de todos los sectores industriales, cualquiera que sea su dificultad. Aunque parezca radical, TRIZ ofrece soluciones conceptuales para cualquier problema. A su vez, si la implementación de dichas soluciones conlleva nuevos problemas, se puede aplicar de nuevo TRIZ, para resolverlos.

Aplicar TRIZ incluye una correcta definición del problema e identificar la necesidad concreta de mejora o novedad como elementos necesarios para utilizar las herramientas y bases de conocimiento.

3.2.3 TRIZ en la construcción de la casa de la calidad

La metodología QFD permite jerarquizar problemas a soluciones, identificar conflictos de diseño en los sistemas existentes mediante la matriz de correlación ‘el techo de la casa de calidad’ y establecer criterios para evaluar las alternativas de diseño. Si se pueden relacionar las características de calidad con parámetros propuestos, al momento de identificar conflictos en el techo de la casa se podría hacer uso de la tabla de contradicciones de la metodología TRIZ.

La tabla de contradicciones ofrece un medio muy eficiente para generar soluciones creativas e innovadoras para los problemas difíciles jerarquizados en el QFD al resolver conflictos entre las características de calidad. Esta tabla de contradicciones se utiliza para mejorar productos que ya se encuentran en el mercado, el objeto de esta tesis es proponer el diseño de un producto nuevo.

El primer paso es identificar cuáles de los parámetros que cumplen con la descripción de características de calidad. Por lo que se mencionó anteriormente las características de calidad representa los factores funcionales, esto es, las variables de salida que representan el funcionamiento del sistema. También como características de calidad se incluyen aquellas que establecen el estado que debe tener el producto, es decir, las restricciones, pero es importante diferenciarlas de los efectos perjudiciales y modos de falla.

Basándose en los criterios anteriormente descritos, los parámetros se pueden incluir como características de calidad o factores funcionales están los siguientes (el número indica el parámetro asignado). Estos parámetros (Fig. 3.2) también reciben el nombre de *parámetros de Altshuller* en honor al ingeniero que los propuso y asigno el valor numérico del parámetro.:

1	Peso de un objeto en movimiento	11	Tensión / Presión	21	Potencia	31	Efectos secundarios dañinos
2	Peso de un objeto sin movimiento	12	Forma	22	Desperdicio de energía	32	Manufacturabilidad
3	Longitud de un objeto en movimiento	13	Estabilidad de un objeto	23	Desperdicio de sustancia	33	Conveniencia de uso
4	Longitud de un objeto sin movimiento	14	Resistencia	24	Pérdida de información	34	Reparabilidad
5	Área de un objeto en movimiento	15	Durabilidad de un objeto en movimiento	25	Desperdicio de tiempo	35	Adaptabilidad
6	Área de un objeto sin movimiento	16	Durabilidad de un objeto sin movimiento	26	Cantidad de sustancia	36	Complejidad de un mecanismo
7	Volumen de un objeto en movimiento	17	Temperatura	27	Confiabilidad	37	Complejidad de control
8	Volumen de un objeto sin movimiento	18	Brillo	28	Precisión de mediciones	38	Nivel de automatización
9	Velocidad	19	Energía gastada por objeto en movimiento	29	Precisión de manufactura	39	Productividad
10	Fuerza	20	Energía gastada por objeto sin movimiento	30	Factores perjudiciales actuando en objeto		

Figura 3.2: Asignación de parámetros

Los parámetros son demasiado generales y solo pueden ser medidos mediante métodos indirectos. Sin embargo, en todo caso pueden sustituirse por un parámetro físico mensurable relacionado con el mismo fenómeno. Como características de calidad se incluyen también los parámetros que establecen el estado que debe tener el producto, es decir, características geométricas o parámetros relacionados a cómo el producto debe ajustarse a otros objetos existentes.

A su vez, existen 40 principios inventivos, (Fig. 3.3) el uso de estos principios puede traer soluciones innovadoras a las contradicciones planteadas:

1	Segmentación	11	Amortiguación anticipada	21	Velocidad	31	Porosidad
2	Separación/Extracción	12	Equipotencialidad	22	Conversión de efectos dañinos en beneficios	32	Cambio de color
3	Calidad local	13	Inversión	23	Feedback	33	Homogeneidad
4	Asimetría	14	Esferoidalidad	24	Intermediación	34	Restauración y recuperación de partes
5	Combinación	15	Dinamicidad	25	Autoservicio	35	Transformación de parámetros físico - químicos
6	Universalidad	16	Parcialidad o excesividad	26	Copia	36	Transición de fase
7	Anidación	17	Nueva dimensión	27	Relación de coste - vida útil	37	Expansión térmica
8	Contrapeso	18	Vibración mecánica	28	Sustitución mecánica	38	Fuerte oxidación
9	Reacción previa	19	Periodicidad de acciones	29	Uso de construcción neumática o hidráulica	39	Atmósfera inerte
10	Acción previa	20	Continuidad de acciones útiles	30	Películas flexibles o membranas delgadas	40	Composición de materiales

Figura 3.3: Principios inventivos

Los parámetros de Altshuller y los principios inventivos Anexo 2 se utilizan para crear la matriz TRIZ. la cual muestra los 40 principios inventivos se han utilizado con mayor frecuencia para resolver un problema que implica una contradicción particular en base a los 39 parámetros de Altshuller. Para este caso de estudio se utilizarán estos parámetros para construir el techo del a casa de la calidad.

El proceso de identificación de la correspondencia de las características de calidad con los 39 parámetros de la metodología TRIZ clásica es un paso importante, pues en ocasiones los primeros son una derivación directa o indirecta de los últimos. Además, desde el punto de vista de ingeniería, es posible saber si las características de calidad que presentan conflicto o contradicción pueden ser identificadas con los correspondientes parámetros.

El uso de la metodología TRIZ se está extendiendo a pasos grandes, por ejemplo, cada vez más común en procesos Six Sigma, en sistemas de gestión de calidad y de administración de riesgos de proyectos, también en iniciativas de innovación organizacional.

3.3 Desarrollo de un nuevo producto

Ciertamente que, para desarrollar un nuevo producto, este debe satisfacer una necesidad al usuario o debe cumplir con un deseo que el cliente quiera obtener. Es importante diferenciar las características del diseño de la espuma cerámica, es decir, esta espuma puede ser ‘adecuada’ para cumplir un proceso o puede ser ‘óptima’ para satisfacer una necesidad. En este caso lo mejor es inclinarse por una espuma cerámica orientada a que sus características sean óptimas y cumpla con lo que ofrece.

La fabricación e implementación de una espuma cerámica, supone satisfacer una necesidad, no solo al propietario de un vehículo o por un requerimiento obligatorio, sino por varios motivos: la claridad a la necesidad de respirar una mejor calidad de aire, la frecuencia y recurrencia que la contaminación ha afectado la forma de vida sin mencionar que es de duración constante y prolongada. La urgencia de reducir la contaminación y frenar el calentamiento global debe ser atendida a la brevedad.

El desarrollo de un producto supone un ciclo que se debe cumplir, desde que inicia la idea del producto, hasta que sale al mercado y en algunos casos el tratamiento de los residuos cuando el tiempo de vida del producto se acaba. En este y el siguiente capítulo se desarrollaron las siguientes actividades para la construcción exitosa de este.

- Detectar la necesidad
- Definir la tecnología
- Definir conceptos básicos
- Mercado potencial
- Diseño conceptual
- Diseño de detalle
- Implementación

El alcance de las actividades desarrolladas únicamente llega a la investigación y propuesta. Dado que por el momento no se cuenta con la tecnología disponible para implementar la espuma y hacer pruebas de efectividad.

Capítulo 4

Propuesta de diseño para un filtro cerámico

Implementar las espumas cerámicas en los automóviles de combustión interna, tiene dos ventajas referentes al mercado disponible: el cliente es quien lo obtendrá e introducirá en el sistema de escape de su vehículo y el usuario al fin del día son quienes gozaran de las virtudes de la esponja, respirando una mejor calidad en el aire.

El mercado es el conjunto de personas que manifiesta voluntad y tiene necesidad y conciencia de disfrutar del producto o servicio. El oferente es quien posee la estrategia tecnológica y/o la capacidad de producir este producto y satisfacer la demanda. El cliente es quien tiene la necesidad y está consiente de adquirir el producto y/o servicio mientras que el usuario es quien lo goza.

Por otro lado, también es necesario estudiar la aceptación de la introducción de un producto nuevo, con ello es necesario desarrollar un estudio al mercado y con ello verificar que la propuesta es ideal. Es un reto anticiparse y conocer los efectos de la competencia sí es que esta existe, para esta sección se hizo una encuesta durante fines del año 2016 a 10 grupos de 100 personas en 10 puntos diferentes de la CDMX: Narvarte poniente, Lindavista, Xalpa, Doctores, Agrícola oriental, Pedregal, Tlalnepantla, Apatlaco, Condesa y Roma (para mayor información véase Anexo 1).

Las preguntas de la encuesta fueron cerradas y se implementó al mismo tiempo de manera colectiva para cada uno de los 10 grupos de 100 personas cada uno (Fig. 4.1). Posteriormente solo fueron cuantificadas las respuestas de las personas que contaban con automóvil propio y utilicen algún tipo de combustible fósil (Tabla 4.1), con esto la muestra final se redujo a 788 personas.

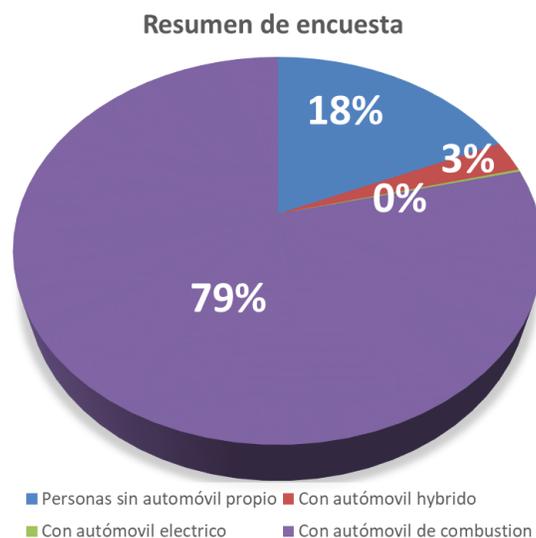


Figura 4.1 Resumen de las personas que cuentan con automóvil

Tamaño de la muestra: 1,000			
-----------------------------	--	--	--

Rango de edad			Total
18 - 30	30 - 50	50 - 80	1,000
384	412	204	

Sexo			Total
Masculino	Femenino		1,000
638	362		

Auto propio			Total
Si	No		1,000
816	184		

¿Cuál es la clasificación?			Total
Hybrido	Eléctrico	Combustible	816
26	2	788	

¿Cuál es su categoría?			Total
Automóvil	Camioneta	Camion de 3	788
591	194	3	

Problemas al verificar			Total
Si	No		788
653	135		

Modelo							Total
1970 - 1979	1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2004	2004 - 2009	2010 - 2016	Otro	788
8	33	146	199	226	176	0	

¿Qué tipo de engomado tiene ?			Total
Cero	Uno	Dos	788
196	383	209	

¿Comprarías un dispositivo intercambiable que ayude a bajar los niveles de emisiones contaminantes en tu automóvil y puedas circular todos los días sin restricciones?			Total
Si	No		788
702	86		

¿Estarías de acuerdo que sea obligatorio para todos los automóviles en la CDMX?			Total
Si	No		788
687	101		

¿Cuántas veces al año estarías de acuerdo			Total
2 veces	3 veces	4 veces	788
476	281	31	

¿Cuanto estarías de acuerdo a pagar (en pesos) por el dispositivo junto con su			Total
300 - 449	450 - 649	650 - 900	788
509	237	42	

Tabla 4.1: Resumen de la encuesta

La mayoría de los encuestados es de edad mediana, con un rango entre los 25 y 50 años de edad, predominó el sexo masculino con un 64 por ciento, mientras el 36 por ciento restantes es femenino. En la actualidad un mayor porcentaje de varones conducen en comparación con las mujeres que lo hacen. De cierto modo resultó muy bien la proporción entre el rango de edad y sexo.

Lo más importante de esta encuesta es cuantificar las personas que contaban con automóvil propio de combustión interna. Solamente con estos encuestados siguieron las demás preguntas, reduciendo la muestra de 1000 a 788 personas, las cuales el 82 por ciento tiene automóvil propio y de este total el 97 por ciento cuenta con automóvil a gasolina o diésel.

De estos, el 75 por ciento cuenta con automóvil compacto, mientras que el restante camión o camioneta de carga. El 83 por ciento tiene dificultades de verificar su vehículo donde la mayoría está concentrado en modelos del año 2000 a 2016, la mínima población cuenta con automóviles modelo 1999 y anteriores.

Aunque predomina en la población el problema para verificar, el 49 por ciento tiene engomado 1 (donde se prohíbe usar el vehículo un día a la semana y dos sábados al mes), el 26 por ciento tiene engomado 2 (donde se prohíbe el uso de automóvil un día a la semana y todos los sábados del mes). Solo el 25 por ciento de la población cuenta con engomado 0 o 00 que permite el uso de vehículo cualquier día por semana.

El 89 por ciento de los encuestados compraría el dispositivo por un precio promedio de 300 a 499 pesos mexicanos y dispuestos a reemplazarlo 2 veces al año. El 87 por ciento piensa que este debe ser de uso obligatorio. Al concluir la encuesta varios de los asistentes tuvieron curiosidad y hubo comentarios de que es mejor invertir en un dispositivo de filtrado que solucione parte del problema de contaminación a pagar sobornos por aprobar la verificación.

4.2 Integración QFD y TRIZ

No todas las metodologías de diseño son un proceso lineal y parametrizable pues existen técnicas ligadas a la creatividad en la solución de conflictos. Se puede definir al diseño como todos y cada uno de los procedimientos, técnicas, ayudas o herramientas para crear un producto, sin embargo, para su estudio es necesario que lo esquematicemos de alguna manera, como el de la generación de nuevos servicios y/o productos. Para esta sección de la tesis, se presenta el diseño conceptual de la esponja cerámica a través de las metodologías QFD y TRIZ, durante la etapa de desarrollo de especificaciones de diseño.

El diseño es analizar, planificar y ejecutar; es una herramienta estratégica para mejorar la competitividad de satisfacer una necesidad. Para obtener un producto hay que realizar una serie de pasos: en primer lugar, se encuentra la definición estratégica, que muestra que se va a hacer; en segundo lugar, se realiza un diseño de concepto, donde se mencionan las especificaciones generales del producto, si el producto se demuestra viable entonces tiene sentido hacer un diseño preliminar que dará lugar al tercer paso: el diseño detallado, donde se afinan los últimos detalles al mismo tiempo se empieza a planificar el diseño del proceso que sería la siguiente etapa.

La última fase se llama: implantación, donde generalmente hay que reanalizar ventas, tiempos, saturación, introducción, madurez, declive, crecimiento, diseño de sistemas productivos y logísticos tanto del producto como del proceso. Todas las fases están íntimamente relacionadas y, en numerosas ocasiones, deben desarrollarse simultáneamente. El alcancé de la presente tesis es el diseño conceptual de un dispositivo fabricado con una espuma cerámica de carbonato de calcio para la disminución de gases de combustión emitidos por vehículos de combustión.

Esta metodología es una actividad puntual que esquematiza el desarrollo conceptual y concreto de la esponja, el modelo de proceso de diseño que se presenta a continuación enfoca el recorrido que se llevó a cabo para el diseño final; está organizado en fases de trabajo con objetivos específicos donde se trabaja con cualidades inventivas y creativas de implementación y control. Es importante que en el proceso de diseño se disminuya el margen de error con base a la literatura a partir de cumplir los objetivos en cada fase.

En este capítulo se presenta la definición estratégica seguido del desarrollo integral, primero se desarrollarán las especificaciones de diseño con el propósito de evaluar la conexión entre TRIZ y QFD.

4.2.1 Definición estratégica

¿Qué? – Este es el inicio del proceso de diseño. Se detectó que el problema de contaminación del aire es generado principalmente por los vehículos de combustión interna que circulan en las grandes ciudades. Los gases de escape tienen una relación estrecha con el calentamiento global y sus consecuencias actuales en el mundo. Gracias a las pocas e ineficientes soluciones ante el problema se han derivado problemas sociales, económicos y saludables para los humanos principalmente en las metrópolis.

¿Para qué? – El principal esquema de solución viable es la representación de un sólido celular capaz de absorber y retener algunos de los principales agentes contaminantes que intervienen en los problemas ya mencionados, estos gases son el monóxido de carbono, dióxido de carbono y de azufre.

La definición de estrategia consiste en una lista de verificación, es un método que utilizamos en la vida diaria para empezar un plan y reunir la materia necesaria para satisfacer una necesidad. Es sencillo planificar que es lo que se tiene que hacer, sin dejar nada a la memoria y no sea necesario de recordar y evitar olvidar algo. La lista formaliza el proceso haciendo un registro de puntos, los cuales pueden tacharse a medida que se recopilan o se logran, hasta que todo esté completo.

La lista es un modelo para la mayoría de los modelos de diseño con marco de referencia lógico. En términos de diseño, una lista de verificación puede ser una lista de preguntas que deben hacerse en las primeras etapas del diseño, una lista de características que deben incorporarse en el diseño, o una lista de criterios, normas, etc., que debe satisfacer el diseño final.

Se utiliza el formato general (Tabla 4.2) para el diseño en ingeniería y se plasma los requerimientos y cualidades necesarias para cumplir con los objetivos, se incluye en la lista conceptos generales de normas de seguridad y calidad, esta lista sirve para las siguientes etapas de diseño.

Tabla 4.2: Lista de verificación

Lista de Verificación					
Fuerzas	Tipo de flujo	X	Geometría	Altura	X
	Dirección	X		Diámetro	X
	Magnitud	X		Tolerancias	X
	Elasticidad			Tipo de celda	X
	Deformaciones		Materiales	Propiedades físicas	X
	Peso	X		Propiedades químicas	X
Energía	Eficiencia	X		Flujo de gases	X
	Pérdidas		Seguridad	Normas y reglamentos	X
	Fricción			Medio ambiente	X
	Ventilación	X	Producción	Limitaciones	X
	Presión	X		Técnicas	X
	Temperatura	X	Calidad	Error y prueba	
	Calor	X		Estandarizaciones	
	Capacidad				
	Entrada	X			
	Salida	X			

En el mundo existen todo tipo de métodos empleados para el diseño que cubren los aspectos más esenciales, desde la clarificación del problema hasta el diseño de detalle. La selección de los métodos utilizados (Tabla 4.3), son los más adecuados para cada etapa del proceso [Cross, 1999.]

Tabla 4.3: Etapa del proceso estratégico

Etapa del proceso	Método elegido	Finalidad
Depuración de objetivos	Árbol de objetivos	Clarificar los objetivos de diseño
Establecimiento de funciones	Análisis de funciones	Establecer las funciones requeridas y los límites del diseño
Fijación de requerimientos	Especificaciones de rendimiento	Especificar de manera exacta el rendimiento requerido
Determinación de características	Despliegue de la función de calidad	Fijar las metas a alcanzar que satisfaga el problema

4.2.2 Depuración de objetivos

Es importante en los primeros pasos depurar los objetivos de diseño y en cada etapa lograr los objetivos propuestos. Los procedimientos propuestos deben satisfacer los objetivos iniciales, aun cuando estos vayan cambiando conforme el desarrollo del proceso o nuevas ideas de solución.

Existe la posibilidad que tanto los fines como los medios vayan cambiando durante el proceso de diseño, por lo que un planteamiento de objetivos resulta muy útil en el momento del desarrollo. Este planteamiento deberá estar en una forma que se entienda fácilmente y acorde con lo que pretende lograr el diseñador y el objetivo principal.

4.2.3 Árbol de objetivos

Este método tiene un formato bastante útil para el planteamiento donde se estudian los objetivos y los medios generales para alcanzarlos, mediante un diagrama se pueden ver las formas en que los diferentes objetivos se relacionan entre ellos, con el patrón jerárquico de los objetivos y con los objetivos secundarios, este procedimiento ayuda a clarificar los objetivos.

4.2.4 Procedimiento

En primera instancia se debe contar con una lista de objetivos de diseño que resultaron del planteamiento del diseño a partir de la problemática a resolver. La propuesta solución es que la esponja se coloque en la última sección del tubo de escape de los automóviles y funcione como un elemento de filtrado externo de gases, a continuación, se enlista la propuesta principal de objetivos:

- La esponja debe implementarse en los automóviles de combustión interna
- Se debe reemplazar cada lapso de tiempo
- Debe representar una operación fiable
- Debe ser un elemento de filtrado de bióxido de carbono, monóxido de carbono y azufre.
- Debe ser fácil de colocar y retirar
- Debe tener medidas estándares de acuerdo con las tuberías de escape
- Debe ser ligera
- Que la manufactura sea sencilla
- Errores mínimos en su fabricación
- No debe obstruir
- No debe comprometer la eficiencia de los motores

Posteriormente se ordena de forma prioritaria en subconjuntos de mayor a menor nivel, iniciando por los objetivos primarios y siguiendo por los objetivos secundarios, el ordenamiento se realiza en orden jerárquico, como se muestra a continuación:

1. No debe comprometer la eficiencia de los motores
 - Debe de ser un elemento de filtrado
 - Debe retener bióxido de carbono, bióxido de azufre y monóxido de carbono
 - No debe de obstruir
 - No debe funcionar como un tapón
 - No debe salir disparado por efecto de la dirección de flujo
 - Debe ser ligera
 - Aproximadamente el material debe representar el 3 por ciento respecto al volumen
2. Que la manufactura sea sencilla
 - Errores mínimos en su fabricación
 - La esponja obedezca a un patrón homogéneo de celda abierta
 - Debe haber continuidad constante en todo el dispositivo
 - Debe tener medidas estándares de acuerdo a las tuberías de escape
 - Al menos son cuatro medidas estándares para motos, autos, camionetas y camiones
3. La esponja debe implementarse en los automóviles de combustión interna

- Debe ser fácil de colocar y retirar
 - Se pretende que el usuario haga los reemplazos pertinentes
- Debe representar una operación confiable
 - No se debe aflojar o remover inusualmente
 - No debe haber reacciones con el fluido de emisión
 - No debe haber descomposición térmica
 - No debe fallar por fatiga
- Se debe reemplazar cada lapso de tiempo
 - Se debe dar un tratamiento posterior al residuo de la esponja utilizada

Por último, se dibuja una representación esquemática del árbol de objetivos con relaciones jerárquicas e interconexiones (Fig. 4.2). Esta es la base para la siguiente etapa de diseño:

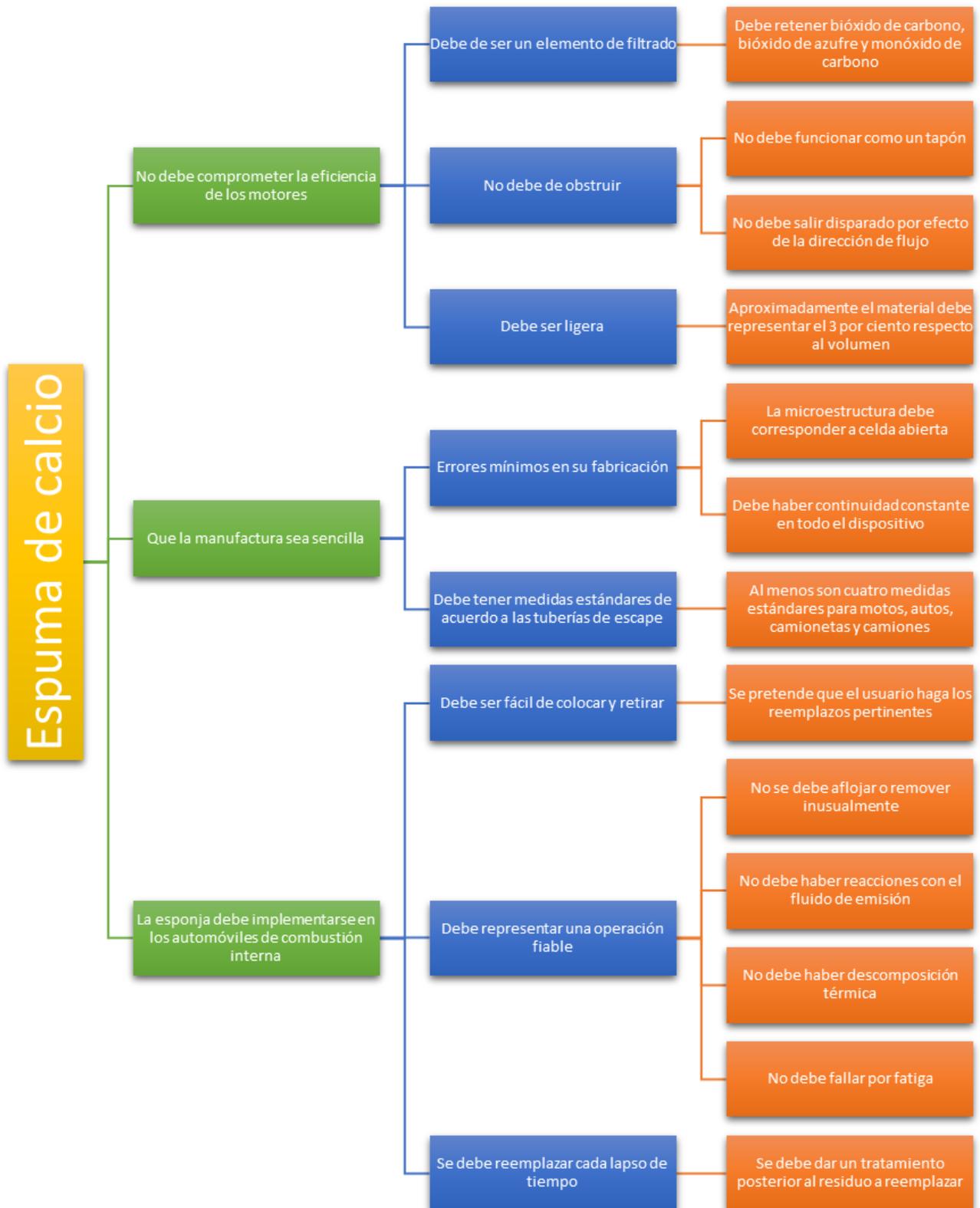


Figura 4.2: Árbol de objetivos

4.2.5 Establecimiento de funciones

Los problemas de diseño tienen diferentes niveles de detalle y cómo abordar el problema, por otro lado, es importante conocer a qué nivel se plantea el problema de diseño y cuál será el alcance de este, servirá para proponer ideas radicales e innovadoras. Por lo tanto, conviene contar con un medio para considerar el nivel del problema, también es muy útil si esto puede hacerse en una forma que no considere el tipo de solución potencial, sino las funciones esenciales que un tipo de solución debe satisfacer. Esto le da libertad para desarrollar propuestas de solución alternativas que satisfagan los requerimientos funcionales.

4.2.6 Análisis de funciones

Este método permite considerar las principales funciones esenciales y a qué nivel debe estudiarse el problema, éstas son consideradas como aquellas que debe satisfacer el dispositivo a diseñar, independientemente de los componentes físicos que pudieran utilizarse. El nivel del problema se decide estableciendo "límites" alrededor de un subconjunto coherente de funciones.

4.2.7 Procedimiento

La forma más sencilla de expresar esto consiste en representar el dispositivo a diseñar en una forma tan simple como una "caja negra" que convierte ciertas "entradas" en "salidas" deseadas. La "caja negra" contiene todas las funciones que son necesarias para convertir las entradas en las salidas. Es preferible al inicio hacer que la función de la caja negra sea general, también es importante tener en cuenta en todo momento el propósito fundamental del dispositivo.

Tener claro cuáles son las entradas y salidas del dispositivo ayuda a conocer los límites del sistema, es decir, definir la función del dispositivo a utilizar. En este caso resulta evidente reconocer que las entradas del sistema son todos los gases de escape producidos por la combustión del motor, mientras que las salidas son los mismos gases de entrada, pero sin bióxido de carbono, bióxido de azufre y monóxido de carbono (Figura 4.3).

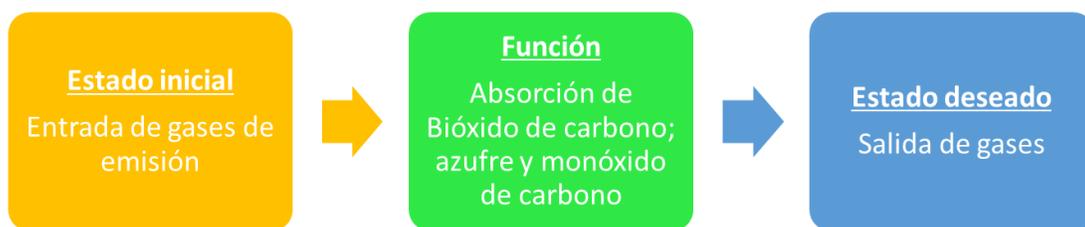


Figura 4.3: Caja negra del proceso

4.2.8 Fijación de requerimientos

Los problemas de diseño siempre se plantean dentro de ciertos límites como pueden ser el tamaño o peso aceptable del dispositivo; algunos otros serán requerimientos de rendimiento, como el rendimiento y durabilidad; algunos más podrían ser establecidos por aspectos legales o de seguridad. Para el planteamiento de los objetivos de diseño y funciones se consideran como especificaciones de rendimiento, al lograr fijar los límites de diseño la especificación de rendimiento limita la gama de soluciones aceptables.

4.2.9 Especificaciones de rendimiento

En el proceso de diseño intervienen distintos problemas que solo con la metodología de diseño se pueden resolver y minimizar a un conjunto de soluciones satisfactorias. Una especificación es aquella que define el rendimiento requerido y no el producto requerido, por lo tanto, hace énfasis en el rendimiento que debe alcanzar una solución de diseño y no en un componente físico en particular como medio para alcanzar dicho rendimiento.

4.2.10 Procedimiento

Es importante que una especificación se plantee en forma general para el tipo de solución que se va a considerar, cuando se formula una solución muy general se podría dar lugar a que se sugirieran soluciones inapropiadas, en tanto que un nivel demasiado bajo (una especificación muy definida) puede quitarle al diseñador casi toda la libertad para generar una gama de soluciones aceptables. El primer paso, por lo tanto, consiste en considerar toda la gama de niveles de soluciones técnicas, empíricas y experimentales.

El siguiente paso es determinar la forma en que se va a trabajar, entre mayor sea el nivel de forma de trabajo, mayor será la libertad del diseñador en términos de la gama de soluciones aceptables; los niveles mayores también incluyen a los niveles inferiores de especificación, es decir, la especificación de características es parte de la especificación de los tipos, la cual es parte de la especificación de alternativas.

Una vez que se ha decidido el nivel en el cual va a efectuar el diseño, empieza el trabajo sobre la especificación apropiada del rendimiento; cualquier producto o máquina tendrá un conjunto de atributos, y éstos serán los que se planteen en la especificación del rendimiento, entre los atributos se incluyen comodidad, portabilidad y durabilidad, así como características claves, como son velocidad, costo seguridad.

Los atributos del rendimiento generalmente son similares a los objetivos y funciones del diseño, o se derivan de ellos; en este punto de la tesis ya se cuenta con un árbol de objetivos y también con un análisis de funciones, éstos probablemente serán la fuente de la lista inicial de atributos de rendimiento del dispositivo.

Un aspecto de suma importancia que debe tenerse en mente al hacer la lista de los atributos de rendimiento es que éstos deben plantearse en una forma que sea independiente de cualquier solución particular. Los atributos casi siempre están expresados en términos de soluciones, debido a que se valora algún aspecto del rendimiento que está incorporado en la solución, pero no se ha separado al atributo de una forma física particular. Dichos planteamientos, basados preferentemente en la solución y no en el rendimiento, por lo general restringen de manera innecesaria los conceptos de solución.

Por último, establecer requerimientos de rendimiento breves y precisos para cada atributo: Una vez que se ha compilado una lista confiable de atributos, para cada uno se escribe una especificación de rendimiento. Una especificación dice lo que debe hacer un producto, no lo que debe ser. Como ya se mencionó, esto muy bien podría requerir alguna investigación cuidadosa, no es adecuado adivinar simplemente requerimientos de rendimiento, ni tampoco tomarlos a partir de un tipo de solución existente. Siempre que sea posible, una especificación de rendimiento deberá expresarse en términos cuantificables.

4.3 Cuestionario de situación innovativa

Al inicio de este capítulo se logró definir cuál es el problema en cuestión y se ha logrado definir el escenario que pueda rodear la solución; este es un excelente punto de partida para documentar diferentes aspectos ligados al problema, con ayuda del cuestionario de situación innovativa se podrá evidenciar los aspectos fundamentales de la problemática dada.

1. Mencionar el nombre del producto que se desea obtener mediante esta metodología:
Dispositivo de filtrado de gases contaminantes.
2. Identificar cuál es la función fundamental del producto diseñado:
Para retener agentes contaminantes y gases de efecto invernadero: monóxido de carbono, bióxido de carbono y azufre remanentes de un convertidor catalítico.
3. Enunciar cuál es el objetivo o propósito de esta función principal del producto:
Que el dispositivo absorba los principales gases y con ello impactar en la concentración de gases contaminantes en la atmosfera.
4. Describir la estructura deseada del sistema en el estado estático, indicando cuáles son los sub-sistemas asociados, cuáles son los detalles y que conexiones existen entre ellos:
La espuma de carbonato de calcio se coloca en la salida del convertidor catalítico del automóvil, Figura 4.4, donde los diámetros en las tuberías son estándar. La espuma es un sólido celular de carbonato de calcio precipitado de celda abierta con geometría prismática circular, que, permite el flujo de gases en la salida del convertidor catalítico, sin comprometer la eficiencia del automóvil. La espuma se encuentra fija a esta sección de tubo mediante una abrazadera de fleje, la cual, se puede ajustar al radio del tubo, donde se asegura que la velocidad del flujo de gases contaminantes no la remuevan de su lugar y que está sea disparada a los siguientes elementos del sistema de escape.

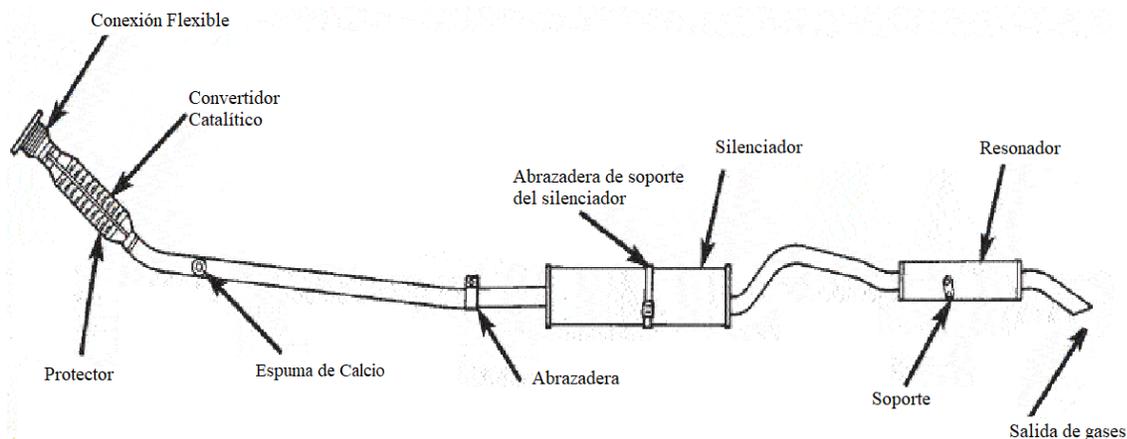


Figura 4.4: Esquema del sistema de escape de gases contaminantes

5. Describir cómo funciona el dispositivo cuando se realiza la función deseada y como interactúa el dispositivo de filtrado con los demás elementos y subsistemas involucrados: *Cualquier motor de combustión interna genera emisiones contaminantes que dañan al medio ambiente y son nocivos para el ser humano; estos gases se describen en el capítulo 1; primero pasa a través del convertidor catalítico normalmente de dos vías, donde hay reacciones de óxido-reducción, donde se transforma una parte de los agentes contaminantes en bióxido de carbono, dinitrógeno y agua, el sensor de oxígeno genera la información para cuantificar el nivel de contaminantes, posteriormente los gases llegan a la esponja cerámica donde la temperatura no es mayor a los 750°C, se propician agentes corrosivos debido a la combinación de agua condensada, ácido nítrico, óxidos de nitrógeno, óxido sulfúrico, dióxido de azufre, monóxido de carbono y bióxido de carbono [García, 2010]. La esponja cerámica absorberá los últimos tres gases mencionados sin que la corrosión sea un problema para el dispositivo, debido a que los materiales cerámicos tienen una gran resistencia a la corrosión y oxidación frente a los elementos químicos, prácticamente es imposible una oxidación, es decir, las cerámicas son producidas quemadas y corroídas y en consecuencia no pueden someterse a otra degradación del mismo tipo. Después los gases entran al silenciador donde se amortigua el ruido producido por las ondas mecánicas de choque generadas cuando se abren las válvulas de escape, por último, los gases llegan al resonador, donde su funcionamiento es parecido al del silenciador y su principal aporte es eliminar los ruidos restantes para obtener un escape más silencioso.*
6. Describir el medioambiente que rodea al sistema (aire, agua, tierra, etc.): *El medio es la intemperie, con temperaturas entre 0°C y 40°C a presión atmosférica.*
7. Indicar otros sistemas con el cual el sistema interactúa benéfica o perjudicialmente: *La esponja de calcio interactúa con el sistema de escape del automóvil, dadas las condiciones de perjudicar lo menos posible la eficiencia del motor y de no ser un elemento de obstrucción, se afirma que en conjunto con el sistema trabajará benéficamente en la absorción de gases contaminantes y efecto invernadero.*

8. Mencionar cuáles son los sistemas superiores del cual es el sistema que va a ser innovado:
El sistema ligado es el catalizador o convertidor catalítico, que es un elemento primordial para el tratamiento de los gases perjudiciales que salen por el tubo de escape de los automóviles. El catalizador tiene como misión disminuir los elementos contaminantes contenidos en los gases de escape de un vehículo mediante la técnica de catálisis. El catalizador es un dispositivo, que se monta en el tubo de escape, inmediatamente después del colector de escape, ya que en este punto los gases se mantienen una temperatura elevada. Esta energía calorífica pasa al catalizador y eleva su propia temperatura, circunstancia indispensable para que este dispositivo tenga un óptimo rendimiento, se alcanza entre los 400 y 700° C.
9. Listar los recursos disponibles en el sistema para eliminar el problema especificado:
La velocidad del flujo de salida ronda entre los 50 y 80 kilómetros por hora, dependiendo del automóvil en cuestión; la temperatura general de salida es de hasta 750°C y la sección de tubo de escape mide entre 6 y 10 pulgadas con un radio de 1.75 pulgadas [Boch, 2008].
10. Mencionar los problemas a resolver del sistema en cuestión:
Los gases contaminantes a la salida de catalizador son abundantes, el principal problema es aumentar la capacidad de filtrado en el dispositivo de espuma cerámica.
11. Indicar el efecto negativo que deriva del problema, cómo se relaciona este efecto con el funcionamiento del sistema, e indicar si el efecto negativo se debe eliminar o reducir:
Como se estudió en el capítulo 1, a partir del año 1920 la temperatura global ha ido en aumento, al igual que el nivel del mar, efecto producido por el deshielo de los glaciares árticos y sus consecuencias a los diversos ecosistemas del mundo; respecto a las emisiones contaminantes son dañinas para el ser humano e interfiere con una mejor calidad de vida, los pagos de impuestos por concepto de poseer un vehículo superan por mucho el salario mínimo de México involucrando problemas financieros. El problema no puede ser eliminado, se busca que sea minimizado y retrasar los efectos del cambio climático.
12. Describir el mecanismo que causa el efecto negativo mencionado anteriormente, las condiciones y cuáles son las circunstancias bajo las cuales apareció este efecto.
La causa es evidente, el uso excesivo de combustibles fósiles en la actividad humana, se puede destacar que la falta de conciencia enfocada hacia la responsabilidad vial en la sociedad está acabando con la calidad de vida de los habitantes.
13. Indicar qué eventos históricos se desarrollaron para crear la situación actual problemática:
Las concentraciones de gases contaminantes en los últimos años han aumentado exponencialmente, se puede intuir que la revolución industrial dio lugar al cambio del trabajo del obrero por maquinas alimentadas por combustible fósil, la aparición de los primeros automóviles y la sobrepoblación en ciertas regiones del mundo.
14. Describir que otros problemas deberían ser resueltos, si no hay posibilidad de remover o eliminar el efecto negativo indicado anteriormente y alcanzar los cambios deseados:

En caso de que la espuma de calcio no cumpla su función evaluar las alternativas disponibles en el uso de otros materiales o el procesamiento de estos.

15. Indicar si este problema ha sido resuelto anteriormente y cuáles fueron los resultados:
En el capítulo 2 se muestran algunas propuestas de filtros evaluadas para cumplir el mismo propósito, sin embargo, éstas comprometen la eficiencia de los motores, provocando un mayor consumo en el combustible y una mayor emisión de agentes contaminantes.

4.4 La casa de la calidad

Al final de este apartado se podrán conocer las debilidades y fortalezas que se tienen al momento, para realizar el techo de la casa de la calidad, es importante conocer los siguientes elementos:

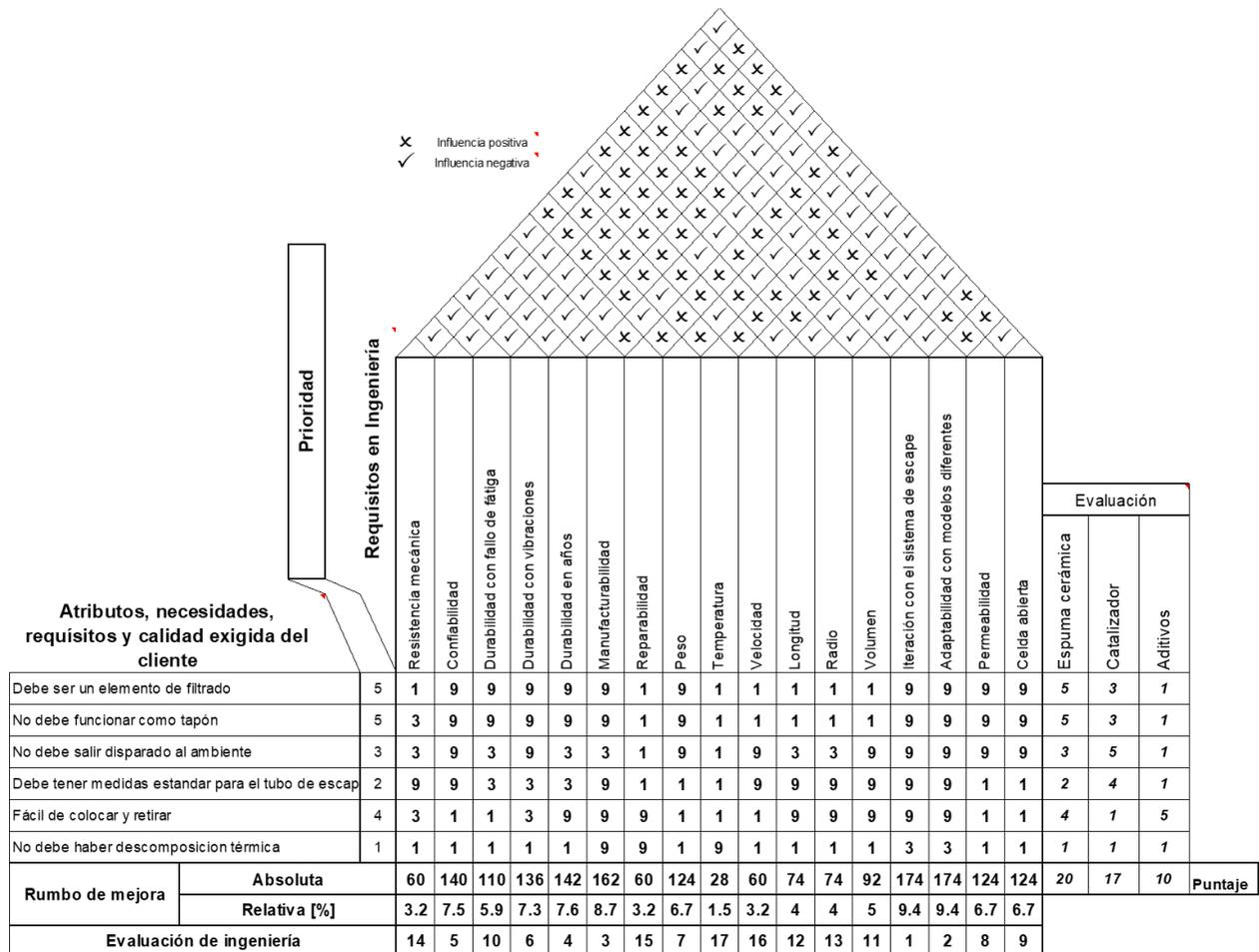
- Requerimientos del cliente
- Prioridades
- Evaluación del cliente
- Requerimientos técnicos
- Matriz de relación
- Evaluación de importancia
- Evaluación de ingeniería
- Matriz de correlación

Con la información recabada al momento serán usadas como medidas objetivas cuantitativas y operacionales de desempeño para evaluar qué características debe poseer el nuevo producto. Siguiendo este procedimiento de los parámetros de Altshuller se obtuvieron las características de calidad de la espuma de calcio enlistadas a continuación:

- Resistencia Mecánica: Deformación permanente con la prueba estática debe ser menor o igual a 0.1 pulgadas.
- Confiabilidad: Pandeo con la prueba de factor de seguridad.
- Durabilidad: Número de ciclos de vida con la prueba de fatiga deben ser de 1800 veces.
- Durabilidad: Número de ciclos de vida con la prueba de vibraciones 1800 veces.
- Durabilidad: Vida útil en años debe durar 1 año aproximadamente.
- Manufacturabilidad: Una espuma por medio día.
- Reparabilidad: Sólo un uso durante su vida útil.
- Peso: Peso de la esponja es de 30 gramos.
- Temperatura: 750°C.
- Velocidad: 100 kilómetros por hora.
- Longitud: 4 pulgadas.
- Radio: 1.75 pulgadas.
- Volumen: 38.48 pulgadas cúbicas.

Siguiendo con la metodología QFD se procede a plantear la matriz de correlación que es el triángulo que se encuentra arriba de la casa de calidad. Esta matriz muestra la relación entre cada par de características de calidad del producto. Son de mayor importancia las correlaciones negativas, debido a que esto quiere decir que estas dos características de calidad están en dificultades.

Con el techo de la casa de la calidad podemos identificar los problemas o conflictos con el propósito fundamental de solucionarlos, se tiene que clasificar la dificultad que se puede tener para poder mejorar cada uno de las características de calidad. Con esto es posible saber en qué punto se debe poner más atención. En dado caso de encontrarse con dos características que presentan un problema y aparte ambas tienen una importancia relativa alta, se debe solucionar el conflicto a como dé lugar. Es aquí donde se hace más evidente la necesidad de hacer uso de la Metodología TRIZ, ya sea con la matriz de contradicciones o con el cuestionario de solución inventiva. A continuación, Figura 4.5 se muestra el techo de la Casa de Calidad de la esponja de calcio.



Casa de la calidad: Esponja cerámica

Figura 4.5: Techo de la casa de la calidad

4.5 Diseño de detalle

¿Qué? – En esta etapa se plantea el desarrollo de la propuesta y se define como se va a construir el dispositivo. Esta es la fase crítica para delinear criterios de sustentabilidad.

¿Para qué? – Se define formalmente el dispositivo, elementos de apoyo, elementos de respaldo y especificaciones técnicas del mismo.

Existen tres principales técnicas para fabricar espumas cerámicas las cuales se explicaron en el capítulo 2; éstas son: Réplica de esponja, Formación de espumas por agitación mecánica o desprendimiento de gases e Incorporación de aditivos de sacrificio. Dadas las características que se buscan para la aplicación de filtrado de gases, se usa la técnica de “Réplica de esponja”; este tipo de proceso da lugar a materiales de celdas abiertas y menor espesor de pared entre celdas que debido a la quema del polímero deja huecos puntuales que reducen las propiedades mecánicas del producto final en cuestión.

La espuma de calcio resultante de la técnica de réplica, es una clase única de materiales altamente porosos, de celda abierta y con malla parcialmente interconectada; en este proceso interviene una esponja polimérica como la matriz principal que será sumergida en una suspensión cerámica seguido de un secado y sinterizado para producir una matriz secundaria de espuma; réplica de la primaria. Es importante mencionar que esta espuma cerámica es caracterizada por material no metálico y material metálico: oxígeno, carbono y carbonato de calcio respectivamente [ASTM C271-94, 2011].

El papel que desarrolla el calcio sobre el sólido celular es el refuerzo en la matriz de la esponja adquiriendo de esta manera resistencia, estabilidad en la microestructura, homogeneidad en las celdas y resistencia a la fluencia a altas temperaturas. Con estas características se propondrá el uso de la espuma final como filtro de gases.

De acuerdo con Schwartzwalder y Somers autores del método para producir sólidos celulares de celda abierta proponen sumergir un elemento poroso en una arcilla de material orgánico sintético o natural flexible. La arcilla es una suspensión de polvo cerámico más algún aglutinante para revestir uniformemente las paredes internas del elemento poroso para posteriormente calcinar y vaporizar el material orgánico. Los siguientes materiales son una variante a los propuestos en diversos artículos para aplicaciones de filtrado y una propuesta para aprovechar las cualidades del carbonato de calcio.

4.5.1 Materiales

- Esponja de poliuretano de grado ISO-FOAM RM6216: esta esponja es ideal para mezclas manuales, catalíticas, estabilizadores celulares y agentes espumantes; estas esponjas tienen un tamaño de poro controlado entre 10 y 15 por centímetro lineal, la densidad aparente teórica ronda entre el 17 y 28 por ciento [Peng, 2000].

- Carbonato de calcio CaCO_3 precipitado: También se conoce con el nombre de calcita, piedra caliza o cal viva; se utiliza en la producción de agentes absorbentes debido a la rápida absorción de agua, dióxido de carbono y azufre [ASTM C25, 2011].
- Agua destilada: Agua sometida a un proceso de destilación, con ello se han eliminado iones en solución (los más frecuentes cloruros, fluoruros, magnesio, calcio), además de otros líquidos de diferentes puntos de ebullición, metales, amonio, sales de amonio, materia oxidable y dióxido de carbono.
- Agente espumante CBA: Es importante en el proceso de fabricación y en el comportamiento de la espuma final, su principal función es el control de la densidad en el material y la geometría de la estructura celular como a la morfología del material [Kuboki, 2010].
- Balanza analítica: Equipo que mide la masa de un cuerpo específico, entregando datos exactos sobre su peso. Dentro de los tantos modelos existentes, se destaca la balanza analítica que posee un alto poder de rigor, pues con ella se puede obtener una precisión de 0,0001g.
- Vasos de precipitado: Recipiente cilíndrico de vidrio borosilicatado fino que se utiliza muy comúnmente en el laboratorio, sobre todo, para preparar o calentar sustancias, medir o traspasar líquidos.
- Mufla de sinterizado: Dimensiones de cámara 200x200x300mm y control automático PID. Potencia nominal de 8kW y temperatura máxima de 1800°C.
- Parrilla eléctrica con agitador magnético: Es una pequeña barra magnética o imán utilizado para remover una mezcla líquida o disolución, cuando se coloca dentro de un recipiente dispuesto sobre la parrilla eléctrica.
- Termómetro de mercurio: Equipado con un conducto interno por el que irá subiendo el mercurio para marcar la temperatura en una escala de 0 a 150°C.

4.5.2 Procedimiento

Descrito por Scheffler según la Figura 4.6, el proceso indica que se debe preparar el polvo de cerámica en una mezcla con agua destilada según la proporción exacta, posteriormente revestir la espuma de polímero flexible en la suspensión cerámica. El revestimiento se realiza sumergiendo la pieza de esponja en la solución; apretándolos, y remojándolos para impregnar la mezcla en todos los poros.

1. En un vaso de precipitado verter 200 mililitros de agua destilada, posteriormente utilizar la parrilla eléctrica para calentar la sustancia hasta el cambio de fase y apagar la parrilla.
2. Inmediatamente el contenido de 300 gramos del carbonato de calcio vaciar al vaso de precipitado, activar el agitador magnético hasta lograr un lodo cerámico consistente. Incorporar 30 mililitros de agente espumante CBA. Al utilizar las porciones exactas se asegura densidad aproximada de 1.54 g/cm^3 [Sharmiwati, 2014].

3. Con un prisma circular de radio 45 milímetros y altura 100 milímetros de esponja de poliuretano, impregnar de lodo cerámico, dejar en la solución por 1 hora en reposo y retirar sin escurrir.
4. Después, dejar secar la esponja “en verde” por un periodo de 24 horas a temperatura ambiente, en un lugar seco y aislado de humedad.
5. Pasado este lapso de tiempo introducir la esponja en verde a la mufla de sinterizado calentando 1°C por minuto hasta llegar a los 700°C, luego 10°C por minuto hasta llegar a 1800°C y mantener esa temperatura durante 500 minutos, hasta lograr la sinterización de la cerámica [ASTM C271-94, 2011].

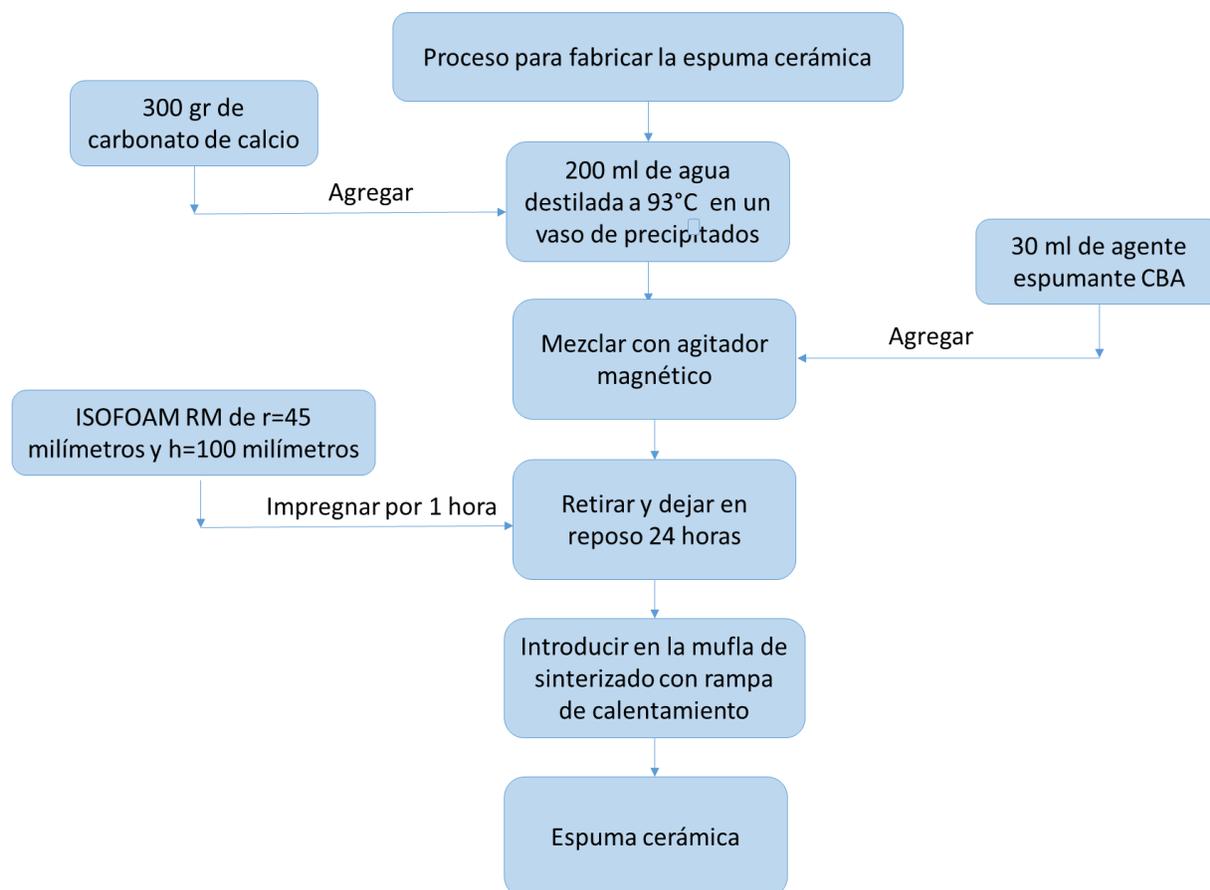


Figura 4.6: Diagrama de flujo para producir el filtro cerámico

Las propiedades de la espuma cerámica son acordes a la norma ASTM C271-94 para la caracterización de esponjas sintéticas y la porosidad puede ser caracterizada usando el método de Arquímedes tomando en cuenta que la densidad del lodo cerámico aumenta cuando disminuye la porosidad de la esponja.

Es importante conocer que la calidad de la espuma cerámica está fuertemente influenciada por la densidad de la suspensión, ya que está refleja el grado de porosidad. Con un microscopio electrónico de barrido se define el tipo de poro, tamaño e interconectividad de poros. Al finalizar este procedimiento y obtener el prototipo físico del filtro cerámico es posible caracterizarlo, mediante los estos cuatro métodos más comunes:

- Microscopio electrónico de barrido: Se observa el tamaño de poro y microestructura del filtro cerámico, también se pueden obtener imágenes a escala.
- Ensayo de compresión: Determina la fuerza de compresión máxima.
- Método de Arquímedes: Determina la densidad y porosidad de la espuma cerámica.
- Contracción lineal: Determina la medida de cambio de la densidad.
- Permeabilidad: Se determina el tamaño de celda en una corriente de flujo

En el paso número cinco del procedimiento para crear la espuma cerámica, se mencionan los procesos a seguir para elevar la temperatura y lograr el sinterizado uniforme y correcto, según los estándares ASTM. Para facilitar la comprensión del paso número cinco, se gráfica la Figura 4.7 la rampa de calentamiento que se debe seguir.

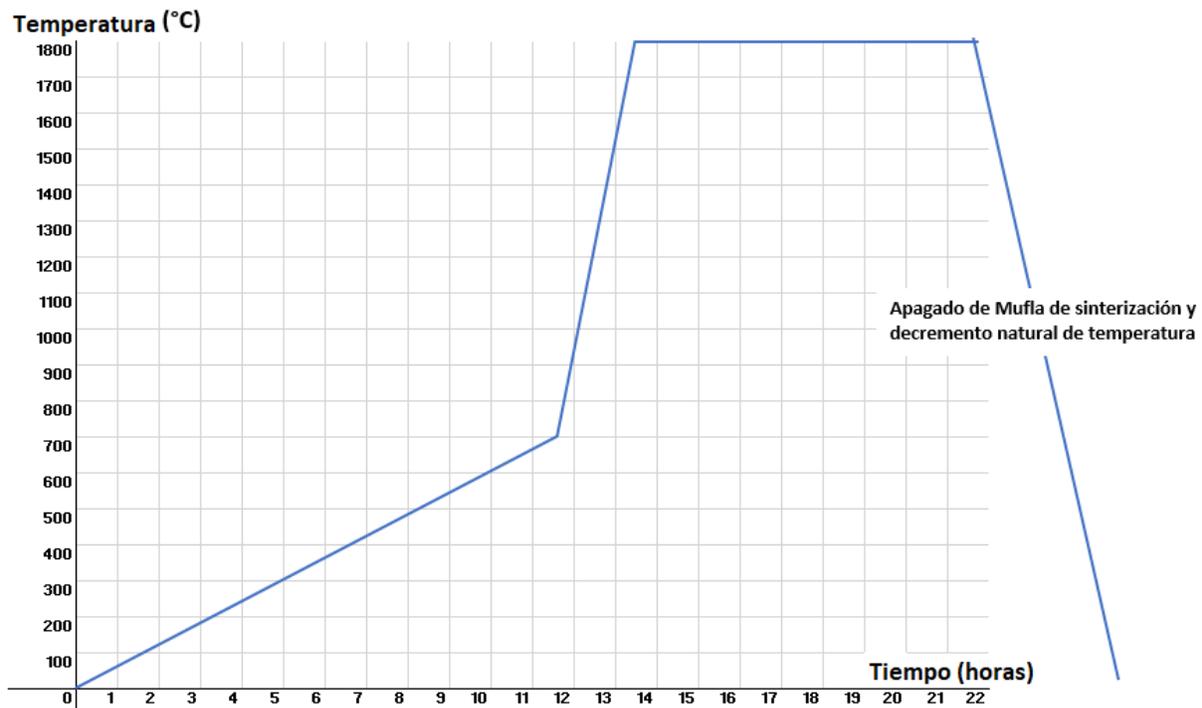


Figura 4.7: Comportamiento de la temperatura

Es importante que la mufla de sinterización tenga implementado un sistema de control PID (Proporcional integral derivativo) el cual asociado al funcionamiento del equipo permitirá mantener la variable de control, en este caso la temperatura, a un determinado valor de referencia, en este caso el tiempo. Basta con programar el equipo y monitorear el buen funcionamiento de este.

4.6 Puesta en operación

Una vez retirada la esponja cerámica del horno de sinterización a temperatura ambiente, se asegura que sus características sean de celda abierta, tamaño de poro controlado y diámetro con una tolerancia de +10 por ciento respecto al diámetro del tubo de escape, esto con la finalidad de evitar que la espuma salga disparada por efecto de la dirección de los gases.

Con ayuda de un fleje metálico, Figura 4.8, se asegurará la espuma cerámica en la sección de salida del catalizador. Para esto es necesario cortar el tubo de escape y añadir el dispositivo de filtrado, posteriormente volver a soldarlo. Es preciso recordar que la velocidad promedio de los gases contaminantes en esta sección del sistema es de 100 kilómetros por hora [Bosch, 2016], entonces la espuma debe estar perfectamente asegurada. La temperatura es de 750°C en promedio, sin embargo, está esponja cerámica resiste condiciones de trabajo de hasta 1250°C [García, 2010].



Figura 4.8: Fleje metálico, elemento de sujeción

De acuerdo con Schwartzwalder y Somers el volumen de material cerámico de la esponja solo es entre el 3 y 5 por ciento y el volumen de la fracción vacía es entre el 95 y 97 por ciento se asegura que esté no es un elemento de obstrucción y este elemento se sugiere, Figura 4.9, sea colocado a la salida del convertidor catalítico, dadas las condiciones de operación a 750°C y 1.6 bar para una mayor eficiencia de filtrado [Bosch, 2016].

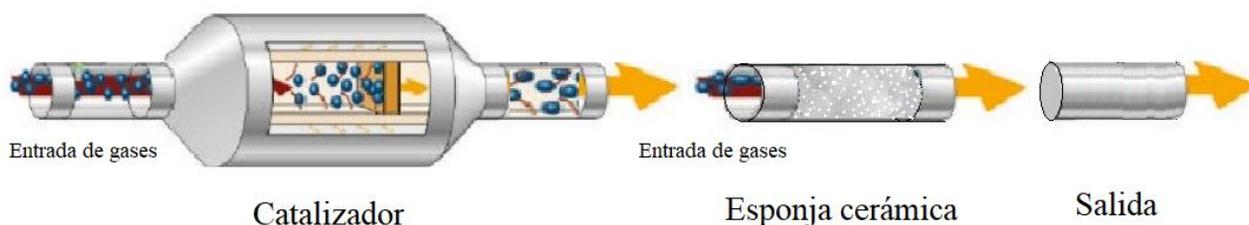


Figura 4.9: Esquema de posición

Este es un dispositivo anticontaminación, la forma en que se coloca es compactando la espuma cerámica e introducirla en una sección de tubo de acero inoxidable del mismo diámetro (1.75 pulgadas), con ayuda del fleje metálico ajustarla para evitar el desprendimiento de esta y que perjudique los siguientes elementos del sistema de escape. Para realizar este procedimiento se debe cortar ese segmento de tubería e introducir la espuma para posteriormente soldar la sección añadida.

La espuma inmersa en el tubo de escape, Figura 4.10, se considera un 'producto dinámico', ya que cuenta con un cambio en el contenido tecnológico hasta este momento, mejora la calidad de gases emitidos efecto de la combustión y es altamente innovador.

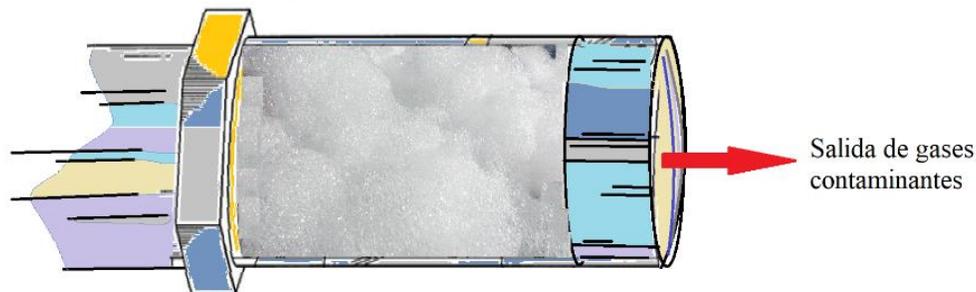


Figura 4.10: Bosquejo de la espuma cerámica

Se asegura que es fácil de instalar y transporta, es un producto maniobrable, con ayuda del fleje metálico se sujetara al tubo de escape. A través del ensayo mecánico de compresión se podrá verificar que la fracción vacía y las paredes de celda resistirán los esfuerzos sometidos por el caudal de fluido en el tubo de escape.

Capítulo 5

Discusión de resultados

El filtro diseñado consiste en un conjunto de geometrías prismáticas o poliédricas de forma irregular conectadas a los bordes. Al utilizar la técnica de réplica de esponja polimérica, el filtro cerámico presentará simultáneamente alta permeabilidad y resistencia, sin embargo, estos parámetros son influenciados de diferentes maneras por el método de procesamiento y estas propiedades son inversamente proporcionales.

Al final del proceso la espuma cerámica tendrá propiedades críticas, en esta clase de materiales son: alta permeabilidad, resistencia, aspectos microestructurales tales como el tamaño de poro y grado de interconexión constante, no existirá presencia de grietas o defectos y poros en el filamento. Generalmente, la permeabilidad aumenta con el aumento de la porosidad y ambas propiedades dependen de la resistencia mecánica.

Las espumas cerámicas de celda abierta con tamaño de poro controlado tienen un gran potencial para filtrar gases y fluidos. En combinación con el carbonato de calcio es capaz de tener una mejor eficiencia en el filtrado de gases; la solubilidad aumenta considerablemente en el flujo de gases que contenga dióxido de carbono, debido a la formación de bicarbonato de calcio, así se explica la formación de depósitos de piedra caliza que están en contacto con fluidos ácidos y que permite retener los agentes contaminantes.

Como resultado de la técnica empleada se asegura la distribución espacial uniforme de cavidades y poros: el material real es modelado como una estructura espacial repetitiva de intersticios, sin embargo, sólo puede ser cuando la forma y distribución de las cavidades es regular sobre el volumen total; esta hipótesis se puede verificar siguiendo los pasos de diseño con el equipo adecuado, de modo que la espuma se podrá caracterizar para obtener los parámetros de interés.

Al aplicar el dispositivo de filtrado en un automóvil convencional la tasa de purificación de los gránulos y moléculas de carbón y azufre puede llegar a más del 50 por ciento. Únicamente la tercera parte de la fracción vacía de la espuma cerámica puede contener el llenado de gránulos dada la presión y velocidad de salida de los gases [Liu, 2014].

Entonces, la capacidad de absorción del dispositivo dependerá del volumen de la espuma cerámica. En este caso el volumen total es de 38.48 pulgadas cúbicas por lo que la capacidad de absorción será de 12.83 pulgadas cúbicas.

De acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-042-SEMARNAT-2003 y las normas de emisiones de la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos de América un automóvil modelo 2004 y posteriores en promedio emite 0.050 gramos de partículas contaminantes (producto de monóxido de carbono y bióxido de azufre) por kilómetro [Taboada, 2009].

Sí en 1 año de uso un automóvil recorre aproximadamente 7,500 kilómetros al final de este periodo se podrán retener hasta 375 gramos de partículas en un volumen de 12.83 pulgadas cúbicas. Este periodo de tiempo corresponde con los criterios de diseño propuestos en la casa de la calidad.

Este método de filtración de partículas extraordinario al catalizador de los automóviles resulta efectivo al cumplir los siguientes requisitos: estabilidad térmica, estabilidad química, alta confiabilidad en ciclos de trabajo de 1 año. El filtro diseñado resistirá ataques químicos, altas temperaturas en flujo de gases, cambios de presión e impacto de partículas.

Es importante mencionar que durante el ciclo de trabajo mantendrá alta eficiencia, alta permeabilidad y una caída relativamente baja en la presión del fluido debido a la estructura del dispositivo. Dado el material cerámico soportará vibración mecánica y cambios térmicos.

La función del dispositivo de filtración es:

- Este dispositivo absorberá y retendrá en la fracción vacía de la esponja las moléculas de monóxido de carbono, bióxido de carbono y azufre
- Permitirá el flujo constante de los demás gases de escape
- Convertirá los gases absorbidos en pequeñas partículas sólidas que se retendrán en la fracción vacía de esponja cerámica

El volumen considerado para este dispositivo es de 38.48 pulgadas cúbicas (0.0006306 metros cúbicos) es adecuado para filtrar gases con un excelente rendimiento durante periodos de 1,460 horas (que es aproximadamente las horas de uso del automóvil en 1 año). El dispositivo de filtración de celda abierta tiene excelentes cualidades como son: estabilidad química, resistencia a altas temperaturas (por el orden de 1250°C), capacidades de altas presiones (3 bar) y resistencia mecánica.

El proceso de retención de agentes contaminantes cuando el dispositivo de filtración este en uso será mediante la propiedad de permeabilidad, cuando el flujo de gases viaje a través de la salida del catalizador en una sección de tubería, llegarán al dispositivo de filtración donde estos gases se verán obligados a fluir a través de la estructura celular, en contacto con el material cerámico este absorberá las porciones relativas al monóxido de carbono, bióxido de carbono y azufre. Al finalizar la vida útil del dispositivo de filtrado este deberá procesarse mediante una oxidación catalítica que es el proceso destructivo para la depuración de compuestos orgánicos volátiles.

Los materiales celulares cerámicos de celda abierta son objeto de considerable interés puesto que determinadas funcionalidades como superficie aumentada, permeabilidad, capacidad de transferencia de calor, etc. se puede proporcionar a los materiales sólidos por la presencia de una cantidad controlada y distribución de huecos. Estas propiedades son responsables de aplicación cada vez más amplia de estos materiales para una químicos, industriales o biológicos, como los metales fundidos filtración, aislamiento térmico de alta temperatura, reacciones catalíticas, filtración de partículas de motores de combustión interna a gasolina y diésel, gases de escape, agentes contaminantes y de gases corrosivos calientes.

La afinidad, austeridad y aprovechamiento en el proceso de fabricación, la estructura y el material utilizado para la espuma, son los aspectos más importantes para el dispositivo propuesto, a diferencia de los catalizadores que están hechos por varios tipos de materiales, entre los más importantes: rodio, paladio, platino, silicato de aluminio y magnesio, siendo estos puntos clave para el costo final. Mientras que los filtros de gases, captura de micro y macromoléculas, utilizan elementos como: alúmina, zirconio, mulita, nitruro de silicio y carburo de silicio. Otros tipos de dispositivos adsorben gases y líquidos, más no los absorben, estos son fabricados por arcillas, carbones microporosos, aluminosilicatos, zeolitas y carbón activado.

Un enfoque diferente y posterior al trabajo, es diseñar un modelo, se basa en el modelado de elementos finitos basado en imágenes digitales DIB-FEA (*Finite Element Analysis*, análisis de elemento finito por imágenes digitales). La idea general es la de construir un modelo de elemento finito que incluye todas las características microestructurales relevantes directamente de micrografías reales de sus secciones transversales y realización de análisis estructurales y funcionales sobre el modelo.

Actualmente ya se han diseñado programas específicos, uno de estos en particular se llama OOF, ha sido desarrollado por NIST (*National Institute of Standards and Technology*, Instituto nacional de estándares y tecnología) y se ha utilizado eficientemente para predecir la mecánica y propiedades térmicas de una amplia gama de materiales. La posibilidad de tener en cuenta la morfología real de las características microestructurales para una simulación fiable de elementos finitos es de particular interés en los casos en que la respuesta del sistema investigado depende en gran medida de los parámetros de proceso consistentes.

Conclusiones

La integración y el uso de las metodologías TRIZ y QFD para la generación de conceptos de solución reforzaron el diseño conceptual, en este caso la casa de la calidad, da como resultado una gama de herramientas y conceptos que no se contemplaban al comienzo de este trabajo, tales como resistencia, durabilidad, reparabilidad y características de operación en el diseño del producto.

La función despliegue de calidad brindo los atributos y necesidades exactas para los requisitos del diseño. Con esta información se evaluó el rumbo de mejora, determinando primordialmente que la iteración con el sistema de escape y su adaptabilidad a este debería tener un mejor análisis en su estudio. Gracias a esta función se propuso que el dispositivo diseñado debería de ir a la salida del convertidor catalítico, donde las medidas de tubería son estándar y en este punto la eficiencia de filtración es la máxima.

Respecto a la evaluación en el techo de la casa de la calidad resulto que por el 15 por ciento la espuma cerámica resulta un mejor producto en comparación al catalizador por ser un elemento de filtrado sin reducir la eficiencia del motor, por la adaptabilidad a diferentes sistemas de escape e instalación más cómoda respecto al catalizador.

Los sólidos celulares son muy importantes en ciertas aplicaciones, gracias a la elevada área superficial, tamaño de poro y estructura modificable da lugar a una extraordinaria capacidad de almacenamiento y eliminación de contaminantes dispersos en fases líquidas o gaseosas.

Los programas gubernamentales de verificación vehicular no atienden las causas de la contaminación y al restringir el uso de los automóviles lo que provoca es que haya más vehículos por familia, al existir una población mayor de automóviles circulando sugiere dificultades en la movilidad y puede representar riesgos serios para la salud física y emocional del ciudadano. La contaminación y el cambio climático no solo es un problema ambiental, sino también es un problema ético y político.

La contaminación ambiental perjudica en forma directa la productividad y desarrollo laboral; la explicación es que los diversos agentes contaminantes emitidos como el producto de combustión en los automóviles afecta el desarrollo del cerebro y las funciones básicas de este, estas sustancias contaminantes pueden depositarse en la materia gris y causar confusión en conexiones neuronales. Los tiempos de traslado influyen negativamente en el desempeño académico y/o laboral.

Estas son algunas de las razones que motivaron el desarrollo del presente trabajo. La idea general es presentar el diseño de un dispositivo capaz de retener las partículas contaminantes y en vez de que estas salgan a la atmosfera tenerlas almacenadas en el filtro para su tratamiento adecuado.

Una de las principales actividades en este trabajo fue evaluar la viabilidad del proyecto a través de un estudio para el mercado potencial. Se tuvo una muestra poblacional de 788 encuestados con automóvil de combustión interna, quienes dieron parte de la información requerida para satisfacer el mejor diseño del dispositivo de filtración.

Inicialmente se pretendía instalar este dispositivo en la última sección del sistema de escape, sin embargo, la temperatura en ese punto baja considerablemente de 750°C a 100°C y esta es fundamental para la mejor eficiencia de filtración. Por lo que se solucionó este problema proponiendo la instalación a la salida del convertidor catalítico donde se presume la máxima temperatura.

El ciclo de trabajo para este dispositivo está evaluado en 1,460 horas. Si el ciclo de operación es de 1 año, el automóvil estaría trabajando 4 horas diarias. Las cavidades del dispositivo no podrían llenarse a más de una tercera parte de la fracción vacía gracias a que la presión en ese punto es de 1.6 bar, por lo que impediría que se sature y se convierta en un elemento de obstrucción.

Entonces el ciclo de vida del dispositivo realmente atendería a las características del automóvil en el cual está operando y no a un tiempo determinado o estimado por el diseño. Es importante resaltar que este dispositivo absorbe y retiene el remanente de gases, no quiere decir que con este se descuide la mecánica esencial del automóvil, al contrario, buscar la forma de reducir los gases emitidos a la atmósfera.

Este dispositivo puede resultar un avance tecnológico, como todo producto nuevo necesita ser revisado y adaptado de la mejor forma acompañado de ensayos de prueba y error. Esto ha ocurrido con cada invención tecnológica, por ejemplo, pasó con el sistema de encendido electrónico, sistema ABS, catalizador, elementos electrónicos, etc.

Los materiales propuestos para la fabricación del dispositivo resultan factibles de obtener en comparación de los materiales usados para fabricar un convertidor catalítico. Sin embargo, la mufla de sinterización con control automático PID resulta complicado de conseguir, ya que en su mayoría estos aparatos se utilizan para la investigación, otros tantos son equipos robustos que para una producción en serie podría elevarse el costo de cada espuma por la cantidad de energía suministrada en el periodo de sinterización de esta.

Bibliografía

Albert, L. A., (1995). La contaminación y sus efectos en la salud y el ambiente
México: Centro del ecología y desarrollo, A.C.

Smith, K. R., Corvalan C. F. y Kjellstrom T., (1999).
How much global ill health is attributable to environmental factors? USA: Epidemiology.

Gibson, L., Ashby M., Zhang J. y Triantafillou T., (1989). Failure surfaces of cellular materials under multiaxial loads - I. Modelling, Int. J. Mech. Cellular Solids, (2ª. Ed.). Cambridge

Gibson, L. J., Ashby, M. F., & Harley, B. A. (2010). Cellular materials in nature and medicine. Cambridge University Press.

Fowlkes, W. y Creweling, C., (1995). Engineering Methods for Robust Product Design, USA: Addison Wesley.

Walther, G. R., E. Post, P., (2002). Ecological Responses to Recent Climate Change. USA: Nature.

Jiménez, M. y R. Lafuente., (2010). La operacionalización del concepto de conciencia ambiental en las encuestas, Sevilla: Junta de Andalucía.

Zhai, W., Kuboki, T. y Wang, L. (2010). Cell structure evolution and the crystallization behaviour of polypropylene/clay nanocomposite foams blown in continuous extrusion, Ind: Eng Chem Res.

Cristofari, M., A. Deshmukh, y B. Wang., (1996). Green quality function deployment, Proceedings of the 4th International Conference on Environmentally Conscious Design and Manufacturing, Cleveland: Ohio.

Karl, Schwartzwalder, & Somers, A. V. (1963). U.S. Patent No. 3,090,094. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.

Clausing, Don., (1993). Total Quality Development: A Step by Step Guide to World Class Concurrent Engineering, New York: ASME Press.

W. D. Callister, Jr., (2003). Introducción a la Ciencia e Ingeniería de los Materiales" (I, II), USA: Reverté.

M., Scheffler, y P., Colombo, (2005). Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications, USA.

Simone, y Gibson, (1998). Effects of solid distribution on the stiffness and strength of metallic foams, Acta Materialia Cambridge University Press.

Simone, y Gibson., (1998). The effects of cell face curvature and corrugations on the stiffness and strength of metallic foams, Acta Materialia Cambridge University Press.

Ingram, K., Poslusny, M., Daugherty, K., & Rowe, W. (1990). Carboaluminate reactions as influenced by limestone additions. In Carbonate additions to cement. ASTM International.

Sun, P., Grace, J. R., Lim, C. J., & Anthony, E. J. (2008). Investigation of attempts to improve cyclic CO₂ capture by sorbent hydration and modification. Industrial & Engineering Chemistry Research, 47(6), 2024-2032.

Camargo, F. L., Pagliuso, J. D., & Milioli, F. E. (2003). Conversion and global reaction rate coefficient in the absorption of SO₂ by different types of limestone in a fluidized bed reactor. Revista de Engenharia Térmica, 2(1).

Conde, Y., Despois, J. F., Goodall, R., Marmottant, A., Salvo, L., San Marchi, C., & Mortensen, A. (2006). Replication processing of highly porous materials. Advanced Engineering Materials, 8(9), 795-803.

Despois, J. F., Marmottant, A., Conde, Y., Goodall, R., Salvo, L., San Marchi, C., & Mortensen, A. (2006). Microstructural tailoring of open-pore microcellular aluminium by replication processing. In Materials science forum (Vol. 512, pp. 281-288). Trans Tech Publications.

J, Banhart, y D, Weaire., (2002). In Foams and Films, USA: M.I.T.-Verlag

Taboada Ibarra, E. L., & Osnaya García, S. G. (2009). El diesel para autotransporte en México. Situación actual y prospectiva. El cotidiano, (157).

J. L., Grenestedt, y K. Tanaka., (1999). Influence of cell wall thickness variations on elastic stiffness of closed cell cellular solids, USA: Int. Mech.

M. P., Groover., (2004). Modern Manufacturing materials, processes and systems, USA: Jhon Wiley and Sons, INC.

Budynas, R. G., Nisbett, J. K., & Shigley, J. E. (2011). Shigley's mechanical engineering design. New York: McGraw-Hill.

A., I. Irausquín, (2005). Caracterización mecánica de espumas metálicas y su aplicación en sistemas de absorción de energía. Tesis doctoral. Universidad Carlos III de Madrid, España.

M., Presas, (2008), Comportamiento mecánico de materiales celulares de carburo de silicio. Tesis Licenciatura en Ingeniería. Escuela superior de ingenieros de caminos, canales y puertos. Madrid.

Liu, P., & Chen, G. F. (2014). Porous materials: processing and applications. Elsevier.

M. S. Sharmiwati, R. M. Mizan, A. B. Noorhelinahan. (2014). Preparation And Characterization Of Ceramic Sponge For Water Filter. International journal of scientific & technology research volume 3, issue 6, june 2014.

Peng, H. X., et al. Microstructure of ceramic foams. Journal of the European Ceramic Society, 2000, vol. 20, no 7, p. 807-813.

Organización Mundial de la Salud (OMS, 2006). Calidad Salud. Ginebra 2006.
Disponibile en: http://www.who.int/water_sanitation_health/dwq/dwqtraining/es/

Organización Mundial de la Salud (OMS, 1993). PNUMA. GEMS/AIRE.
Programa Mundial de Vigilancia y Evaluación de la Calidad del Aire Urbano. Ginebra, 1993.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007). Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, 104 págs. 2007.

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007). Cuarto Informe de Evaluación. (AR4) en inglés. Y su documento de síntesis: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza. 2007.

Programa de las Naciones Unidas Sobre el Medio Ambiente (PNUMA, 2007). Convención marco de las naciones unidad sobre el cambio climático. Alemania. 2007.
Recuperado de: <http://www2.inecc.gob.mx/publicaciones2/libros/437/dick.html>

Procuraduría Federal de Protección al Ambiente (PROFEPA, 2010). Impacto del cambio climático y efecto invernadero en el siglo XXI, 2010.
Recuperado de: <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/211/1/Emergencias2009.pdf>

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2008). Fuentes de contaminación en México. Mejora de calidad de aire en la Megalópolis, 2008.
Recuperado de: <https://www.gob.mx/semarnat/prensa/gobierno-de-la-republica-anuncia-medidas-para-mejorar-la-calidad-del-aire-en-la-megalopolis>

Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT, 2013). Calidad de aire, una práctica de vida. D.F. México. Primera edición, 2013.

Recuperado de: <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/Libros2013.pdf>

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI, 2005). Suelo y vegetación. Serie III escala 1:250 000. Fecha de datos 2000-2002.

Recuperado de: <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/reclnat/ususuelo/default.aspx>

Instituto Nacional de Ecología - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales (INE - SEMARNAT, 2014). Inventario nacional de emisiones de gases efecto invernadero México, 2014.

Recuperado de: <https://www.gob.mx/inecc/acciones-y-programas/inventario-nacional-de-emisiones-de-gases-y-compuestos-de-efecto-invernadero>

Instituto Nacional de Ecología - Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales [INE - SEMARNAT, 2005]. Guía de elaboración y usos de inventarios de emisiones México, D.F. 2005.

Recuperado de: <http://www.ine.gob.mx/publicaciones/new.consultaListaPub.php>

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2000). Informe Especial del IPCC sobre Escenarios de Emisiones. 2010.

Recuperado de: http://www.ipcc.ch/home_languages_main_spanish.shtml

Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2001). Tercer Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático (TAR). 2001.

Recuperado de: <https://www.ipcc.ch/pdf/climate-changes-2001/impact-adaptation-vulnerability/impact-spm-ts-sp.pdf>

National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2009). Recent monthly mean CO2 at Mauna Loa. 2009.

Recuperado de: <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/>

Instituto Nacional de Ecología - Centro de Transporte Sustentable (INE - CTS, 2016).

Taller de emisiones vehiculares en México, D.F. 2016.

Recuperado de: http://www.ine.gob.mx/dgicurg/calair/download/memorias_final_taller.pdf

International Energy Agency: Organisation for Economic Co-operation and Development (IEA - OECD, 2004). CO2 Emissions from fuel combustion. 1971-2002 IEA/OECD, 2004.

Recuperado de: <http://www.co2science.org>

Programa de las Naciones Unidas para el Ambiente (PNUMA, 2006). El Cambio Climático en América Latina y el Caribe 2006”, presentado por la Regional para América Latina y el Caribe del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente. 2006.

Recuperado de: http://repositorio.cepal.org/bitstream/handle/11362/39842/S1501318_es.pdf

Panel Intergubernamental de Cambio Climático (PICC, 2007). América latina ante el cambio climático Magallanes 1334, Montevideo Uruguay, 2007.

Recuperado de: <http://www20.iadb.org/intal/catalogo/PE/2011/07735.pdf>

(Greenpeace, 2009) Racing Over the Edge New Science on the Climate Crisis. 2009.

Recuperado de: <http://www.greenpeace.org/mexico/global/mexico/report/2010/6/mexico.pdf>

(Greenpeace, 2010). México ante el cambio climático: Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación. D.F. México. 2010.

Recuperado de: <http://paginas.facmed.unam.mx/deptos/sp/wpcontent/uploads/2013/12/vulnerabilidad-mexico.pdf>

Intergovernmental Panel on Climate Change, Climate Change (IPCC, 2001). The Scientific Basis. Contribution of Working Group to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate change. Technical Summary Cambridge University. 2001.

Khodabakhshian, A., Ghalehnovi, M., De Brito, J., & Shamsabadi, E. A. (2018). Durability performance of structural concrete containing silica fume and marble industry waste powder. *Journal of Cleaner Production*, 170, 42-60.

Viernag Solutions. (enero, 2017). Asociación mexicana de distribuidores de automóviles.

Recuperado de <http://www.amda.mx/>

El Eco de Sunchales (2016). Recuperado de: <http://elecodesunchales.com.ar/noticia/103110/5-paises-producen-la-mitad-de-emisiones-de-co2-del-mundo>

García., G. (2010). Prueba de ruta. Sistema de escape en el automóvil. Recuperado de <https://www.pruebaderuta.com/sistema-de-escape-en-el-automovil-2.php>

Anexo 1: Estudio de mercado

Tamaño de la muestra: 1,000			
-----------------------------	--	--	--

Rango de edad			Total
18 - 30	30 - 50	50 - 80	1,000
384	412	204	

Sexo			Total
Masculino	Femenino		1,000
638	362		

Auto propio			Total
Si	No		1,000
816	184		

¿Cuál es la clasificación?			Total
Hybrido	Eléctrico	Combustible	816
26	2	788	

¿Cuál es su categoría?			Total
Automóvil	Camioneta	Camion de	788
591	194	3	

Probelmas al verificar			Total
Si	No		788
653	135		

Modelo							Total
1970 - 1979	1980 - 1989	1990 - 1999	2000 - 2004	2004 - 2009	2010 - 2016	Otro	788
8	33	146	199	226	176	0	

¿Qué tipo de engomado tiene?			Total
Cero	Uno	Dos	788
196	383	209	

¿Comprarías un dispositivo intercambiable que ayude a bajar los niveles de emisiones contaminantes en tu automóvil y puedas circular todos los días sin restricciones?			Total
Si	No		788
702	86		

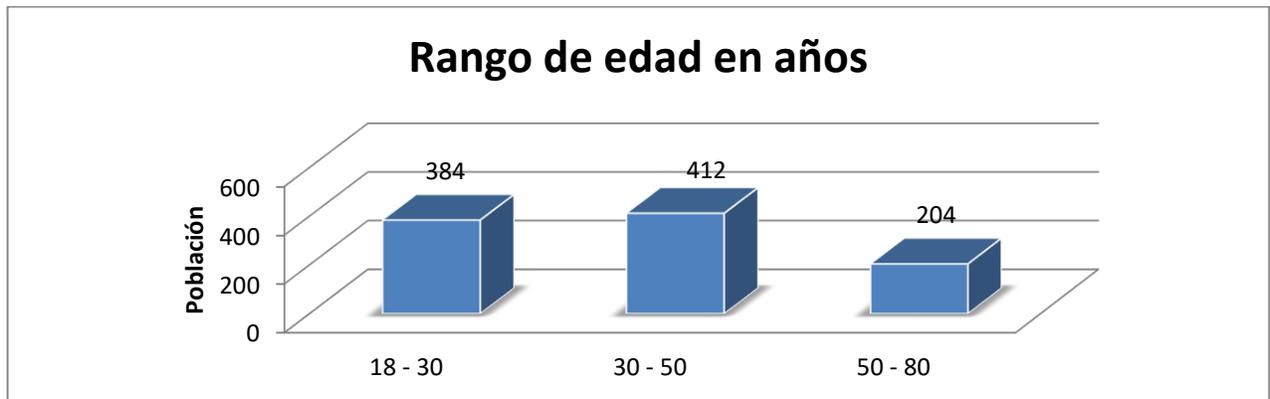
¿Estarías de acuerdo que sea obligatorio para todos los automóviles en la CDMX?			Total
Si	No		788
687	101		

¿Cuántas veces al año estarías de acuerdo			Total
2 veces	3 veces	4 veces	788
476	281	31	

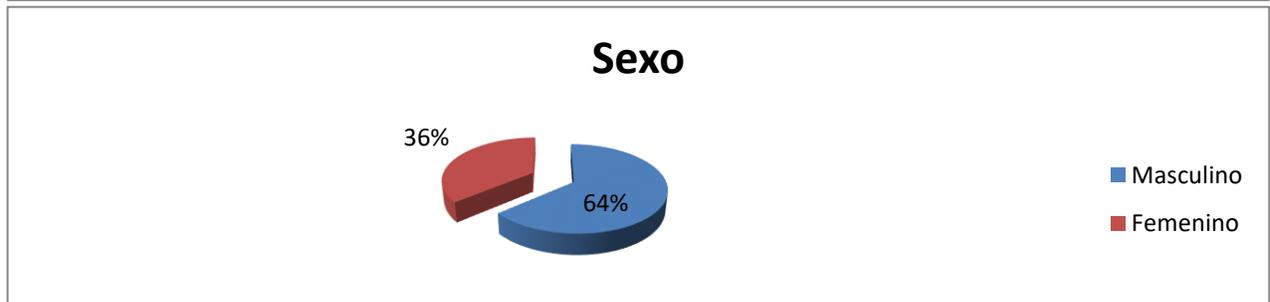
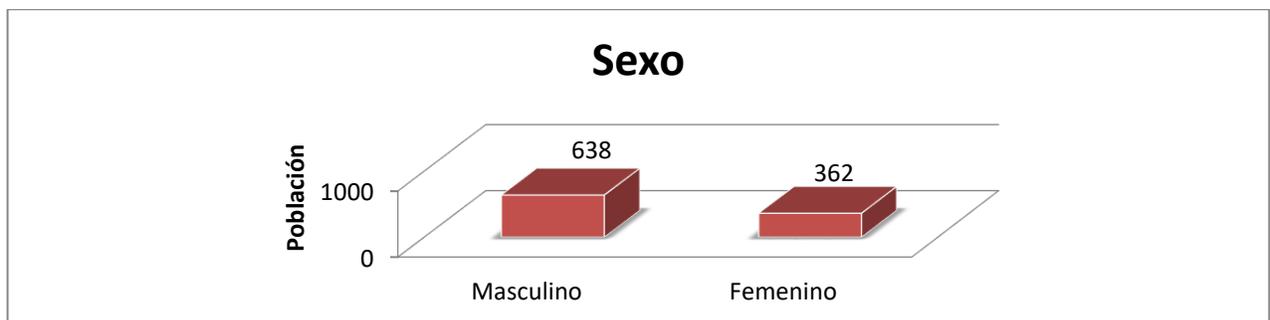
¿Cuanto estarías de acuerdo a pagar (en pesos) por el dispositivo junto con su			Total
300 - 449	450 - 649	650 - 900	788
509	237	42	

Resumen de la encuesta

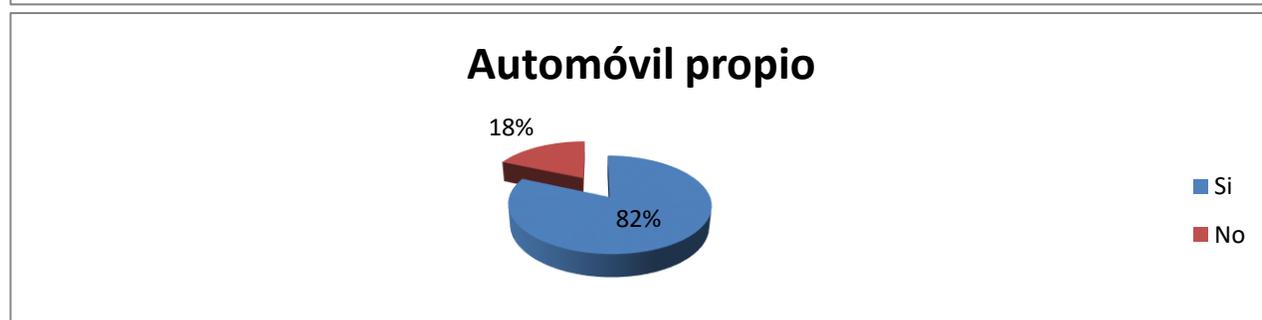
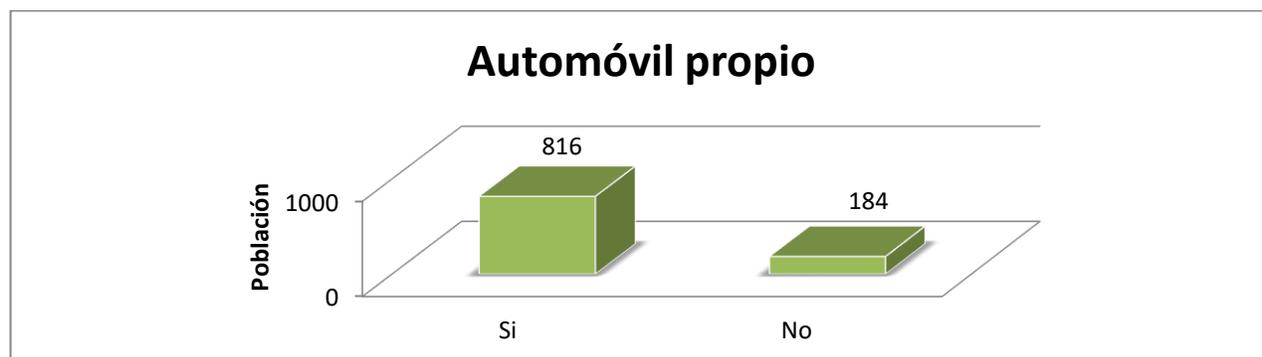
Rango de edades para una muestra de 1,000 personas



Tipo de sexo



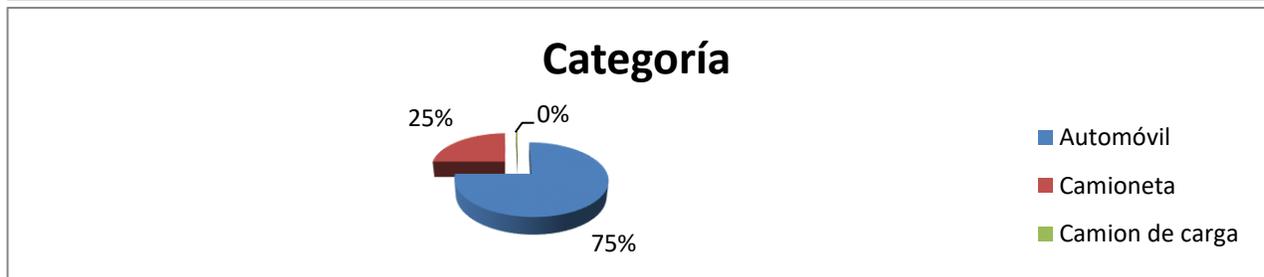
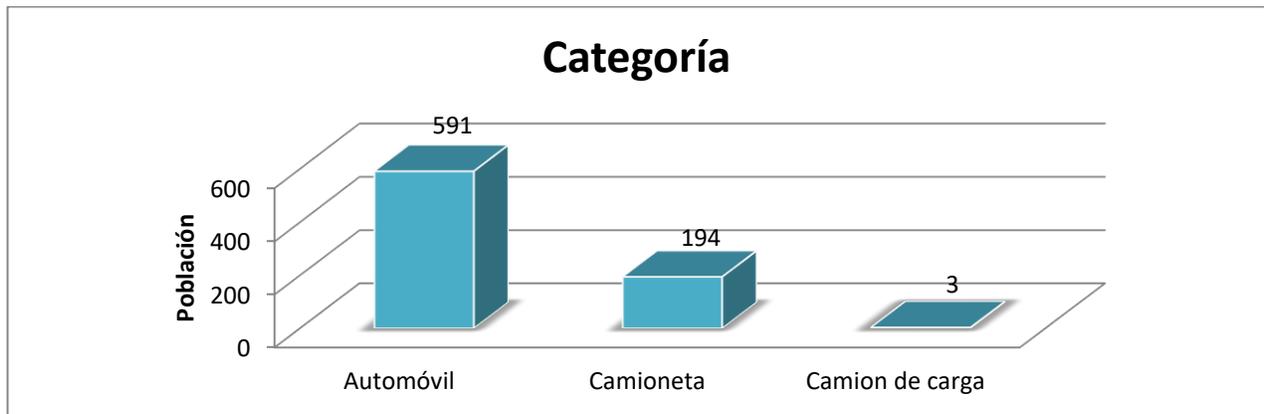
Cuantificación de cuantas personas cuentan con un automóvil



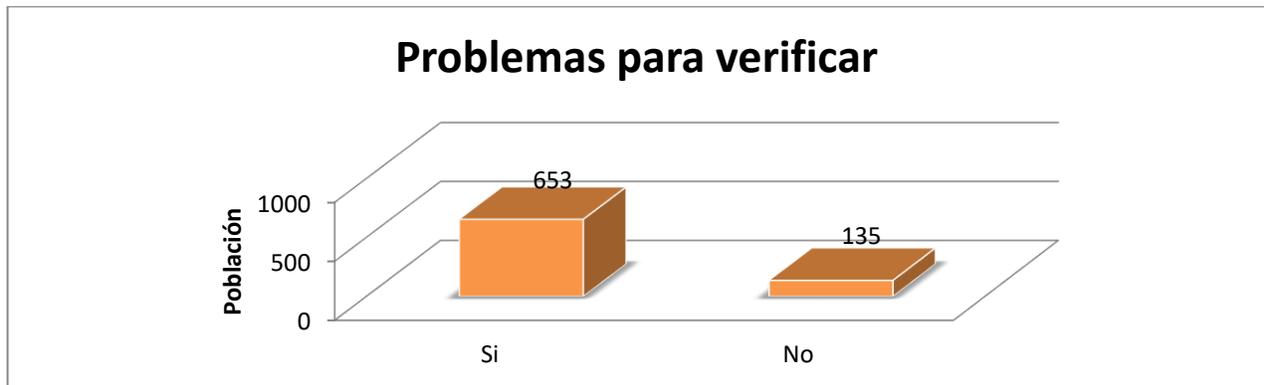
Cuantificación de cuantas personas cuentan con automóvil a gasolina o diésel



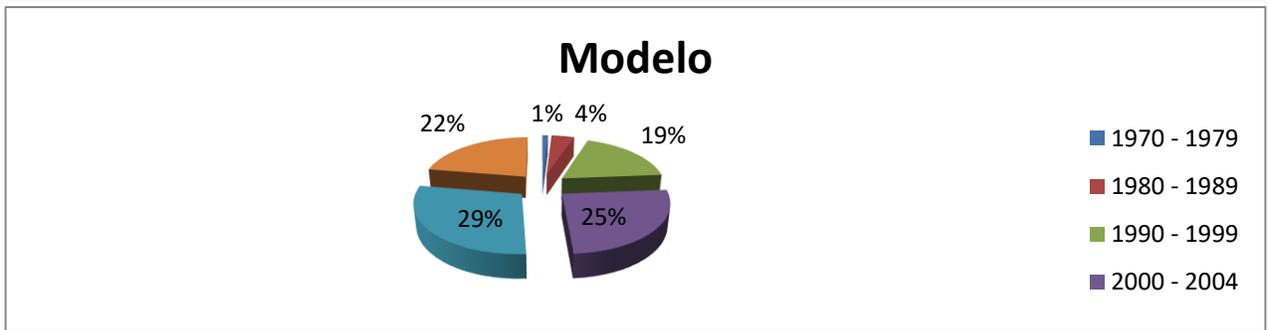
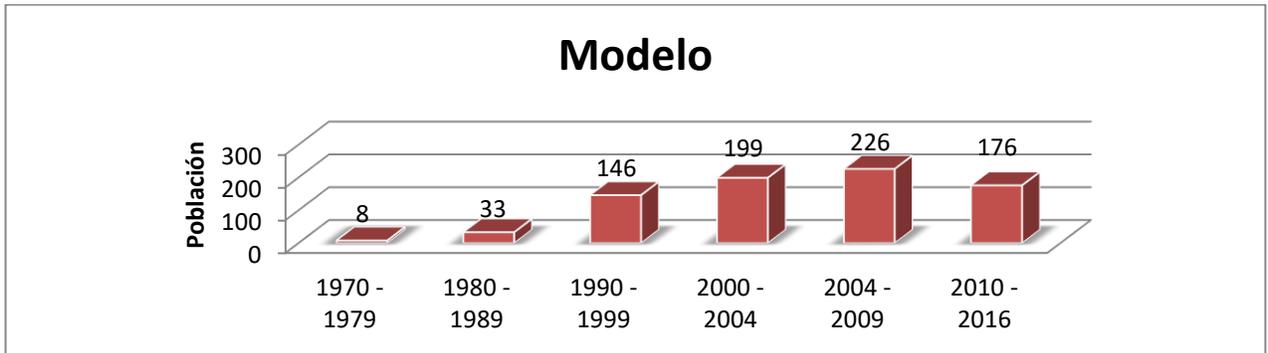
Tipo de automóvil



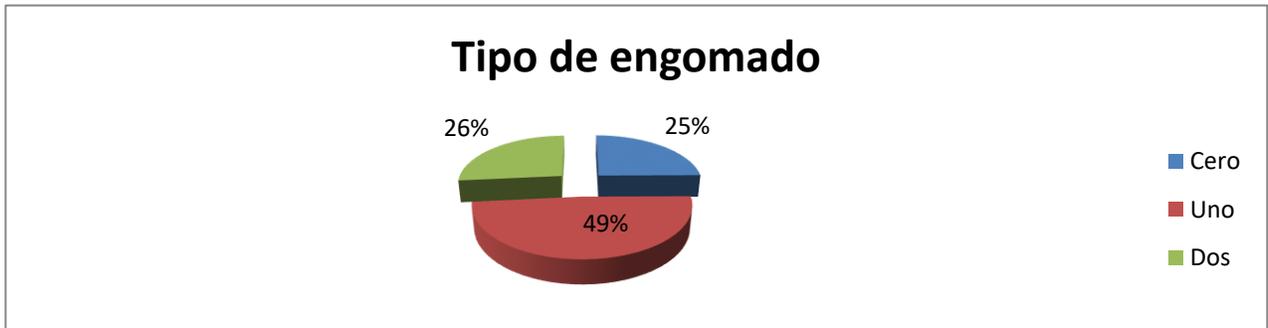
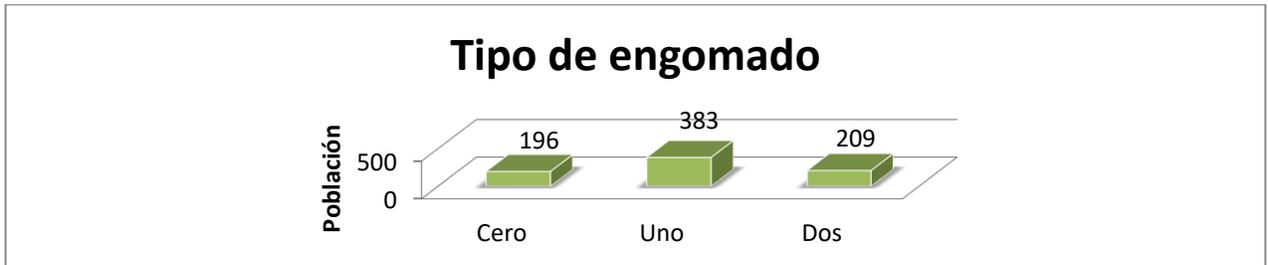
Evaluación de problemas con aprobar la verificación



Modelo del automóvil

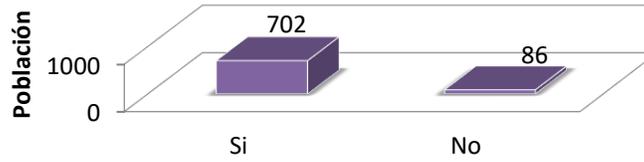


Engomado que porta el automóvil



Factibilidad de venta

¿Quién compraría el dispositivo?

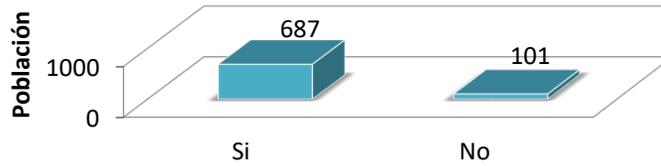


¿Quién compraría el dispositivo?



Factibilidad de uso

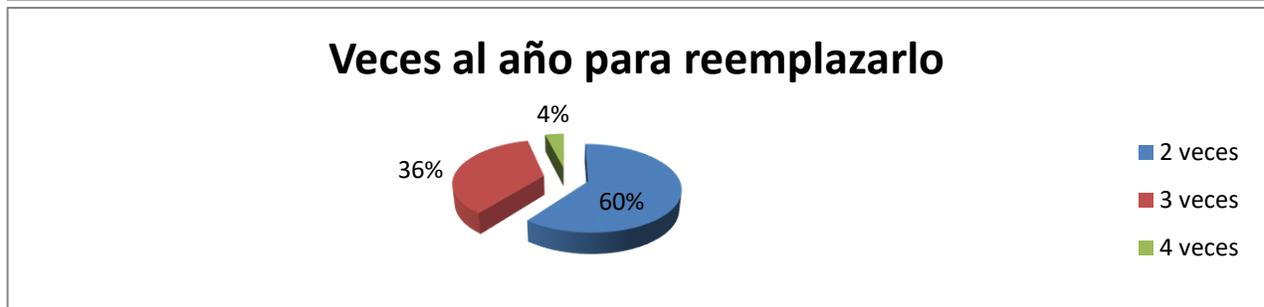
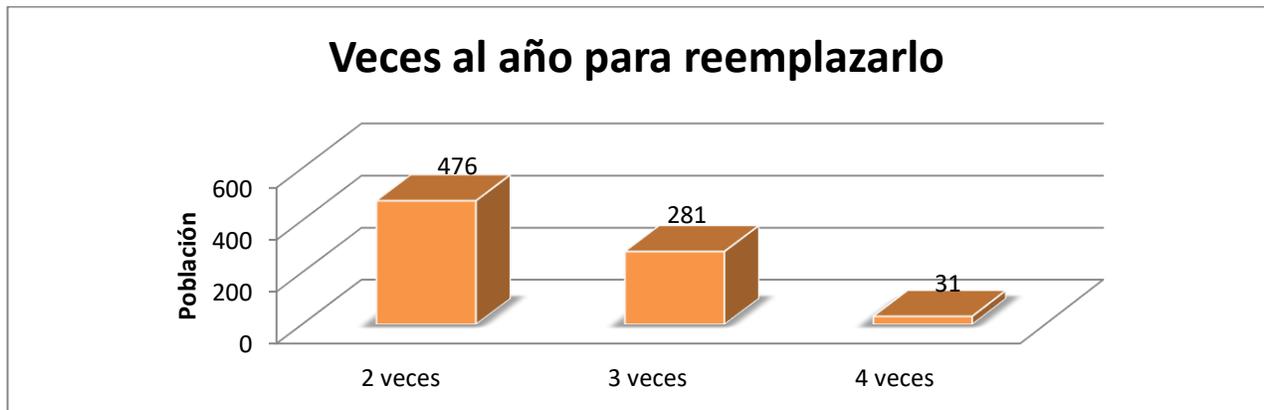
De acuerdo en que sea obligatorio



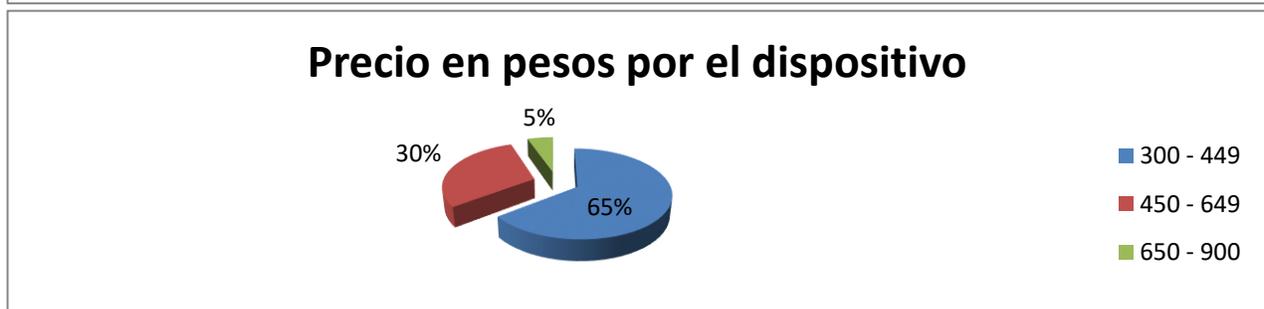
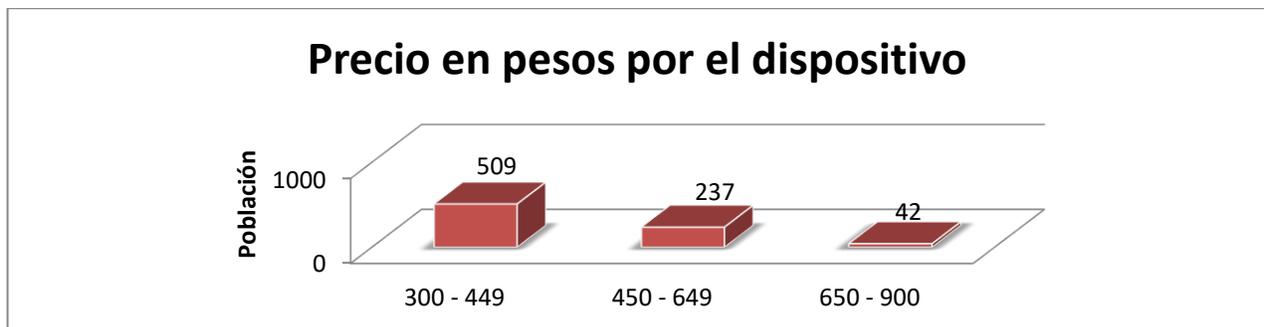
De acuerdo en que sea obligatorio



Factibilidad de reemplazo



Factibilidad de precio



Anexo 2: 40 principios inventivos

1. Segmentación
 - (a) Divida un objeto en partes independientes
 - (b) Seccione un objeto
 - (c) Incremente el grado segmentación de un objeto
2. Extracción
 - (a) Extraer (eliminar o separar) una parte o propiedad “perjudicial” de un objeto
 - (b) Extraer únicamente la parte o propiedad necesaria.
3. Calidad Local
 - (a) Transición de una estructura homogénea de un objeto o medio ambiente externo (acción externa), a una estructura heterogénea.
 - (b) Hacer que diferentes partes del objeto lleven a cabo diferentes funciones.
 - (c) Colocar cada parte del objeto en las condiciones más favorables para su funcionamiento.
4. Asimetría
 - (a) Reemplazar una forma simétrica de un objeto con una forma asimétrica
 - (b) Si el objeto ya es asimétrico, incrementar el grado de asimetría
5. Combinación
 - (a) Combine en el espacio objetos homogéneos u objetos destinados a operar en forma contigua
 - (b) Combine en tiempo operaciones homogéneas o contiguas
6. Universalidad
 - (a) Que el objeto realice múltiples funciones, de esta manera se elimina la necesidad de utilizar algunos otros objetos
7. Anidación
 - (a) Contener el objeto dentro de otro el cual contiene un tercer objeto
 - (b) Un objeto que pasa a través de la cavidad de otro objeto
8. Contrapeso
 - (a) Compensar el peso de un objeto uniéndolo con otro que tenga una fuerza de levantamiento
 - (b) Compensar el peso de un objeto mediante la interacción con un medio que provea fuerzas aerodinámicas o hidrodinámicas
9. Acción contraria previa
 - (a) Si se necesita llevar a cabo una acción, considere ejecutar una acción contraria por adelantado
 - (b) Si el problema especifica que el objeto debe tener una tensión, provea una contra tensión por adelantado
10. Acción previa
 - (a) Lleve a cabo la acción requerida con anticipación totalmente, o al menos en parte
 - (b) Ordene los objetos de tal manera que puedan entrar en acción sin pérdidas de tiempo esperando la acción (y de la posición más conveniente)
11. Amortiguamiento anticipado
 - (a) Compensar la relativamente baja confiabilidad de un objeto por medio de contramedidas tomadas con anterioridad

12. Equipotencialidad
 - (a) Cambiar las condiciones de trabajo para que un objeto no necesite ser levantado o bajado
13. Inversión
 - (a) En lugar de una acción dictada por las especificaciones del problema, implementar una acción opuesta
 - (b) Haga inmóvil una parte movable del objeto o el ambiente exterior, y la parte inmóvil hágala movable
 - (c) Voltee el objeto de manera que la parte de arriba quede hacia abajo.
14. Esferoidicidad
 - (a) Reemplace partes lineales o superficies planas con otras curvadas, formas cúbicas con formas esféricas
 - (b) Use espirales, pelotas, rodillos
 - (c) Reemplace un movimiento lineal con uno rotatorio, utilice una fuerza centrífuga
15. Dinamicidad
 - (a) Haga que las características de un objeto, o el ambiente externo, se ajusten automáticamente para el desempeño óptimo en cada estación de operación
 - (b) Divida un objeto en elementos que puedan cambiar de posición relativa entre sí
 - (c) Si un objeto es inamovible, hágalo movable o intercambiable
16. Acción parcial ó sobrepasada
 - (a) Si es difícil obtener un 100% del efecto deseado, ejecute algo de más o algo menos
 - (b) para simplificar el problema
17. Moviéndose a una nueva dimensión
 - (a) Elimine los problemas para mover un objeto sobre una línea mediante movimientos en dos dimensiones (a lo largo de un plano). Similarmente, los problemas para mover un objeto en un plano desaparecen si el objeto puede ser cambiado para permitir un espacio tridimensional.
 - (b) Use un ensamble de objetos en capas múltiples en lugar de una simple capa
 - (c) Incline el objeto o voltéelo a “su posición” más propia
 - (d) Proyecte imágenes en áreas cercanas o en el anverso del objeto
18. Vibración mecánica:
 - (a) Ponga un objeto a oscilar
 - (b) Si la oscilación existe, incremente su frecuencia, aun hasta la ultrasónica
 - (c) Use la frecuencia de resonancia
 - (d) En lugar de vibraciones mecánicas, use piezovibradores
 - (e) Use vibraciones ultrasónicas en conjunción con un campo electromagnético
19. Acción periódica
 - (a) Reemplace una acción continua con una periódica, o un impulso
 - (b) Si una acción es periódica, cambie su frecuencia
 - (c) Use pausas entre impulsos para dar acción adicional
20. Continuidad de una acción útil
 - (a) Realice una acción sin descanso - todas las partes de un objeto deben ser operadas constantemente a su total capacidad
 - (b) Elimine tiempos ociosos y movimientos intermedios
21. Despachar rápidamente
 - (a) Ejecute operaciones peligrosas a muy alta velocidad

22. Convertir algo malo en un beneficio
 - (a) Utilice factores o efectos dañinos de un ambiente para obtener efectos positivos
 - (b) Remueva un factor dañino agregándolo a otro factor peligroso
 - (c) Incremente la cantidad de acciones peligrosas hasta que dejen de serlo
23. Retroalimentación
 - (a) Introduzca retroalimentación
 - (b) Si ya existe retroalimentación, revíertala
24. Mediador
 - (a) Use un objeto intermediario para transferir o llevar a cabo una acción
 - (b) Conecte temporalmente un objeto a otro que sea fácil de remover
25. Autoservicio
 - (a) Haga que el objeto tenga su propio servicio y ejecute operaciones de reparación suplementarias
 - (b) Haga uso de desperdicios de material y energía
26. Copiado
 - (a) Use una copia simple y poco costosa en lugar de un objeto que es complejo, costoso, frágil o inconveniente de operar
 - (b) Reemplace un objeto o un sistema de objetos por una copia óptica, una imagen óptica. Una escala puede ser usada para reducir o alargar la imagen
 - (c) Si se usan copias ópticas visibles, reemplácelas con copias infrarrojas o ultravioletas
27. Objeto barato de vida corta en vez de uno caro y durable
 - (a) Reemplace un objeto costoso por una colección de algunos poco costosos, comprometiendo otras propiedades (longevidad, por ejemplo)
28. Reemplazo de sistemas mecánicos
 - (a) Reemplace el sistema mecánico por uno óptico, acústico u odorífero
 - (b) Use un campo electromagnético, eléctrico o magnético para una interacción con el objeto
 - (c) Reemplace campos:
 - 1) Estacionarios con campos movibles
 - 2) Fijos con algunos que cambien en el tiempo
 - 3) De los aleatorios a los estructurados
29. Uso de una construcción neumática o hidráulica
 - (a) Reemplace las partes sólidas de un objeto por gas o líquido - estas partes pueden usar aire o agua para inflarse o utilizar cojinetes hidrostáticos
30. Película flexible o membranas delgadas
 - (a) Reemplace las construcciones habituales con membranas flexibles y películas delgadas
 - (b) Aísle un objeto del ambiente externo con películas delgadas o membranas finas
31. Uso de material poroso
 - (a) Haga un objeto poroso o use elementos porosos adicionales (insertos, cubiertas, etc.)
 - (b) Si un objeto ya es poroso llene sus poros con alguna sustancia.
32. Cambio de color
 - (a) Cambie el color de un objeto o sus alrededores
 - (b) Cambie el grado de translucidez de un objeto o sus alrededores
 - (c) Use aditivos coloreados para observar objetos o procesos que son difíciles de ver
 - (d) Si tales aditivos ya son usados, emplee trazadores luminiscentes o elementos trazadores

33. Homogeneidad
 - (a) Haga que los objetos interactúen con un objeto primario hecho del mismo material o algún material similar en comportamiento
34. Restauración y regeneración de partes
 - (a) Rechazar o modificar un elemento de un objeto después de que complete su función o se hace inútil, (descartar, disolver o evaporar)
 - (b) Restaurar completamente cualquier parte usada de un objeto
35. Transformación de los estados físicos y químicos de un objeto
 - (a) Cambiar un estado de un objeto, concentración de densidad, grado de flexibilidad, temperatura
36. Transición de fase
 - (a) Implemente un efecto desarrollado durante el cambio de fase de una sustancia. Por ejemplo, durante el cambio de volumen, durante la liberación o absorción de calor.
37. Expansión térmica
 - (a) Use la expansión o contracción de un material por calor
 - (b) Use varios materiales con diferentes coeficientes de expansión térmica
38. Uso de oxidantes fuertes
 - (a) Reemplace aire normal con aire enriquecido
 - (b) Reemplace aire enriquecido con oxígeno
 - (c) Trate al aire o al oxígeno con radiaciones ionizantes
 - (d) Use oxígeno ionizado
39. Medio ambiente inerte
 - (a) Reemplace el ambiente normal con uno inerte
 - (b) Lleve a cabo el proceso en el vacío
40. Materiales compuestos
 - (a) Reemplace materiales homogéneos con materiales compuestos