



Centro de Investigación Científica de Yucatán, A.C.  
Posgrado en Ciencias en Energía Renovable

MEJORAMIENTO DE LA EFICIENCIA ENERGÉTICA  
DE UN VEHÍCULO FOTOVOLTAICO HÍBRIDO  
IMPLEMENTANDO UNA CARROCERÍA CON UN  
NUEVO MATERIAL COMPUESTO LAMINADO

Tesis que presenta

FERNANDO MEN FUNG GUTIÉRREZ

En opción al título de

MAESTRO EN CIENCIAS EN ENERGÍA RENOVABLE

Mérida Yucatán México, Agosto 2020



## **AGRADECIMIENTO**

Agradezco al CONACYT por la beca otorgada No.:729785.

Agradezco al Dr. José Gonzalo Carrillo Baeza, por su apoyo y guía durante todo el proceso del posgrado.

Un agradecimiento al Dr. Víctor Manuel Ramírez Rivera que colaboró en el desarrollo de esta tesis y su apoyo constante durante todo el proceso.

Al comité tutorial conformado por Dr. Cruz, Dr. Villarreal y Dr. Soberanis, por sus comentarios y correcciones con el fin de darle un mejor contenido a este trabajo.

## **DEDICATORIA**

A Dios por permitirme esta oportunidad de estudiar la maestría en un país extranjero para mí y todas las experiencias que esto mismo significó.

Un agradecimiento profundo a mi familia por todo el apoyo, valores y educación que me han dado durante toda mi vida, enseñándome que con esfuerzo y dedicación se alcanzan grandes metas.

A mis amigos y compañeros de la maestría que me hicieron esta estancia agradable y me ayudaron a superar momentos difíciles.

## ÍNDICE

ÍNDICE.....	i
LISTA DE SÍMBOLOS .....	iv
ÍNDICE DE TABLAS.....	vi
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vii
RESUMEN.....	x
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO 1.....	3
1. ANTECEDENTES .....	3
1.1 Evolución automotriz .....	3
1.1.1 Clasificación de los vehículos.....	4
1.2 Eficiencia energética .....	5
1.2.1 Eficiencia energética en vehículos. ....	6
1.3 Aerodinámica .....	7
1.4 Materiales compuestos .....	9
1.4.1 Materiales compuestos con estructura tipo sándwich de aluminio y polietileno.....	11
1.4.2 Materiales compuestos en vehículos .....	12
1.4.3 Materiales compuestos de reciclaje.....	13
1.5 Gestión de residuos .....	15
1.5.1 Residuos sólidos urbanos .....	16
1.6 Reciclado.....	16
1.7 Envase multilaminado .....	16
1.7.1 Tectán, CHIPTEC y Polialuminio .....	17
1.7.2 TrialUM®.....	18
1.8 Unión por adhesión .....	19
1.9 Fatiga mecánica .....	20
1.10 Transferencia de calor.....	21

1.10.1 Conductividad térmica .....	21
1.11 Conductividad eléctrica .....	21
1.12 Optimización de diseño .....	22
JUSTIFICACIÓN.....	24
HIPÓTESIS.....	24
OBJETIVOS.....	25
Objetivo general.....	25
Objetivos específicos.....	25
CAPITULO 2.....	26
2. METODOLOGÍA.....	26
2.1 Descripción general del Vehículo Fotovoltaico Híbrido .....	26
2.2 Estudio mecánico del Vehículo Fotovoltaico Híbrido .....	27
2.2.1 Llanta delantera .....	29
2.2.2 Llanta trasera .....	29
2.2.3 Cuerpo del vehículo .....	30
2.2.4 Fuerza aerodinámica .....	30
2.2.5 Fuerza de roce .....	30
2.2.6 Resistencia a la rodadura.....	31
2.2.7 Sumatoria de fuerzas del conjunto .....	33
2.3 Diseño de la estructura y propuestas de diseño del Vehículo Fotovoltaico Híbrido..	33
2.4 Simulación CFD de diseños propuestos .....	36
2.5 Optimización del grosor del núcleo del material compuesto tipo sándwich .....	38
2.6 Adhesión y desarrollo de técnica de unión entre paneles.....	40
2.7 Conformado de la estructura multilaminar .....	42
2.7.1 Recolección, acondicionamiento y molienda de materia prima para el material compuesto .....	42
2.7.2 Conformación de núcleo de material compuesto por termo-compresión .....	44
2.7.3 Armado de la estructura tipo sándwich .....	45

2.8	Rolado de conformados multilaminados .....	46
2.9	Caracterización mecánica del material.....	47
2.9.1	Prueba de tensión del multilaminado .....	47
2.9.2	Prueba de flexión en 3 puntos del multilaminado.....	49
2.10	Estudio de transferencia de calor transversal del multilaminado .....	50
2.11	Estudio de resistividad eléctrica transversal del multilaminado.....	51
2.12	Instalación de la carrocería y pruebas de rendimiento.....	52
CAPITULO 3.....		54
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	54
3.1	Análisis mecánico del vehículo fotovoltaico híbrido .....	54
3.2	Simulaciones CFD de los modelos .....	59
3.3	Optimización del grosor del núcleo .....	63
3.4	Pruebas de adhesión .....	65
3.5	Conformado de la estructura multilaminar .....	66
3.6	Rolado de conformados multilaminados .....	68
3.7	Caracterización mecánica del material.....	70
3.7.1	Prueba de tensión del multilaminado .....	70
3.7.2	Prueba de flexión en 3 puntos del multilaminado.....	73
3.8	Estudio de transferencia de calor transversal del multilaminado .....	75
3.9	Estudio de resistividad eléctrica transversal del multilaminado.....	76
3.10	Estudio de rendimiento del vehículo fotovoltaico híbrido .....	76
CONCLUSIONES .....		78
BIBLIOGRAFÍA.....		81
4.	Anexo A: CODIGOS DE OPTIMIZACIÓN .....	89

## LISTA DE SÍMBOLOS

$q$	Rapidez de transferencia de calor
$k$	Conductividad térmica del material
$A$	Área transversal por la que fluye el calor
$\frac{\partial T}{\partial x}$	Gradiente de temperatura en dirección de calor
$P_m$	Potencia mecánica (W)
$F$	Fuerza (N)
$v$	Velocidad (m/s)
$\sum F$	Sumatoria de fuerza (N)
$m$	Masa (kg)
$a$	Aceleración (m/s <sup>2</sup> )
$\sum M$	Sumatoria de momento (N.m)
$I$	Momento de inercia (kg·m <sup>2</sup> )
$\alpha$	Aceleración angular (rad/s <sup>2</sup> )
$g$	Gravedad (m/s <sup>2</sup> )
$R$	Radio de la llanta (m)
$S$	Área frontal (m <sup>2</sup> )
$C_d$	Coefficiente de resistencia aerodinámica
$\rho$	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
$F_r$	Fuerza de roce (N)
$F_N$	Fuerza Normal al suelo (N)
$\mu_s$	Coefficiente de roce estático
$C_{rr}$	Coefficiente de rodadura
$F_{rr}$	Fuerza de rodadura (N)
$\sigma$	Esfuerzo (MPa)
$g_1$	Grosor variable del aglomerado (mm)
$g_2$	Grosor fijo del aluminio 0.6 mm
$\sigma_{ag}$	Esfuerzo de cedencia del aglomerado (MPa)
$\sigma_{al}$	Esfuerzo de cedencia del aluminio (MPa)
$k$	Conductividad térmica (W/m.K)
$k_{ag}$	Conductividad térmica del aglomerado (W/m.K)



$k_{al}$	Conductividad térmica del aluminio (W/m.K)
$J$	Función objetivo de optimización
$\mu$	Factor de peso en la función objetivo de optimización
$\varepsilon$	Deformación
$E$	Módulo elástico (MPa)
$MOR$	Módulo a la ruptura a flexión (MPa)
$l$	Longitud (mm)
$w$	Ancho (mm)
$h$	Grosor (mm)
$Q$	Flujo de calor (W)
$A$	Área por el que el flujo de calor es transferido (m <sup>2</sup> )
$L$	Espesor del material en la dirección en la que fluye el calor (m)
$\Delta T$	Diferencial de temperatura que presenta el material (K)
$\rho_v$	Resistividad volumétrica ( $\Omega \cdot mm/m$ )
$R$	Resistencia ( $\Omega$ )
$\omega_r$	Velocidad angular de la rueda (rad/s)
$\omega_m$	Velocidad angular del motor (rad/s)
$G$	Reducción de la transmisión (-)
$R$	Radio de la llanta (m)

## ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1. 1. COMPOSICIÓN DEL NÚCLEO [38]. .....	19
TABLA 1. 2. PROPIEDADES DEL MATERIAL COMPUESTO MULTILAMINADO [38, 40]. .....	19
TABLA 2. 1. CARACTERÍSTICA DEL VEHÍCULO FOTOVOLTAICO HÍBRIDO.....	26
TABLA 3. 1. COEFICIENTE DE ARRASTRE DE LAS FIGURAS GEOMÉTRICAS.....	59
TABLA 3. 2. COEFICIENTE DE ARRASTRE DE LOS DISEÑOS PROPUESTOS PARA LA CARROCERÍA DEL VFH.....	60
TABLA 3. 3. RESISTENCIA AL PELADO CON TRES TIPOS DE ADHESIVO EN EL MATERIAL COMPUESTO.....	65
TABLA 3. 4. PROPIEDADES A TENSIÓN DE LOS MATERIALES. ....	72
TABLA 3. 5. RESISTENCIA A LA FLEXIÓN. ....	74
TABLA 3. 6. CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE LOS COMPONENTES Y DE DOS ESTRUCTURAS TIPO SÁNDWICH CON DIFERENTE GROSOR.....	75

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. 1. COEFICIENTE DE ARRASTRE PARA PERFILES DE VEHÍCULOS [11].	8
FIGURA 1. 2. PROTOTIPOS DE AUTOBUSES PARA ESTUDIO AERODINÁMICO.	9
FIGURA 1. 3. MATRIZ Y REFUERZO DE UN MATERIAL COMPUESTO [17].	9
FIGURA 1. 4. TRIANGULO DE CLASIFICACIÓN DE LOS TIPOS DE MATERIALES [18].	10
FIGURA 1. 5. TIPOS DE FIBRAS EN MATERIALES COMPUESTOS [19].	11
FIGURA 1. 6. PANEL TIPO SÁNDWICH [21].	11
FIGURA 1. 7. ESTRUCTURA TIPO SÁNDWICH DE ALUMINIO CON NÚCLEO DE POLIETILENO [24].	12
FIGURA 1. 8. COMPOSICIÓN DE UN ENVASE MULTILAMINADO [35].	17
FIGURA 1. 9. TECTÁN/CHIPTEC [35].	18
FIGURA 1. 10. ARREGLOS COMUNES DE UNIONES INTERLAMINARES [43].	20
FIGURA 1. 11. PLANTEAMIENTO DE OPTIMIZACIÓN DE MATERIAL COMPUESTO MULTILAMINADO DE FIBRAS ORTOTRÓPICOS.	23
FIGURA 2.1. VEHÍCULO FOTOVOLTAICO HÍBRIDO EN SUS CONDICIONES ORIGINALES.	27
FIGURA 2.2. DIAGRAMA DE CUERPO LIBRE: A) VEHÍCULO FOTOVOLTAICO HÍBRIDO, B) RUEDA TRASERA Y C) RUEDA DELANTERA.	28
FIGURA 2.3. RESISTENCIA A LA RODADURA [54].	31
FIGURA 2.4. DISEÑO DE LA NUEVA ESTRUCTURA DEL VEHÍCULO FOTOVOLTAICO HÍBRIDO.	34
FIGURA 2.5. DISEÑOS DE CARROCERÍA: A) DISEÑO PRELIMINAR B) DISEÑO 1 C) DISEÑO 2 D) DISEÑO 3 E) DISEÑO 4.	35
FIGURA 2.6. SIMULACIÓN DE FIGURAS GEOMÉTRICAS BÁSICAS CON VELOCIDAD DE VIENTO DE 7.4 M/S A) ESFERA; B) CUBO; C) TRIANGULO CON PENDIENTE DE SALIDA; D) TRIANGULO CON PENDIENTE DE ENTRADA.	37
FIGURA 2.7. DOMINIO PARA LA SIMULACIÓN DE VEHÍCULOS [57].	37
FIGURA 2.8. PERFIL DE VELOCIDAD DE SIMULACIÓN DEL DISEÑO 1.	38
FIGURA 2.9. PERFIL DE PRESIÓN DE SIMULACIÓN DEL DISEÑO 1.	38
FIGURA 2.10. DIMENSIONAMIENTO DE LAS PROBETAS PARA LA PRUEBA DE ADHESIÓN INTERLAMINAR [59].	41
FIGURA 2.11. TRASLAPE SIMPLE A) UNA PIEZA (UN NÚCLEO Y UNA CARA DE ALUMINIO), B) UNIÓN DE DOS PIEZAS.	41

FIGURA 2.12. TRASLAPE DOBLE A) UNA PIEZA (UN NÚCLEO Y DOS CARAS DE ALUMINIO DESFASADAS), B) UNIÓN DE DOS PIEZAS. ....	41
FIGURA 2.13. TRASLAPE SIMPLE CON DESBASTE A) UNA PIEZA (UN NÚCLEO CON LOS DOS EXTREMOS OPUESTOS DESBASTADOS Y DOS CARAS DE ALUMINIO AJUSTADAS A CADA LADO DEL NÚCLEO) B) UNIÓN DE DOS PIEZAS. ....	42
FIGURA 2.14. RECOLECTA DE MATERIA PRIMA PARA LA FABRICACIÓN DEL AGLOMERADO A) ENVASES MULTILAMINADOS DE ALIMENTOS, B) ENVASES DE POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD. ....	43
FIGURA 2.15. MOLINO PAGANI EMPLEADO PARA PROCESAR. ....	43
FIGURA 2.16. MOLIENDA DE LA MATERIA PRIMA CON CRIBA DE 4 MM NOMINAL A) TETRA PAK, B) POLIETILENO DE ALTA DENSIDAD. ....	44
FIGURA 2.17. PRENSA CARVER PARA CONFORMAR EL AGLOMERADO POR TERMOCOMPRESIÓN. ....	45
FIGURA 2.18. MATERIAL AGLOMERADO DE 50 CM X 50 CM DE TB Y PEAD. ....	45
FIGURA 2.19. PARTES DE LA ESTRUCTURA TIPO SÁNDWICH. ....	46
FIGURA 2.20. ROLADORA MECÁNICA PARA DAR FORMA A LAS LÁMINAS. ....	47
FIGURA 2.21. CURVA CARACTERÍSTICA DE UNA PRUEBA DE TENSIÓN. ....	47
FIGURA 2.22. FORMAS DE LAS PROBETAS A TENSIÓN: A) RECTANGULAR CON TABS B) HUESITO [61]. ....	48
FIGURA 2.23. MONTAJE DE PROBETA A TENSIÓN EN MÁQUINA DE PRUEBAS UNIVERSAL. ....	48
FIGURA 2.24. DISPOSICIÓN DE FUERZAS EN LA PRUEBA DE FLEXIÓN [62]. ....	49
FIGURA 2.25. PRUEBA DE FLEXIÓN EN MÁQUINA UNIVERSAL. ....	50
FIGURA 2.26. EQUIPO PARA DETERMINAR CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE MATERIALES [38]. ....	51
FIGURA 2.27. MATERIAL COMPUESTO TIPO SÁNDWICH DE 5 CM X 5 CM PARA PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA: A) CONEXIÓN DE LA PROBETA; B) CIRCUITO DE PRUEBA DE CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA. ....	52
FIGURA 2.28. MÉTODO DE UNIÓN DE LAS LÁMINAS A LA ESTRUCTURA DEL VFH. ....	53
FIGURA 2.29. VISTA PREVIA DEL VFH CON LA CARROCERÍA FINAL. ....	53
FIGURA 3.1. FUERZA DE TRACCIÓN DE LAS LLANTAS MOTRICES Y ACELERACIÓN SIN DESLIZAMIENTO EN FUNCIÓN A LA VELOCIDAD. ....	54
FIGURA 3.2. RESISTENCIA AERODINÁMICA PARA DIFERENTES COEFICIENTES DE ARRASTRE Y VELOCIDADES. ....	55

FIGURA 3.3. FUERZA INERCIAL DE LAS LLANTAS.	56
FIGURA 3.4. FUERZAS DE RODADURA Y PESO EN PLANO INCLINADO: A) 0° B) 10° C) 20° D) 30°.	57
FIGURA 3.5. COEFICIENTE DE ARRASTRE DE LAS FIGURAS GEOMÉTRICAS.	60
FIGURA 3.6. COMPARATIVO DEL FLUJO DE AIRE ENTRE A) DISEÑO PRELIMINAR Y B) DISEÑO 1.	61
FIGURA 3.7. COMPARACIÓN DE LOS DISEÑOS DEL VFH, EN TURBULENCIA Y DEL ÁREA TRANSVERSAL: A) DISEÑO 1 CON TURBULENCIA EN LA PARTE POSTERIOR; B) DISEÑO 2 CON INCLINACIÓN DEL TECHO; C) DISEÑO 1 VISTA FRONTAL; D) DISEÑO 2 VISTA FRONTAL.	62
FIGURA 3.8. COMPARACIÓN DEL EFECTO DEL ALERÓN DEL TECHO Y ANCHO FRONTAL: A) DISEÑO 2; B) DISEÑO 3;	62
FIGURA 3.9. LÍNEAS DE PRESIÓN SOBRE EL DISEÑO 1.	63
FIGURA 3.10. VISTA PRELIMINAR DEL DISEÑO 1 A) VISTA ISOMÉTRICA; B) VISTA FRONTAL; C) VISTA LATERAL	63
FIGURA 3.11. ESTRUCTURA TIPO SÁNDWICH CON NÚCLEO AGLOMERADO DE TETRA PAK Y POLIETILENO: A) CON LOS BORDES DESCUBIERTOS; B) CON LOS BORDES CUBIERTOS CON CINTA ADHESIVA DE ALUMINIO PARA EL CONFORMADO.	67
FIGURA 3.12. ESTRUCTURA TIPO SÁNDWICH DESFASADO PARA TÉCNICA DE UNIÓN, OBSERVANDO EL ESCURRIMIENTO DEL NÚCLEO, DENTRO DEL ESPACIO GENERADO PARA EL TRASLAPE.	67
FIGURA 3.13. UNIÓN DE CUATRO NÚCLEOS CON UNA CARA DE ALUMINIO.	68
FIGURA 3.14. ESTRUCTURA TIPO SÁNDWICH, CONSOLIDADO CON ADHESIVO DE POLIETILENO.	68
FIGURA 3.15. ROLADO DE LAMINADO DE UNA DE CARA ALUMINIO HASTA UN RADIO DE 6 CM DE CURVATURA.	69
FIGURA 3.16. ROLADO DE ESTRUCTURA TIPO SÁNDWICH HASTA 14 CM DE RADIO DE CURVATURA.	69
FIGURA 3.17. RESULTADO DEL ENSAYO DE TENSIÓN: GRÁFICA ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN.	70
FIGURA 3.18. GRÁFICA DE TENSIÓN ESFUERZO VS. DEFORMACIÓN, DE LA ESTRUCTURA SÁNDWICH CON DOS GROSORES DE NÚCLEOS DISTINTOS, DEL ALUMINIO Y EL AGLOMERADO [68].	71
FIGURA 3.19. RESULTADOS DEL ENSAYO DE FLEXIÓN PARA LOS PANELES TIPO SÁNDWICH DE 0.236CM DE GROSOR: GRÁFICA ESFUERZO DE FLEXIÓN VS. DEFLEXIÓN.	73

## RESUMEN

Con el propósito de aumentar la eficiencia energética de un vehículo fotovoltaico híbrido (VFH), que fue adaptado por los investigadores del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). Se realizó un estudio mecánico considerando la estructura del vehículo y datos técnicos de piezas, con el fin de establecer los parámetros iniciales de velocidad máxima teórica, peso aproximado, autonomía, potencia disponible y dimensionamiento de la estructura. Con el objetivo de relacionar los factores que demandan potencia en el desplazamiento y establecer los parámetros de diseño de la carrocería y del material, para la reducción del peso final.

El diseño de la carrocería se realizó en SOLIDWORKS (un software de diseño asistido por computadora para ingeniería), donde se pueden realizar diseño de piezas en 3D y permite realizar análisis mecánicos. En este software se simula el comportamiento del vehículo en una corriente de aire para obtener las fuerzas resultantes, cuyo fin es conseguir el perfil aerodinámico que reduzca la potencia demandada durante su desplazamiento.

Para la carrocería del VFH fue diseñado y optimizado un material compuesto con estructura laminar y un núcleo aglomerado de material reciclado, con propiedades mecánicas adecuadas a las necesidades estructurales. Las propiedades medidas del material compuesto fueron: resistencia a la tensión y flexión, además de su conductividad térmica y eléctrica, así como su densidad que incluso fue menor a la del aluminio. Obteniendo un material altamente competitivo, debido a que la carrocería diseñada resultó resistente y liviana, adecuada para su implementación en el presente vehículo en estudio.

## **ABSTRACT**

With the purpose of increasing the energy efficiency of a hybrid photovoltaic vehicle (HPV), which was adapted by researchers from the Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY). A mechanical study was carried out considering the vehicle structure and technical data of parts, in order to establish the initial parameters of theoretical maximum speed, approximate weight, autonomy, available power and dimensioning of the structure. With the aim of relating the factors that demand power in the displacement and establish the design parameters of the bodywork and material, for the reduction of the final weight.

The car bodywork design was carried out in SOLIDWORKS (a computer-aided design software for engineering), where 3D part design can be performed, allowing mechanical analysis. This software simulates the behavior of the vehicle in an air current to obtain the resulting forces, being the purpose, to achieve the aerodynamic profile that reduces the power demanded during its displacement.

For the HPV bodywork, a composite material with a multilayered structure and a agglomerated core of recycled material was designed and optimized, with mechanical properties appropriate to structural needs. The measured properties of the composite material were: tensile strength, flexural strength, in addition to its thermal and electrical conductivity, as well as its density, which resulted lower than that of aluminum. Obtaining a lightweight and resistant material, adequate for the use as bodywork of the present experimental car.

## INTRODUCCIÓN

Debido a su naturaleza y tipo de investigación las unidades de Recursos Naturales y Energía Renovable del Centro de Investigación Científica de Yucatán (CICY), realizan salidas de campo para el desarrollo de investigaciones científicas y tecnológicas en zonas silvestres. Usualmente no pueden transitar vehículos tradicionales, por lo que es necesario un apoyo para el traslado y desplazamiento de las personas y materiales al realizar estas expediciones. Por este motivo, la unidad de Energía Renovable decidió adaptar un vehículo todo terreno y con características que sean amigables con el medio ambiente.

El vehículo es eléctrico para que no emita gases de combustión y sea silencioso, factor importante para no perturbar las zonas en exploración, dándole un carácter más ambientalista. Otra ventaja de los vehículos eléctricos es que la entrega de potencia del motor puede ser instantánea y se puede controlar con gran precisión. Sin embargo, los vehículos eléctricos están limitados por la energía que puedan almacenar, por lo cual se le colocaron paneles solares, componentes que permiten cargar las baterías del vehículo mientras se encuentren expuestos a la radiación solar. Al combinar el sistema de almacenamiento de energía y los paneles fotovoltaicos se describe un sistema híbrido; de esta forma el vehículo adopta el nombre de vehículo fotovoltaico híbrido (VFH).

Como se expresó anteriormente el VFH posee una autonomía limitada, vinculada con la capacidad de almacenamiento de energía en las baterías de 48 V y 60 Ah (características que determinan la potencia que las baterías son capaces de entregar) y aunque tenga una fuente alternativa para suplir parcialmente la demanda, es necesario considerar otros factores para aumentar su rendimiento. Debido a esto, en este proyecto se realizaron estudios de diseño mecánico y de materiales, para considerar los factores que demandan potencia a través del motor eléctrico a la hora de su desplazamiento. Se obtuvo como resultado que el peso es una fuerza con gran influencia en terrenos con pendiente positiva y en la resistencia a la rodadura. El otro factor determinante es la resistencia aerodinámica, fuerza que influye en el cuerpo de forma exponencial con respecto a la velocidad absoluta entre el vehículo y el aire. Por lo que un diseño aerodinámico y una carrocería liviana permiten aumentar la eficiencia energética del vehículo fotovoltaico híbrido.



Para crear el diseño aerodinámico se realizaron simulaciones en el software SOLIDWORKS Flow Simulation. Inicialmente se realizó el diseño de figuras geométricas sencillas, con dimensiones y condiciones similares a las que estaría sometido el vehículo, para determinar los coeficientes de arrastre, el comportamiento de las corrientes y la presión del aire cuando pasa el sólido. Con base en los resultados obtenidos, se define la geometría adecuada para el diseño final y se reduce la potencia demandada por la resistencia aerodinámica.

Con la finalidad de implementar una carrocería liviana se indaga en los materiales compuestos, ya que son buenos materiales de ingeniería por las propiedades únicas que poseen. Los materiales compuestos se destacan usualmente por tener resistencias específicas (resistencia en relación a la densidad) más altas que los materiales convencionales. Dentro de la clasificación de los materiales compuestos se encuentran los particulados, los fibroreforzados, multilaminados o mixtos, que combinan dos o todas las estructuras anteriormente mencionadas.

Adicionalmente, en este trabajo se utilizaron materiales de deshecho como aglomerado del material compuesto, ofreciendo un mayor soporte medio ambiental. Los materiales reciclados que se emplearon en este trabajo son cajas multicapa y envases de polietileno de alta densidad de bebidas o productos de limpieza, los cuales se usaron como la materia prima del material compuesto de ingeniería. Al reciclar este material de desecho y convertirlo en un material compuesto, se les estaría agregando un ciclo de vida con nuevas funciones, reduciendo los altos niveles de desecho sin aprovechamiento y fomentando un uso responsable de material en pro a un desarrollo sustentable.

## CAPITULO 1

### ANTECEDENTES

#### 1.1 Evolución automotriz

Desde la creación del primer automóvil a finales del siglo XIX hasta la actualidad, se han realizado importantes avances tecnológicos, pasando por un motor de vapor, motores de combustión interna, motores eléctricos e híbridos, en los que se combinan distintas tecnologías. El camino que guía la evolución de los vehículos ha sido “mejorar” la forma en que se transportan las personas, ya sea para disminuir el tiempo de traslado, transporte en masa, mayor confort, entre otros. Sin embargo, en la actualidad hay un parámetro muy importante y es la eficiencia de los vehículos, ya que el precio de los combustibles es elevado y los usuarios demandan aumentar las distancias recorridas con menor consumo de combustible, esto indirectamente está relacionado con una visión ecológica, ya que significaría menores emisiones de gases de efecto invernadero al medio ambiente [1].

A pesar de que las marcas comerciales buscan desarrollar sus vehículos para vender productos innovadores, es en el área deportiva donde ocurren los mayores avances tecnológicos. En las competiciones de los monoplazas cada factor importa para conseguir la victoria, por lo que de esta rama se pueden extrapolar los desarrollos a las demás áreas del automovilismo. Por ejemplo, la utilización de nuevos materiales para las autopartes que sean más livianas y resistentes, diseños aerodinámicos, para generar la menor resistencia al avance con el viento, combinación de motores para alcanzar una máxima potencia en menos tiempo y un mayor rendimiento [2].

Un ejemplo de innovación tecnológica, es la marca Jonhson Controls los cuales son pioneros dentro del desarrollo de piezas realizadas para autos comerciales, al utilizar materiales compuestos con fibras naturales, con el fin de obtener materiales con alta resistencia, baja densidad y más amigables con el medio ambiente. Estas piezas elaboradas por Jonhson Controls son implementadas en las partes internas de algunos Mercedes Benz, marca de vehículos comerciales alemana con alto prestigio en el sector automovilístico [3].

### **1.1.1 Clasificación de los vehículos**

Durante el avance del parque automotriz han ocurrido diversos cambios en los vehículos desde su forma hasta su operación. Entre las clasificaciones de los vehículos por su fuente de poder o el tipo de motor, se encuentran: los automóviles tradicionales que poseen motores de combustión interna (MCI), estos utilizan combustibles fósiles como gasolina o diesel y son los más comunes a nivel mundial. Sin embargo, estos vehículos de MCI, que llevan en el mercado desde los inicios de esta industria, están siendo remplazados por una nueva generación de vehículos híbridos (VH) y vehículos eléctricos de baterías (VEB). Estas dos “nuevas” categorías son más amigables con el medio ambiente al reducir o eliminar las emisiones de gases de efecto invernadero, gases que impulsan el calentamiento global acelerado.

Los vehículos híbridos hacen referencia a la combinación de fuentes de energía para su desplazamiento, en general son MCI combinados con motores eléctricos, estos pueden funcionar bajo múltiples arreglos, por ejemplo, motores en serie, paralelo o combinados. Los arreglos hacen referencia a como se entrega la potencia a la transmisión. Para la combinación de los VH se encuentran modelos con puntos de carga para el banco de baterías o solamente el tanque de combustible y por la potencia generada se carga el banco de baterías.

Para los VEB se considera que solo trabaja con motores eléctricos y tiene un sistema de almacenamiento de energía, en este caso un banco de baterías y utilizan puntos de carga. Otra característica de estos vehículos es que no generan emisiones de gases de efecto invernadero y se podrían considerar como los más limpios. Pero estos poseen una gran limitante, que es el almacenamiento de energía, este factor ha sido el ancla para la comercialización de esta categoría ya que tienen una autonomía limitada [4].

Como alternativa para los VEB se han ingeniado formas de aumentar el rendimiento de estos vehículos, tales como incorporando fuentes de energía renovable. El caso más común es el de los VEB con paneles solares, es decir paneles fotovoltaicos incorporados en la estructura del vehículo, usualmente en la sección del techo. A estos vehículos que combinan su sistema de almacenamiento de energía en el banco de baterías y una fuente alterna de obtención de energía se les llama vehículos fotovoltaicos híbridos (VFH), ya

que no son completamente independientes de un sistema de carga que no sean los paneles fotovoltaicos [5].

## 1.2 Eficiencia energética

Se entiende como eficiencia energética, el ahorro y mejor aprovechamiento de los recursos que proveen los servicios energéticos. Siendo un término muy amplio, en general, se puede expresar matemáticamente como el cociente entre el producto de salida del proceso (un bien material o servicio) y la energía utilizada en el proceso, de este modo al elevar el cociente se estaría elevando la eficiencia energética del proceso, al obtener mayor producto con menos energía implementada.

Este concepto se puede extrapolar a las áreas de:

- Termodinámica: como comúnmente se utiliza en los procesos científicos de transferencia de calor con simples relaciones o incluso, comparándolos con procesos ideales, por ejemplo, el ciclo de Carnot, que es la máxima eficiencia que puede alcanzar un equipo.
- Físico termodinámico: similar a las relaciones termodinámicas pero la relación está dada entre unidades físicas de producto entre las unidades termodinámicas, por ejemplo, 5 tornillos / 500 W, una cantidad de producto entre la energía utilizada al producirlo.
- Económico termodinámico: también se trata de un término híbrido, en el que se considera el precio del servicio entregado y su cantidad, por ejemplo, el cobro de la corriente eléctrica 0.0668 \$ / KWh.
- Económicas: este indicador mide los cambios de eficiencia energética puramente en términos de valor del mercado, por ejemplo, el costo del producto entre el costo de producción.

De manera global esto se interpreta como una posible mitigación a la crisis económica, energética y ambiental, pues cada día aumenta la demanda de energía per cápita para satisfacer las necesidades básicas y de confort, por lo que todo esto hace que la política cada vez considere este tema con mayor relevancia [6].

Por otra parte, cuando se aplican políticas que fomentan la eficiencia energética, se puede obtener una buena administración de recursos. Con el fin de disminuir la energía

consumida, conllevando a un ahorro económico y una reducción de emisiones de gases de efecto invernadero en las plantas eléctricas de fuentes de energías convencionales; ayudando a desacelerar el calentamiento global forzado. Esto envuelve diversos conceptos como [7]:

- Ahorro energético, que corresponde a la reducción de la demanda de energía usada de forma innecesaria, implementando planes inteligentes de consumo.
- Cuidado del medio ambiente, evitando la sobreexplotación de recursos naturales para satisfacer la demanda de materia prima.
- Un balance económico en crecimiento que favorezca a las entidades generadoras de energía y al consumidor, actualizando sistemas de generación, distribución y consumo, disminuyendo pérdidas de energía por calor en sistemas obsoletos o desgastados.
- Disminución de emisiones de CO<sub>2</sub>, esta sección corresponde a la generación de energía eléctrica y el área de transporte. La generación de energía a través de fuentes de energías renovables que no utilice la quema de combustibles. En el área de transporte se fomenta la utilización de transporte público, en el que un solo vehículo logre transportar una mayor cantidad de personas o la utilización de bicicletas [7].

Como consecuencia de los factores mencionados se puede calcular el ahorro energético y fomentar el desarrollo sostenible, generando un balance entre un sistema inicial con condiciones fuera de lo ideal y luego de la aplicación de las políticas para el mejoramiento del sistema, dando como resultado un mejor desempeño a nivel micro, por persona y a nivel macro, por estado o ciudad [7].

En general la eficiencia energética se basa en una buena gestión de energía para disminuir el consumo y obtener los beneficios demandados. Se puede implementar en cualquier área de demanda, por ejemplo, en el área industrial, urbano o en el sector transporte [8].

### **1.2.1 Eficiencia energética en vehículos.**

La eficiencia energética de los vehículos está relacionada con el rendimiento o desempeño, los balances se pueden realizar desde la obtención de la fuente de energía,

en el caso de los vehículos de motores de combustión interna los combustibles o para los de motor eléctrico desde la generación de la energía. Por otro lado, se puede realizar balances en función del rendimiento otorgado por el vehículo por una unidad de potencia en un tiempo determinado [1].

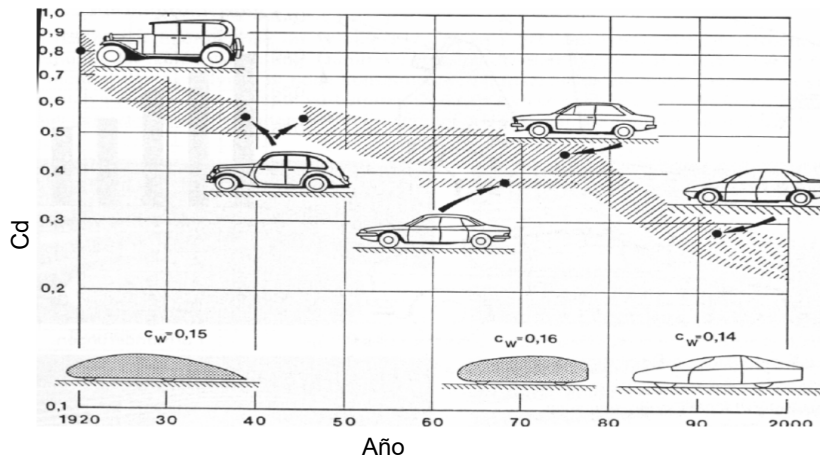
### 1.3 Aerodinámica

La aerodinámica es la rama de la mecánica encargada de estudiar el rendimiento de los cuerpos en movimiento a través de los flujos de aire u otros gases. Tomando en cuenta regímenes del fluido como, laminar o turbulento. Las variables más utilizadas para estos estudios son la presión, la velocidad y coeficiente de arrastre, estos dependen de la geometría del cuerpo [9].

Para la aerodinámica en el área automotriz es importante el área frontal del vehículo y la geometría completa del cuerpo, tomando en cuenta el ángulo de ataque del capó y el parabrisas, ya que son las secciones que tienen el primer contacto con el aire. De igual forma, la geometría trasera del vehículo es importante porque determina el estado con que sale el aire al pasar por el cuerpo y muestra el grado de succión por la caída de presión en un régimen laminar o turbulento.

En la aerodinámica la fuerza que se genera al moverse un cuerpo en un gas se conoce como resistencia aerodinámica. Esta resistencia se describe en función del área frontal del cuerpo, densidad del fluido, velocidad entre el cuerpo y el fluido y un coeficiente de arrastre ( $C_d$ ), por sus siglas en inglés *drag coefficient*.

El coeficiente de arrastre para los vehículos comerciales es muy variable y dependiente de su geometría, como se muestra en la Figura 1.1. La forma de referencia con menor  $C_d$  es la de una gota con un valor de 0.1 [10, 11].



**Figura 1.1. Coeficiente de arrastre para perfiles de vehículos [11].**

Debido al aumento del precio del combustible, la aerodinámica no solo se estudia en los vehículos comerciales, sino también en los autobuses y todo medio de transporte, para el ahorro de combustible y hacer a los autobuses vehículos más eficientes. El estudio aerodinámico de los autobuses se ha realizado de forma experimental y numéricamente, con el fin de demostrar que a pesar de ser vehículos de sección transversal amplia se puede mejorar el desempeño con pequeños cambios [12]. Se pueden conseguir reducciones de fuerzas de arrastre con variaciones en el diseño frontal como se muestra en la Figura 1.2. El BUS 1 representa el perfil de los autobuses actuales y más comunes, el BUS 2 tiene inclinación lateral para mejorar la desviación del aire hacia los lados y parte trasera, el BUS 3 tiene un frente aerodinámico utilizando un alerón y el resto es igual al primero, por último, el BUS 4 posee el alerón delantero y adicionalmente la inclinación lateral.

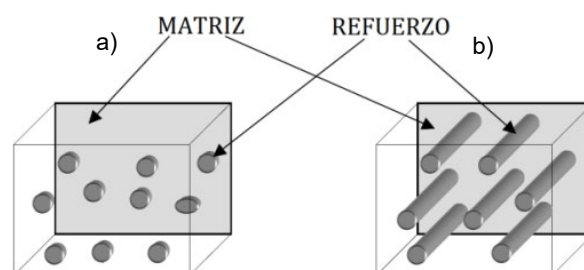


**Figura 1.2. Prototipos de autobuses para estudio aerodinámico [12].**

Estas variaciones en los diseños demostraron mejoras en el coeficiente de arrastre entre un 16% y un 35%, dependiendo de las condiciones de velocidad, mostrando un ahorro sustancial de combustible entre 30 – 34% que representaría entre 6 a 7 litros de combustible en 100 km [13].

#### 1.4 Materiales compuestos

Los materiales compuestos (MC) se definen como la unión de dos o más materiales físicamente y químicamente distintos, con la finalidad de conseguir propiedades superiores y posiblemente únicas con relación a cada uno de los constituyentes. En un material compuesto se define fase continua a la matriz y fase dispersa al refuerzo (como se muestra en la Figura 1.3). La fase dispersa no siempre es implementada con la finalidad de otorgar resistencia mecánica, sino que depende de la función que se requiera [14–16].



**Figura 1.3. Matriz y refuerzo de un material compuesto [17].**



Los MC se pueden clasificar por el porcentaje de material de su matriz y el material de la fase dispersa o el conjunto de los materiales que conforman esta fase, es decir, si son cerámicos, metálicos o poliméricos como se representa en la Figura 1.4.

Usualmente en ingeniería se utilizan matrices poliméricas con refuerzos metálicos o cerámicos para así obtener altas resistencias mecánicas y bajas densidades, lo que genera una alta resistencia específica (resistencia mecánica en relación a la densidad del material).



**Figura 1.4. Triángulo de clasificación de los tipos de materiales compuestos [18].**

Por su conformado se pueden clasificar como: particulados, fibroreforzados, laminados o combinados (consiste en la combinación de dos o las tres clasificaciones anteriores).

Los materiales compuestos particulados, consisten en el aporte de propiedades de elementos con geometría variadas (que pueden tener dimensiones desde micras hasta centímetros) dispersos en la matriz para mejorar las propiedades físicas, mecánicas, térmicas o eléctricas. En los MC particulados la fase dispersa se puede encontrar los nanotubos, hojuelas, polvos, arcillas y esferas, como se ilustra en la Figura 1.3 (a).

Los materiales compuestos fibroreforzados pueden tener fibras continuas o fibras cortas. Estos consiste en pequeños filamentos que aportan resistencia a la matriz para soportar cargas en la dirección de las fibras, de esta forma encontramos: a) fibras continuas unidireccionales; b) fibras continuas bidireccionales; c) fibras continuas multidireccionales; d) fibras discontinuas unidireccionales; e) fibras discontinuas aleatorias, como se muestra en la Figura 1.5.

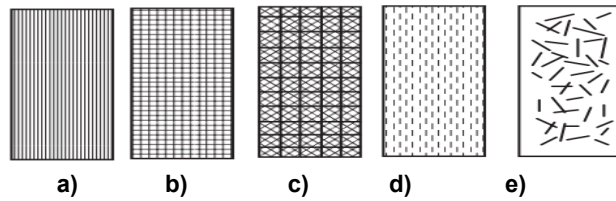


Figura 1.5. Tipos de fibras en materiales compuestos [19].

Los materiales compuestos laminados, son considerados como una estructura de materiales que de esta forma crean el material compuesto. Básicamente consisten en un arreglo multilaminar, en el que dependiendo de la cantidad de láminas; y sus funciones determinarán la estructura final. Una estructura común de estos MC es la llamada tipo sándwich que consiste en la unión de dos caras externas a un núcleo con capas de adhesivos, tal como se muestra en la Figura 1.6. Las caras externas generalmente son de materiales más duros que soportan las fuerzas de tracción y compresión, el núcleo suele ser un material menos denso, aportando la ligereza en el material resultante y soportando las cargas cortantes de la estructura y por último el adhesivo es el elemento que permite la unión de las distintas laminas aportando la resistencia a flexión en el compuesto para evitar la separación de las capas y generando fallas en el material resultante [20].

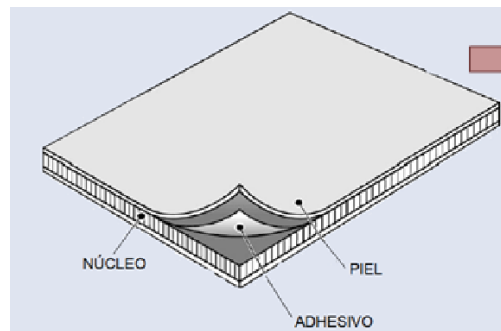


Figura 1.6. Panel tipo sándwich [21].

#### 1.4.1 Materiales compuestos con estructura tipo sándwich de aluminio y polietileno

En la evolución de los materiales compuestos con estructura tipo sándwich, se ha observado su diversidad en aplicaciones dependiendo de cómo esté conformado y los materiales que se utilizan. En la actualidad se comercializa de forma popular una estructura tipo sándwich con caras externas de aluminio con un núcleo de polímero (generalmente polietileno) como se observa en la Figura 1.7, que es utilizado para stands de ferias, decoración de interiores, tiendas, mobiliario, publicidad, señalización, impresión

digital, fachadas de edificios, etc. Las propiedades que se le atribuyen a este tipo de MC es que son eficientes energéticamente para edificios por ser un material aislante térmicamente, son rígidos, ligeros y duraderos, además de ser resistentes a la corrosión y condiciones meteorológicas. Algunos de ellos también poseen propiedades antibacterianas, antimoho y antiestáticas. Algunas de las marcas que los ofrecen son Reynobond®, MATERIALES WORD®, HIANSA PANEL®, qnap®, etalbond®, entre otras [22–24].



**Figura 1.7. Estructura comercial tipo sándwich de aluminio con núcleo de polietileno [24].**

#### **1.4.2 Materiales compuestos en vehículos**

Debido a la crisis energética que se vivió a partir de la segunda mitad del siglo XX, las empresas encargadas del desarrollo automovilístico se vieron obligados a implementar nuevas tecnologías que les permitiera hacer más eficientes sus vehículos, de esta forma entraron los materiales compuestos a esta área. Los parámetros esenciales para satisfacer las necesidades del área automotriz son:

- La reducción del peso, ya que al reducir un 10% del peso se logra ahorrar de un 6% a 8% de combustible
- La seguridad, pues se necesitan materiales que sean seguros para los usuarios, que puedan absorber altas energías de impacto sin que ponga en riesgo a los pasajeros.

Entre las soluciones que plantean los fabricantes se encuentra la utilización de paneles tipo sándwich por sus buenas características de resistencia y aislamiento.

En general las ventajas de utilizar materiales compuestos con matriz polimérica en las distintas partes de un vehículo implican reducción del peso, menores costos de fabricación, mayor resistencia específica mecánica, previene la abrasión, corrosión, desgaste y reacción a agentes químicos. Usualmente los materiales poliméricos poseen buen comportamiento ante cargas dinámicas, absorción de impactos sin deformación apreciable y buen aislamiento térmico, adicionalmente proveen funcionalidad estética, aerodinámica y flexibilidad en el diseño [25].

La implementación de materiales compuestos en el área automotriz se observa en las áreas deportiva, industrial y educativa (como en las competencias universitarias de Formula SAE e ingeniería automotriz). En las diversas áreas se realizan estudios motivados por factores de rendimiento, resistencia o ambiental, cuando se considera las emisiones de gases de combustión y el desecho de las partes de los vehículos al finalizar su vida útil. De esta forma los materiales compuestos con materiales naturales o reciclados son desarrollados en el área industrial y de investigación, como por ejemplo, paneles de fibra de bambú o de caña [26, 27].

En el área deportiva del automovilismo, específicamente en la Formula 1, se comenzó a utilizar los materiales compuestos con el fin de optimizar la eficiencia de la estructura, por la fortaleza que aportan, el buen desempeño a impactos (al absorber grandes cantidades de energía con deformaciones deseadas), la precisión en las geometrías difíciles y la rapidez de su producción. De esta forma los materiales compuestos cada vez fueron aumentando su participación en las carrocerías de los formula 1 [28].

### **1.4.3 Materiales compuestos de reciclaje**

Debido al crecimiento acelerado de la generación de residuos, se han planteado diversas soluciones para reincorporarlos al mercado y generar un nuevo valor agregado a un material desechado. La gran cantidad de residuos se ha vuelto un problema ambiental, ya que, aunque sean tratados y dispuestos de manera correcta es un factor que aún se contabiliza en crecimiento. Esto ofrece la oportunidad de innovar en el área industrial, de construcción o implementación. En todas estas áreas ciertos tipos de residuos pueden incorporarse como materia prima para formar materiales compuestos, usualmente como compuestos de matrices poliméricas que pueden ser de origen reciclado. De esta forma se les otorga un uso a los residuos con una nueva forma y utilidad. Sin embargo, existen

inconvenientes que no permiten aplicar este planteamiento a todo tipo de residuo y son los siguientes [18]:

- La garantía sanitaria, especialmente en el sector alimenticio. Es un sector de la industria muy estricto que usualmente no permite envasar alimentos con materiales reciclados y a la vez, los envases utilizados para los alimentos tampoco los destinan para el reciclaje por la alta probabilidad de encontrarse contaminados;
- Aquellos sistemas productivos abastecedores y productores que generan contaminación con la transformación del producto a tratar. Cuando el proceso de reciclaje genera una alta cantidad de contaminación, mayor a lo que podría significar desechar el material en vez de reciclarlo;
- Los controles destructivos para verificar calidad. El material destinado para el control de calidad de las piezas no es reciclado porque se considera que el material ya falló en la prueba [18].

A grosso modo, los tres puntos mencionados anteriormente son las consideraciones que se toman de cualquier desecho para evaluar su oportunidad de reciclaje. No obstante, la innovación es la clave para poder reutilizar los materiales que hayan cumplido con su ciclo de vida. Una posible solución de reciclaje es incorporar los materiales convencionales desechados en materiales compuestos bajo un proceso de bajo impacto, ya que, como se mencionó anteriormente los materiales compuestos son la combinación de dos o más materiales donde las propiedades del compuesto final se espera que satisfagan la necesidad por la que fueron creados, por lo que se tiene una amplia gama de oportunidades y aplicaciones [18].

El poliestireno expandido es un material considerado problemático como desecho, ya que su vida útil es muy corta, al utilizarse una sola vez como plato de comida desechable o como protector de aparatos electrónicos, que luego de ser trasladados y desempacados se desechan. Como es un material muy voluminoso, representa un problema como residuo, ya que ocupa gran espacio en los contenedores o vertederos y al ser un material de muy baja densidad es un residuo que fácilmente pueden terminar en corrientes de agua por la fuerza del viento y convertirse en un problema medioambiental (ya que especies marinas lo confunden con alimento y al ingerirlo, mueren). Esto destaca la necesidad de darle un segundo ciclo de vida al material, ya sea en su reciclaje o

implementación para crear otros materiales, a través de procesos de disolución o precipitación [29, 30].

Por otra parte los materiales compuestos también representan un reto a la hora de desecharlos, por la combinación de los distintos tipos de materiales. Uno de los compuestos más problemáticos en la actualidad son los polímeros fibroreforzados, ya que por sus buenas prestaciones ha aumentado su fabricación e implementación en diversas áreas. Por tal motivo, se emplean políticas para la disposición después de su vida útil bajo una jerarquía.

Usualmente se promueve la disminución de residuos; luego la reutilización, es decir, utilizar el material desechado para el mismo propósito o no sin modificarlo. Posteriormente está el reciclado, en el que se utilizan los materiales con los que está hecho una pieza para fabricar otra distinta o la misma pero bajo un proceso de fabricación. Después en la jerarquía se considera la quema del material con la recuperación de energía y su implementación de composta; y por último se considera la quema sin recuperación de energía o disponerlo en vertederos [31].

El inconveniente de los materiales compuestos es su gran crecimiento en la industria automovilística, aeroespacial y en el área de energías renovables; ya que actualmente son áreas con una producción exponencial. Sin embargo, estos materiales luego de que llegan al fin de su vida útil se desechan aumentando la cantidad de residuos, es decir, no tienen un apropiado reciclaje. Sin embargo, se estudian procesos físicos, mecánicos y químicos para poder reprocesar o reciclar estos materiales luego de su vida útil, ya que en su mayoría son materiales con altos porcentajes de polímeros, que por lo general es el material más utilizado en los compuestos. Lo que se busca superar con la investigación e innovación de estos procesos es la barrera de alto costo de los procesos de reciclaje de estos materiales y la calidad del producto que sale del material reciclado [32].

### **1.5 Gestión de residuos**

Los residuos son productos de los seres humanos, como aquellos materiales o productos cuyo propietario o poseedor desecha y que se encuentran en estado sólido o semisólido, líquido o gaseoso y que se contienen en recipientes o depósitos, que en principio carecen de valor; pero pueden ser susceptibles de ser valorizados o requieren sujetarse a tratamiento o disposición final conforme a lo dispuesto en la misma Ley

General para la Prevención y Gestión Integral de los Residuos (*LGPGIR*), ya que los materiales que se consiguen en los desechos son los mismos que se consiguen en los productos funcionales, por ejemplo, envases desechados de vidrio de jugos o alimentos para bebés, se puede reciclar el vidrio al fundirlo y hacer un nuevo producto. En función de sus características y orígenes, se les clasifica en tres grandes grupos: residuos sólidos urbanos (*RSU*), residuos de manejo especial (*RME*) y residuos peligrosos (*RP*). Separar los residuos es el primer paso para agregarle valor a este material, ya que es más fácil que entre a una cadena de reciclaje y se obtenga un valor agregado a ese material ya desechado [33, 34].

### **1.5.1 Residuos sólidos urbanos**

Los residuos sólidos urbanos son los que se generan en las casas habitación como resultado de la eliminación de los materiales que se utilizan en las actividades domésticas (p. ej., de los productos de consumo y sus envases, embalajes o empaques) o los que provienen también de cualquier otra actividad que se desarrolla dentro de los establecimientos o en la vía pública, con características domiciliarias, y los resultantes de las vías y lugares públicos siempre que no sean considerados como residuos de otra índole [34].

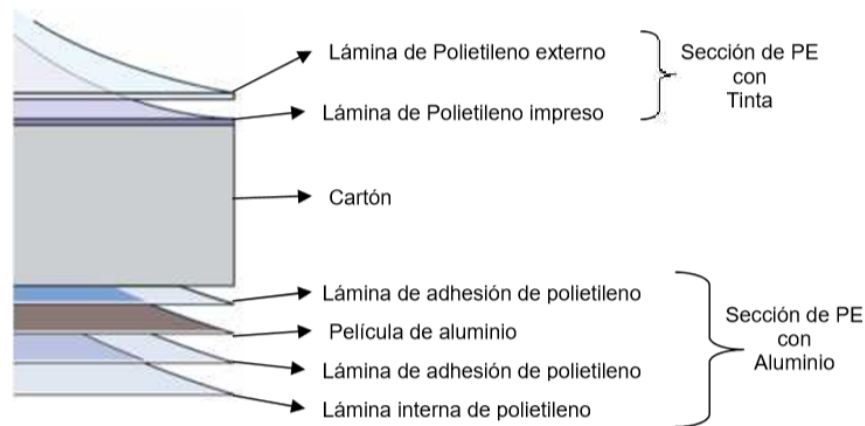
### **1.6 Reciclado**

La regulación de los desechos generados por las industrias y por el consumo de productos son factores claves para disminuir la contaminación del medio ambiente. Afortunadamente, el progreso de la tecnología ha ayudado a disminuir la contaminación en el área productiva al hacer procesos más eficientes, por lo que se generan menor cantidad de residuos. A partir de este punto se fomenta la ideología de residuo cero que consiste en aprovechar el material de desecho para generar un nuevo producto y volver a integrar esos materiales al mercado y esto es lo que se conoce como reciclado. Es decir, un material dispuesto como deshecho transformarlo en un nuevo material que pueda utilizarse con un nuevo fin o uno similar al que se utilizaba [18].

### **1.7 Envase multilaminado**

Los envases multilaminados (p. ej., Tetra Brik®), son envases diseñados para la contención de alimentos, principalmente bebidas como leche o jugos. Por lo que poseen características especiales en su diseño de múltiples capas de papel, polietileno y

aluminio. Usualmente contienen entre 6 a 7 capas de los materiales anteriormente mencionados con posiciones intercaladas, como se muestra en la Figura 1.8, con el objetivo de proporcionar un envase duradero que prolongue la vida del producto contenido aislándolo de microorganismos que lo puedan dañar o descomponer. El porcentaje de los componentes son comúnmente 75% de papel, 20% de polietileno y 5% de aluminio.



**Figura 1.8. Composición de un envase multilaminado [35].**

Este envase por su aplicación de un solo uso se considera altamente contaminante al ser incorporado rápidamente al escalón de residuos sólidos urbanos. Esto se debe a su buena conformación y difícil separación de sus partes para reciclar. Actualmente la marca líder del Tetra Laval Group, en el mercado de estos envases Tetra Pak® incentiva a desarrollar proyectos de reciclaje de estos envases, separando sus compuestos cartón y PolyAl (polietileno y aluminio) o para generar nuevos materiales conglomerados como se realizó en Alemania con el Tectán® [35].

Con los planes de reciclaje se logró aumentar la tasa de reciclaje de 32,000 millones en el 2010 a 46,000 millones para el 2017, representando este último un 25% de todos los envases a nivel mundial. En el caso de México solo se recicla el 18% de los envases (de un total de 7 mil millones de envases al año) mediante 11 empresas, pero principalmente esto se realiza en la Ciudad de México. Esto permite ver este problema como fuente de oportunidad de innovación [36, 37].

### 1.7.1 Tectán, CHIPTEC y Polialuminio

Son materiales aglomerados (como se muestra en la Figura 1.9) que utiliza como materia prima los envases multilaminados desechados, es decir, se reciclan los envases



de multilaminados para sustituir la madera en la fabricación de diversos artículos, por ejemplo, muebles, escritorios, etc. El Tectán se utiliza en diversos países de Europa y en algunos países de Suramérica como Chile, donde se utilizó en el programa “Un techo para Chile” del Hogar de Cristo. En China se produce este material con otro nombre, CHIPTEC y se produce en tres fábricas [35].



**Figura 1.9. Tectán/CHIPTEC [35].**

También existe una variante para el reciclado de los envases multilaminados llamado polialuminio, en el que los envases se introducen en un hidropulper para separar el papel del aluminio y polietileno mediante filtros, con el fin de separar toda la fibra de los envases. Esta fibra se puede utilizar para hacer papel reciclado. El polietileno y el aluminio se muelen y se mezclan para luego ser prensados con calor, para obtener placas que puedan sustituir la función de la madera aglomerada o contrachapada para hacer muebles, mesas, techos, entre otras funciones [37].

### **1.7.2 TrialUM®**

El TrialUM® es un material compuesto desarrollado en el CICY, de la mezcla de materiales reciclados: como los envases multilaminados Tetra Pak® y envases de yogurt o productos de limpieza que sean de polietileno de alta densidad (PEAD). Este material aglomerado es el núcleo de una estructura tipo sándwich.

El núcleo de aglomerado busca aportar buenas propiedades de resistencia cortante, rigidez (para reducir el pandeo de las láminas) y disminuir el peso final del producto por su baja densidad, ya que es un compuesto de cartón, aluminio, polietileno de baja densidad (PEBD) y de alta densidad (PEAD). La proporción del material resultante se muestra en la Tabla 1. 1.

Para la unión de las tapas y el núcleo se utiliza adhesivo polimérico, aportando flexibilidad a deformaciones, manteniendo las partes unidas.

Por último, las dos caras externas del material son láminas de aluminio (1100-H14) que le dan mayor resistencia y durabilidad al material resultante. La composición final del material se define por un porcentaje volumétrico de 84.21% del núcleo de Tetra Pak y PEAD y 15.79% de aluminio de las caras externas.

La combinación de estos elementos produce un buen material para la construcción y amigable con el ambiente ya que en su mayoría es de material reciclado, reintegrando al mercado un material que se considera de desecho y dándole un valor agregado. Sus propiedades mecánicas se muestran en la Tabla 1. 2 [38–40].

**Tabla 1. 1. Composición del núcleo [38].**

<b>Papel</b>	<b>PEBD</b>	<b>Aluminio</b>	<b>PEAD</b>
52.4%	1.63%	0.8%	45.17%

**Tabla 1. 2. Propiedades del material compuesto multilaminado [38, 40].**

<b>Densidad (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia de ruptura a tensión (MPa)</b>	<b>Módulo elástico (GPa)</b>	<b>Módulo de flexión (GPa)</b>
1.15	21.70	23.06	2.42

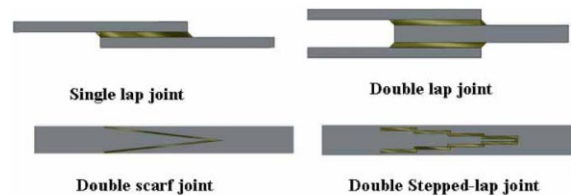
### 1.8 Unión por adhesión

La unión por adhesión es una técnica en crecimiento en la industria, incluyendo el área automotriz y de aviación. Este crecimiento es el resultado del buen rendimiento que genera esta técnica entre distintos tipos de materiales, como las uniones entre metales, cerámicas, polímeros o materiales compuestos; y el rendimiento se establece por la fuerza de unión en la interfaz entre los materiales de interés [41].

La unión entre elementos por adhesión consiste en la utilización de un elemento como una resina o un elemento adhesivo que no modifique el estado de los materiales a unir, es decir, no permite la fundición de los elementos que se desean unir. Dando como resultado una unión permanente que es capaz de transferir cargas mecánicas entre las piezas o elementos.

Como se mencionó anteriormente, es común la unión por adhesión en el área aeronáutica y automotriz por la buena resistencia a las cargas dinámicas cíclicas (fatiga) a las que están sometidas las piezas producidas para aplicaciones ingenieriles. De igual forma, los métodos de unión por adhesión son preferidos porque al no necesitar agujeros para la unión, no se crean debilidades en las piezas por puntos de concentración de esfuerzos, evitando fallas por fatiga del material [42].

A pesar de que, si se realiza una buena unión entre materiales utilizando el método de adhesión, usualmente representa un reto utilizar el arreglo indicado para que sea una unión eficiente, ya que las uniones representan zonas de concentraciones de esfuerzos debido a que depende de este para transferir las fuerzas de un material a otro. Entre las técnicas más comunes están: traslape simple, traslape doble, bisel y bisel escalonado; como se muestra en la Figura 1.10 [43, 44].



**Figura 1.10. Arreglos comunes de uniones interlaminares [43].**

## 1.9 Fatiga mecánica

En muchos casos los materiales están expuestos a cargas cíclicas generando esfuerzos menores a los esfuerzos de cedencia. Esta carga cíclica puede ser producto de la rotación, vibración o flexión continua, generando un esfuerzo en el material (o entre materiales), donde a pesar de que el esfuerzo esté por debajo del límite elástico el material puede fallar por las cargas cíclicas, más comúnmente por cargas dinámicas que, por cargas estáticas, pero ambas pueden ser causas del deterioro y esto se conoce como fatiga mecánica.

Las etapas de fallas por fatiga usualmente se presentan en tres etapas: la primera, se presenta una minúscula fisura superficial, luego esta fisura se va expandiendo gradualmente, hasta que finalmente la grieta ocupa gran parte de la pieza y el material restante que soporta la carga es menor al esfuerzo y ocurre la ruptura [45].

## **1.10 Transferencia de calor**

La termodinámica es la ciencia que estudia como fluye el calor de un cuerpo o espacio de mayor temperatura a un cuerpo o espacio de menor temperatura, esta transferencia se puede dar por tres formas: conducción, convección o radiación. Sin embargo cuando se hace un estudio de transferencia de calor se toma en cuenta la velocidad a la que la energía entre cuerpos puede fluir, mediante los gradientes de temperatura [46].

### **1.10.1 Conductividad térmica**

Conocer las propiedades físicas de un material es de suma importancia para la correcta implementación del mismo, por lo que las propiedades térmicas son significativas para el diseño. La conductividad térmica es una de las tres formas de transferencia de calor, que consiste en el estudio del flujo de energía térmica en un cuerpo sólido, se dice que existe conductividad cuando hay un flujo de calor por un gradiente de temperatura a través de un cuerpo sólido [46].

Adicionalmente la eficiencia con la que se trasfiere el calor de un lado a otro depende de la geometría, las distintas propiedades térmicas de los componentes del material, su distribución y el contacto entre las partículas. Para los materiales compuestos se puede estimar la conductividad térmica si se conocen las propiedades de cada uno de sus elementos y su porcentaje volumétrico, como lo demuestran Kumlutas, Tavman y Turhan (2003) en su artículo "Thermal conductivity of particle filled polyethylene composite materials". Donde comparan resultados teóricos y experimentales, con transferencia de calor en arreglos paralelos y en series de los materiales del compuesto [47].

### **1.11 Conductividad eléctrica**

La conductividad eléctrica es la capacidad de un material de permitir el paso de corriente a través de si, esto ocurre por la capacidad de mover electrones. Este término es lo opuesto a la resistencia eléctrica. Por lo que es una característica relevante a la hora de diseñar, ya que depende de la implementación del material y bajo qué condiciones trabaja se debe conocer su capacidad de transportar electrones.

Por lo general los materiales metálicos se caracterizan por ser de alta conductividad eléctrica, en cambio los cerámicos y poliméricos son de alta resistividad por lo que se consideran aislantes eléctricos [46].

Un ejemplo de la importancia de conocer la conductividad de los materiales, son los aviones, ya que cuando vuela a través de nubes cargadas son propensos recibir descargas eléctricas y es fundamental que esa descarga no llegue a ningún pasajero o sistema del avión que comprometa su funcionamiento. En este caso se debe considerar la conductividad eléctrica longitudinal o transversal al material. Por este motivo se realizan diversos estudios de conductividad eléctrica en materiales compuestos y la conductividad entre piezas, por ejemplo el estudio realizado por Georgeson, Hafenrichter y Westerman, quienes utilizaron corriente alterna y un conjunto de bobinas para medir la conductividad eléctrica en materiales compuestos [48].

### 1.12 Optimización de diseño

La optimización es una importante herramienta que posee una amplia gama de aplicación, como en las áreas de ciencia, economía, ingeniería e industria. Esto permite que el diseñador obtenga el mejor resultado abarcando varias necesidades de un problema, representando un punto máximo o mínimo de un conjunto; por lo general representado por una función lineal o no lineal.

En ingeniería es muy aplicada esta herramienta ya que permite, manufacturar a una máxima eficiencia, reduciendo pérdidas de material, ahorrando costos, maximizando características de materiales, etc. Por lo que la optimización es muy utilizada en los diseños para aumentar su rendimiento [49].

Por lo que surge el concepto de diseño de optimización, que incorpora el área de diseño al problema de optimización, donde se consideran los criterios y condiciones del diseñador, que de igual forma la meta es desarrollar el mejor resultado que satisfagan las necesidades originales del problema [50].

En las últimas décadas ha crecido la utilización de materiales compuestos, los fibroreforzados, multilaminados, particulados o combinados, por su buen desempeño ya que se puede obtener mayores resistencias mecánicas en direcciones preferenciales por menos peso, materiales más delgados o en general más eficientes que los materiales convencionales. Pero por este mismo aumento de demanda de materiales compuestos se impulsó el aumento de su eficiencia, por lo que se han implementado técnicas de optimización para su producción. Stegmann y Lund [51] publicaron un estudio de optimización de materiales compuestos laminados, en el que discuten cuantas láminas de

material fibroreforzado son las necesarias y qué orientación deben tener las fibras, con el fin de optimizar la estructura (minimizar la cantidad de láminas). En la Figura 1.11 se muestra el esquema que utilizan para explicar la estructura del material a optimizar; el objetivo es reducir la cantidad de capas y la dirección de las fibras en cada lámina.

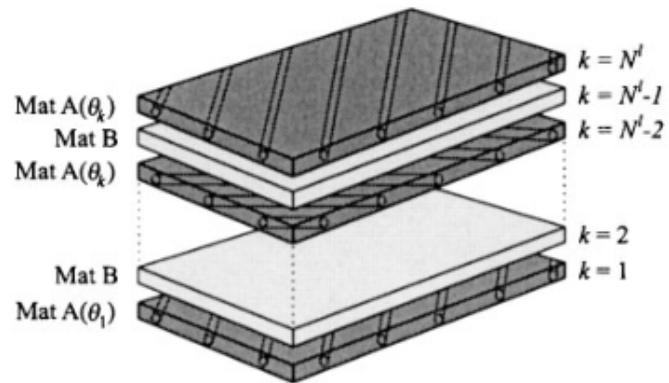


Figura 1.11. Esquema de optimización para material compuesto multilaminado fibroreforzado [51].

## JUSTIFICACIÓN

Debido a que los vehículos eléctricos tienen una capacidad de almacenamiento limitada al banco de baterías que poseen, es necesario aprovechar la energía disponible almacenada para su desplazamiento y reducir el consumo de energía, considerando factores de demanda de potencia como es el peso y la resistencia aerodinámica. Al crear un diseño con un bajo coeficiente de arrastre se puede reducir significativamente la fuerza asociada a este término, donde al usar un material compuesto innovador tipo sándwich en la carrocería se reduciría el peso del mismo, aumentando la rigidez de éste, en comparación a láminas metálicas delgadas (aunque de mayor densidad) que soporten las mismas fuerzas. El material propuesto también puede mejorar el aislamiento térmico en el vehículo. Por lo que, con esta propuesta se obtiene un menor consumo de energía para moverlo. Adicionalmente, el nuevo material compuesto tipo sándwich posee un núcleo de material reciclado (lo que representa más de un 70% del material) representando un sustento medioambiental, al reducir residuos sólidos urbanos al reincorporarlos al mercado con un nuevo valor agregado.

## HIPÓTESIS

El diseño aerodinámico y la optimización en el grosor del material compuesto de la carrocería de un vehículo fotovoltaico híbrido, puede aumentar su eficiencia energética, al reducir las fuerzas de arrastre y peso.

## OBJETIVOS

### **Objetivo general**

Mejorar el rendimiento de un vehículo fotovoltaico híbrido incorporándole una innovadora carrocería aerodinámica, con un material laminado de núcleo reciclado con adecuadas propiedades mecánicas de resistencia a tensión, flexión y más liviano que el aluminio.

### **Objetivos específicos**

- Diseñar una carrocería aerodinámica para un vehículo fotovoltaico híbrido utilizando CFD (Computational Fluid Dynamic), software para el análisis dinámico de fluidos.
- Optimizar un material compuesto de estructura laminar con núcleo reciclado y caras de aluminio para reducir el peso en la carrocería de un vehículo.
- Realizar estudio de resistencia mecánica a tensión longitudinal y flexión, conductividad térmica y conductividad eléctrica transversal para la caracterización del material compuesto.
- Diseñar un método de fijación interlaminar por traslape para generar paneles continuos de mayor tamaño.
- Evaluar el diseño final simulando diferentes materiales para la carrocería.



## CAPITULO 2

### METODOLOGÍA

#### 2.1 Descripción general del Vehículo Fotovoltaico Híbrido

El vehículo fotovoltaico híbrido (VFH) aquí estudiado, surge de un vehículo eléctrico de golf comercial, que se modificó para adaptarlo a las condiciones de todo terreno e incorporando un diseño que permita la adaptación de paneles solares. La descripción de las partes del vehículo se expone en la Tabla 2. 1.

**Tabla 2. 1. Característica del Vehículo Fotovoltaico Híbrido.**

<b>Características VFH</b>		
<b>Esqueleto</b>	Tubular aluminio	25 mm Øext. x 19 mm Øint.
<b>Dimensiones</b>	Ancho	1.64 m
	Alto	1.4 m
	Largo	3.67 m
	Masa Aproximada	300 kg
	Área Frontal	1.84 m <sup>2</sup>
	Superficie para paneles fotovoltaicas	5 m <sup>2</sup>
	Superficie para Carrocería	5.41 m <sup>2</sup>
	Coeficiente de fricción aerodinámico	0.38
<b>Llanta</b>	Diámetro y Ancho	0.58 cm x 0.26 m
	Masa Aproximada	12 kg
<b>Velocidad máxima teórica</b>		7.4 m/s (26.64 km/h)
<b>Transmisión</b>	Engranaje helicoidal doble	12.3:1 ( $\eta=0.96$ )
<b>Características eléctricas</b>		
<b>Motor</b>	Voltaje	48 V CD
	Potencia	2.4 KW (3.3 Hp)
	Velocidad de giro	3000 RPM
<b>Controlador CD Curtis</b>		48 V a 250 A CD
<b>Monitor de estado de carga y consumo de corriente</b>		V, %, A
<b>Baterías ion-litio</b>		48 V CD, 60 Ah
<b>Paneles fotovoltaicos (3)</b>	Monocristalino	300 W a 1000W/m <sup>2</sup> y 25 °C

Mediante esta descripción amplia del vehículo y su aspecto mostrado en la Figura 2.1, se realizaron los cálculos correspondientes a la mecánica y se obtuvo la demanda energética.



Figura 2.1. Vehículo Fotovoltaico Híbrido en sus condiciones originales.

## 2.2 Estudio mecánico del Vehículo Fotovoltaico Híbrido

En esta sección se utilizan las leyes de Newton para calcular las fuerzas involucradas en el desplazamiento del vehículo y a partir de la ecuación (2.1) se relaciona la fuerza con la potencia mecánica demandada [52] (como se definió en el Capítulo 1, la potencia es el término relacionado a la eficiencia energética de los vehículos). Además, con esta relación se despeja la velocidad máxima del VFH al conocer la potencia disponible y la fuerza del sistema.

$$P_m = F \cdot v \quad (1.1)$$

$P_m$ : Potencia mecánica (W)

$F$ : Fuerza (N)

$v$ : Velocidad (m/s)

Para determinar la velocidad máxima teórica del VFH se considera la velocidad angular máxima del motor en su régimen de potencia nominal, la relación de la transmisión (caja reductora de engranes helicoidales) del motor a las ruedas motrices y el radio de la llanta como se describe en las ecuaciones 2.2 y 2.3 [52].

$$\omega_r = G \cdot \omega_m \quad (2.2)$$

$$v = \omega_r \cdot R \quad (2.3)$$

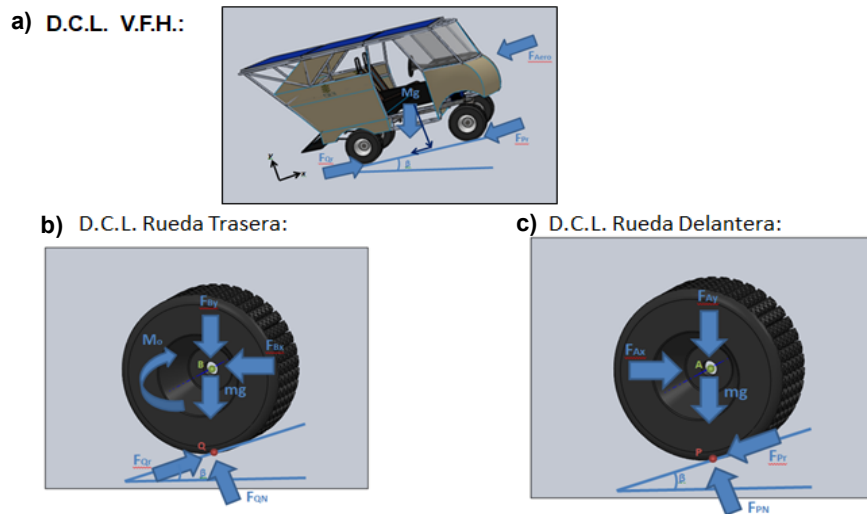
$\omega_r$ : Velocidad angular de la rueda (rad/s)

$\omega_m$ : Velocidad angular del motor (rad/s)

$G$ : Reducción de la transmisión (-)

$R$ : Radio de la llanta (m)

En este sentido, tiene importancia conocer las resistencias que intervienen en el movimiento de los vehículos, como son la resistencia a la rodadura, resistencia aerodinámica y resistencia del peso por una pendiente. Por ello se realizó un estudio de fuerzas mediante diagramas de cuerpo libre (DCL) en el que se despiece el cuerpo del vehículo y sus llantas para entender a profundidad las reacciones correspondientes a su desplazamiento y fuerzas resultantes como se observa en la Figura 2.2.



**Figura 2.2. Diagrama de Cuerpo Libre: a) Vehículo Fotovoltaico Híbrido, b) Rueda trasera y c) Rueda delantera.**

Utilizando las ecuaciones fundamentales de la dinámica, específicamente las de movimiento tenemos las siguientes ecuaciones (2.4) y (2.5). A partir de los DCL se obtiene, con la simplificación de la simetría entre las ruedas análogas la distribución de peso en solo dos casos, las llantas delanteras y traseras. Es decir, se aprovecha la simetría que existe en el plano XY del sistema de coordenadas en el centro del vehículo [52]:

$$\sum F = m \cdot a \quad (2.4)$$

$m$ : Masa (kg)

$a$ : Aceleración ( $m/s^2$ )

$$\sum M = I \cdot \alpha \quad (2.5)$$

$M$ : Momento (N·m)

$I$ : Momento de inercia (kg·m<sup>2</sup>)

$\alpha$ : Aceleración angular (rad/s<sup>2</sup>)

Las sumatorias de fuerzas se asocian a los ejes de coordenadas relativo que a su vez se vinculan con la inclinación del plano, esto se realiza para simplificar los cálculos tomando el eje x como dirección de avance y el eje y relacionada con las fuerzas perpendiculares al plano inclinado con un ángulo  $\beta$ .

### 2.2.1 Llanta delantera

La llanta delantera es una llanta que se conoce como “libre” ya que no se ejerce el torque motriz para el desplazamiento y su rotación se realiza por el impulso de la carrocería hacia su centro, a través de los baleros. El centro de la llanta se identifica con el punto  $A$  y el punto  $P$  es el contacto con el suelo; las fuerzas  $F_{Ax}$  y  $F_{Ay}$  se relacionan con las reacciones que aparecen entre el cuerpo del vehículo y el eje de las llantas, como se muestra en la Figura 2.2 (c); y las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$\sum F_x = F_{Ax} - F_{Pr} - m \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) = m \cdot a \quad (2.6)$$

$$\sum F_y = F_{PN} - F_{Ay} - m \cdot g \cdot \text{cos}(\beta) = m \cdot a = 0 \quad (2.7)$$

$$\sum M_A = R \times -F_{Pr} = I \cdot \alpha = I \cdot \frac{a}{R} \quad (2.8)$$

$g$ : Gravedad (m/s<sup>2</sup>)

$R$ : Radio de la llanta (m)

### 2.2.2 Llanta trasera

La llanta trasera es la llanta motriz porque está asociada al motor a través de la transmisión, en esta llanta se establecen factores como máxima aceleración para evitar deslizamiento y fuerza de tracción. El centro de la llanta se identifica con el punto  $B$  y el punto  $Q$  es el contacto con el suelo; las fuerzas  $F_{Bx}$  y  $F_{By}$  se relacionan con las reacciones que aparecen entre el cuerpo del vehículo y el eje de las llantas, como se muestra en la Figura 2.2 (b); y las ecuaciones resultantes son las siguientes:

$$\sum F_x = F_{Qr} - F_{Bx} - m \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) = m \cdot a \quad (2.9)$$

$$\sum F_y = F_{QN} - F_{By} - m \cdot g \cdot \cos(\beta) = m \cdot a = 0 \quad (2.10)$$

$$\sum M_B = -M_o + R \times F_{Qr} = I \cdot \alpha = I \cdot \frac{a}{R} \quad (2.11)$$

### 2.2.3 Cuerpo del vehículo

En el cuerpo del vehículo es donde se concentra la mayor cantidad de masa porque se considera en esta sección la masa de la estructura, baterías, motor, paneles, componentes, etc. En este DCL aparece la fuerza de la resistencia aerodinámica, ya que es la sección que ejerce mayor desplazamiento de volumen de aire. Las reacciones  $F_{Bx}$ ,  $F_{By}$ ,  $F_{Ax}$  y  $F_{Ay}$  son las ejercidas por las ruedas hacia el cuerpo del vehículo:

$$\sum F_x = F_{Bx} - F_{Ax} - m \cdot g \cdot \sin(\beta) - F_{aero} = m \cdot a \quad (2.12)$$

$$\sum F_y = F_{By} + F_{Ay} - m \cdot g \cdot \cos(\beta) = m \cdot a = 0 \quad (2.13)$$

Para esta sección no se realiza una sumatoria de momento ya que es claro que el vehículo no rota o no se considera una aceleración angular, por lo que no proporcionaría información relevante.

### 2.2.4 Fuerza aerodinámica

La fuerza aerodinámica  $F_{aero}$ , depende de varios factores que involucran el diseño del vehículo y la velocidad, como se desglosa a continuación [53]:

$$F_{aero} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot S \cdot C_d \cdot v^2 \quad (2.14)$$

$S$ : Área frontal del vehículo (m<sup>2</sup>)

$C_d$ : Coeficiente de resistencia aerodinámica (-)

$\rho$ : Densidad del aire (kg/m<sup>3</sup>)

### 2.2.5 Fuerza de roce

La fuerza de roce (ecuación 2.15) es el término que determina la rotación de las ruedas sin deslizamiento, para el caso de la llanta delantera es la fuerza que permite su rotación al ser impulsada por el cuerpo del vehículo. Esta fuerza en la llanta delantera se hará notar cuando haya un cambio de velocidad, es decir, cuando ocurra una aceleración se representará como una fuerza que se oponga al cambio en una proporción relacionada a la inercia de la llanta.

Para la llanta trasera representa el factor de máxima aceleración para la fuerza de tracción del vehículo, pero a diferencia del caso anterior el sentido en el que este actúa es el sentido positivo del eje de coordenadas X, ya que representa la reacción de la fuerza ejercida por la rotación de la llanta impulsada por el motor.

$$F_r \leq F_N \cdot \mu_s \quad (2.15)$$

$F_r$ : Fuerza de roce (N)

$F_N$ : Fuerza Normal al suelo (N)

$\mu_s$ : Coeficiente de roce estático (-)

### 2.2.6 Resistencia a la rodadura

La resistencia a la rodadura es un factor relacionado a la deformación real que sufren las llantas debido al peso y el comportamiento elástico del material del que están formadas. Explicándose de otro modo, a escala microscópica una rueda no presenta un alzado exactamente circular, y la superficie sobre la que rueda no constituye tampoco un perfil plano, puesto que en ambos casos existen irregularidades ocurre este efecto como se muestra en la Figura 2.3. El concepto es similar a la fuerza de roce y su coeficiente, sin embargo, se define en función a la división entre la longitud de deformación de la llanta y su radio, esta relación es el coeficiente de rodadura (ecuación 2.16), y este mismo es multiplicado por la fuerza normal como se muestra en la ecuación 2.17 [54]. La fuerza de tracción ( $F_t$ ) debe ser mayor a la resistencia a la rodadura para que el vehículo pueda desplazarse.

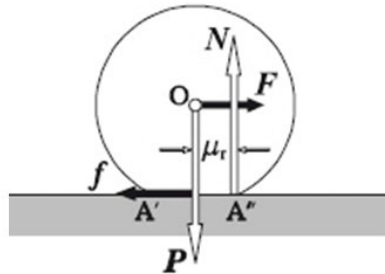


Figura 2.3. Resistencia a la rodadura [54].

$$C_{rr} = \frac{\mu_r}{R} \quad (2.16)$$

$$F_t \geq F_{rr} = C_{rr} \cdot F_N \quad (2.17)$$

$C_{rr}$ : Coeficiente de rodadura

$F_{rr}$ : Fuerza de rodadura (N)

No obstante, este no es el principal factor que influye en el coeficiente, sino la histéresis. La rueda, en función del material con el que esté construida y su propio peso, además del de la carga que soporta, sufre una deformación que al rotar provoca repetidos ciclos de deformación y recuperación, estos ciclos propician la disipación de energía por calor. Además, esta deformación supone que no apoye una línea únicamente sobre el piso, sino una superficie. El fin del coeficiente de rodadura es establecer un parámetro empírico, sobre el conjunto completo, que proporcione la fuerza que se ha de ejercer bien para poner en movimiento el sistema (coeficiente de rodadura estático), o bien para mantener su velocidad (coeficiente de rodadura dinámico). Este último también depende de la velocidad.

El valor del coeficiente de rodadura es característico de cada sistema, dependiente de:

- La rigidez o dureza de la rueda y superficie.
- El radio de la rueda (a mayor radio menor resistencia).
- El peso o carga al que se somete cada rueda (en esto se diferencia del coeficiente de rozamiento).
- En el caso de ruedas neumáticas o hidráulicas, de su presión (a mayor presión menor resistencia).
- Temperatura, el acabado de las superficies en contacto, velocidad relativa, etc.

Generalmente la fuerza asociada al coeficiente de rodadura es mucho menor que las fuerzas asociadas al coeficiente de roce estático o cinético. Para lograr que una rueda gire se tiene que aplicar una fuerza de tracción mayor a este factor, como se expresa anteriormente.

Por lo que si se quiere acelerar una rueda sin que ocurra deslizamiento la fuerza aplicada se vería restringida por la resistencia a la rodadura y la fuerza de roce, como se muestra en la ecuación 2.18:

$$C_{rr} \cdot F_N \leq F_t \leq F_N \cdot \mu_s \quad (2.18)$$

Como se observa, esta fuerza es similar para todas las llantas del vehículo, considerando que la deformación en todas es parecida, por lo que se puede representar como una

fuerza única en todo el vehículo con un  $C_{rr}$  y la reacción del peso perpendicular al suelo.

Además, la ecuación 2.18 muestra el intervalo de fuerzas necesarias para el desplazamiento del VFH. Por un lado se tiene la fuerza mínima necesaria para iniciar el movimiento y vencer la resistencia a la rodadura ( $C_{rr} \cdot F_N$ ) y por otro lado se tiene la fuerza de roce máxima ( $F_N \cdot \mu_s$ ) para evitar en deslizamiento de las ruedas motrices. De esta forma se obtuvo la fuerza de tracción, sin embargo, al ir aumentando la velocidad de desplazamiento la potencia del motor debe ceder fuerza para aumentar la velocidad (relación que se observa en la ecuación 2.1).

### 2.2.7 Sumatoria de fuerzas del conjunto

Todos los factores expresados anteriormente se pueden relacionar y sumar para el DCL de la Figura 2. 2 (a), que consiste en la sumatoria de fuerza global del vehículo, dando como resultado la ecuación 2.19:

$$\sum F_x : F_t - F_{aero} - F_{rr} - F_{Pr} - m_{Total} \cdot g \cdot \text{sen}(\beta) = m_{Total} \cdot a \quad (2.19)$$

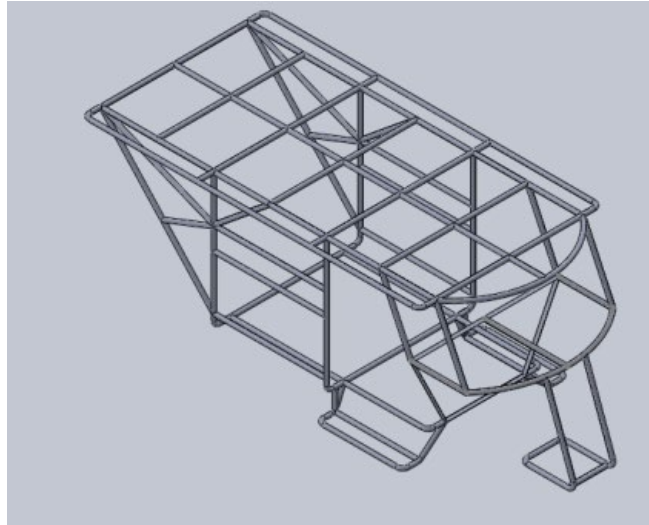
Dónde:  $m_{Total} \cdot g$  es el factor del peso y se representa con W y su unidad es el Newton.

Mediante esta ecuación se pueden asociar todas las fuerzas que debe superar el vehículo para su desplazamiento y el aporte de la masa y el diseño aerodinámico para reducir el consumo de energía, relacionando estas fuerzas a la potencia por la ecuación 2.1.

### 2.3 Diseño de la estructura y propuestas de diseño del Vehículo Fotovoltaico Híbrido

Se realizó un diseño asistido por computadora CAD (Computer aided design) del esqueleto del VFH, actualizando y replicando la estructura real, ya que el CAD que se tenía previo es este trabajo era una referencia para la construcción de la estructura y difiere del esqueleto del VFH, por lo que el diseño actual (en SOLIDWORKS) se muestra en la Figura 2.4.





**Figura 2.4. Diseño de la nueva estructura del vehículo fotovoltaico híbrido.**

A partir de este diseño se dimensionaron las demás propuestas de carrocería, considerando los beneficios de las figuras previamente simuladas. De esta manera se generaron las siguientes propuestas que fueron desarrollados en el proyecto:

- Diseño preliminar (Figura 2.5 (a)) el cual fue concebido en el trabajo previo sobre el VFH, dándole en la parte frontal una curva hacia adelante, simulando la forma de un capirote de un carro comercial.
- El diseño 1 (Figura 2.5 (b)) se inspira en el diseño de los autobuses. Donde la parte frontal es muy vertical y la desviación del aire al avanzar los autobuses es hacia los laterales y parte superior. Por este motivo la curvatura frontal del diseño 1 favorece la desviación hacia los laterales y genera una continuidad con el parabrisas, que a su vez tiene una pendiente que favorece la desviación del aire hacia la parte superior, sin redirigir el aire hacia alguna parte del mismo vehículo como ocurre en el diseño preliminar [11, 12, 55, 56, 57].
- Con el diseño 2 (Figura 2.5 (c)) se pretende reducir el efecto de succión en la parte posterior del VFH, dando una inclinación a la última sección del techo para asemejarse a una gota de agua, evitando una succión en la parte trasera del vehículo.
- El diseño 3 (Figura 2.5 (d)) se amplía el área frontal para eliminar el efecto de ancla generado por las aletas formadas en el diseño 2, cuando se inclina la última sección del techo del VFH, con el fin de eliminar la turbulencia generada por esa

sección antes sobresaliente. La ampliación de la sección transversal también considera al parabrisas.

- El diseño 4 (Figura 2.5 (e)) es similar al diseño 1 pero se completa la sección final del VFH con el propósito de reducir el espacio muerto que poseen los demás diseños en la parte trasera y se busca reducir el efecto de la turbulencia en el espacio vacío en la parte posterior.

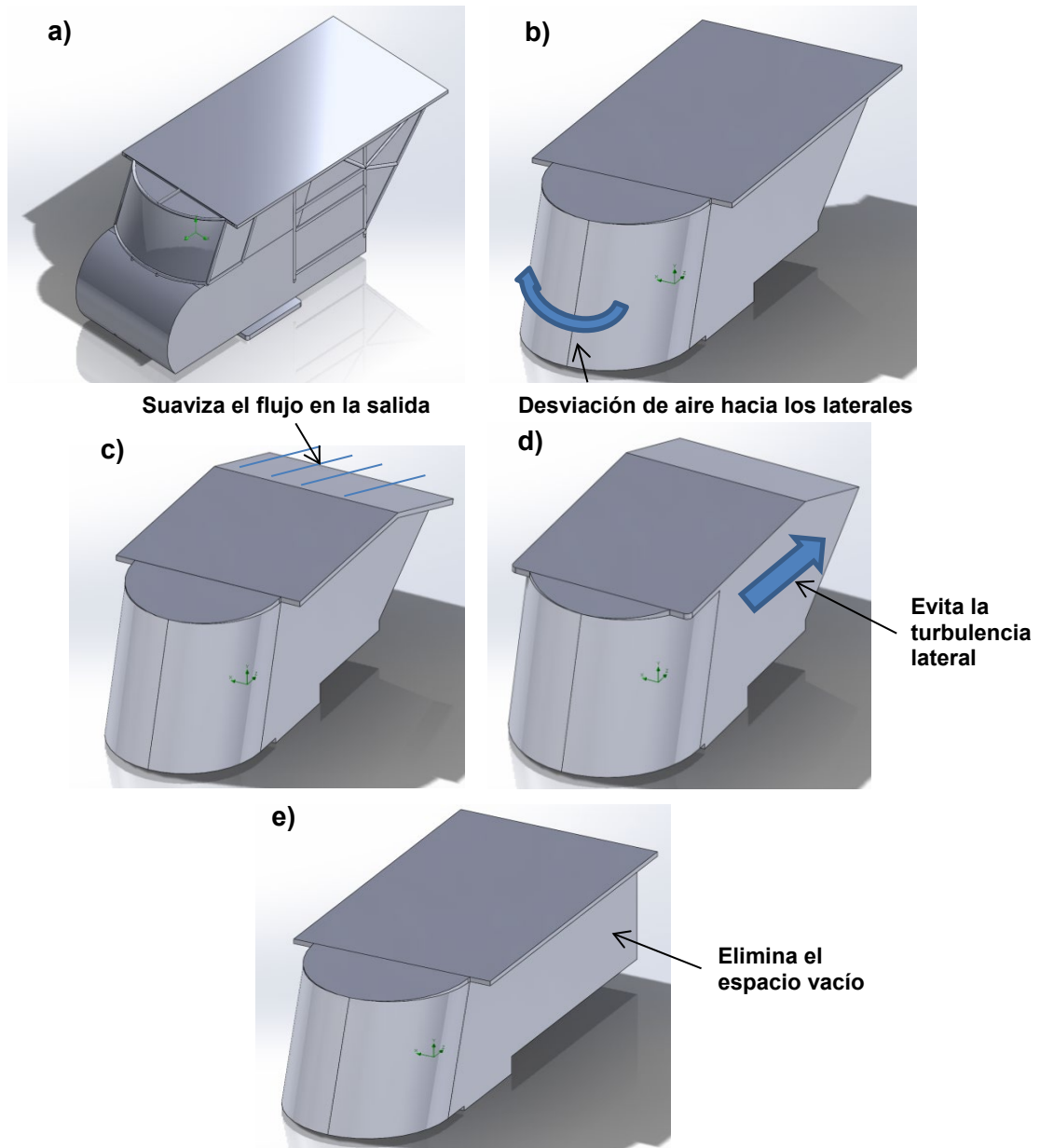


Figura 2.5. Diseños de carrocería: a) Diseño preliminar b) Diseño 1 c) Diseño 2 d) Diseño 3 e) Diseño 4.

Estas propuestas de diseño se realizaron para su evaluación en CFD con la finalidad de seleccionar el diseño que genere la menor fuerza de arrastre aerodinámico, considerando el área transversal del diseño y el coeficiente de arrastre que genere por su geometría. Entre los factores que se consideraron para los diseños fue disminuir la cantidad de carrocería utilizada para reducir el peso que este pueda significar. En función de las ecuaciones mostradas en la sección de análisis de fuerzas, se puede notar que los factores más influyentes para el rendimiento del VFH fueron: el peso, que se ve reflejado en dos términos (componente de la fuerza en planos inclinados y la fuerza generada por la rodadura) y la aerodinámica para el caso de altas velocidades.

#### **2.4 Simulación CFD de diseños propuestos**

Para llevar a cabo las simulaciones se evaluaron figuras geométricas básicas para establecer ciertos parámetros al diseñar y justificar el comportamiento obtenido en cada uno de los resultados al igual que compararlo con la literatura sobre simulaciones en CFD. Las figuras geométricas simuladas son esfera, cubo, prisma triangular con pendiente de entrada y triángulo con pendiente de salida (Figura 2.6) [11].

Las velocidades utilizadas para la simulación de las figuras geométricas básicas y los diseños propuestos para el VFH, se establecieron por el parámetro de velocidad máxima que puede alcanzar el vehículo. Se realizó un barrido de velocidades iniciando con la mitad de la velocidad máxima (3.7 m/s), luego la velocidad máxima del VFH (7.4 m/s), posterior el caso de una velocidad relativa entre el vehículo y el viento en contra (11.1 m/s), y posterior a eso se realizó una escalada de velocidades hasta alcanzar un aproximado de 100 km/h, con el fin de explorar el comportamiento de los diseños y que puedan ser extrapolados a casos comerciales en los que sea común alcanzar estos rangos de velocidades.

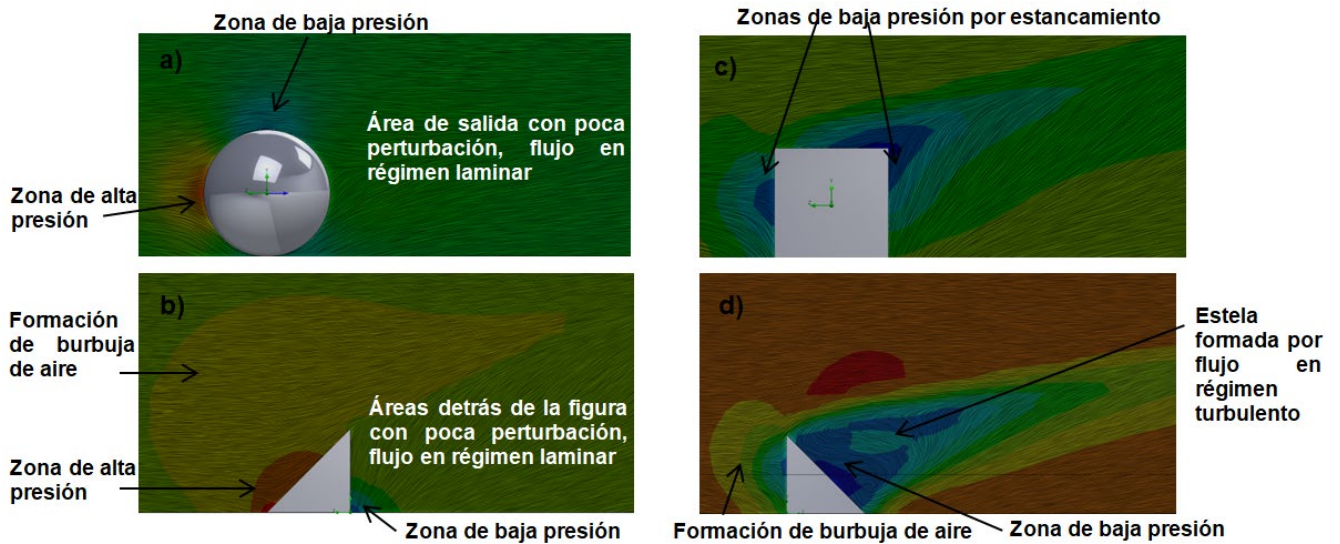


Figura 2.6. Simulación de figuras geométricas básicas con velocidad de viento de 7.4 m/s a) esfera; b) cubo; c) triangulo con pendiente de salida; d) triangulo con pendiente de entrada.

Para obtener resultados comparables el dominio de simulación se realizó en función al tamaño del vehículo. Con una proporcionalidad del dominio de estudio, de dos longitudes del vehículo hacia el frente, esta misma distancia se considera para sus laterales y la distancia superior, y para la parte posterior se utiliza una proporción de 5 longitudes del vehículo, como se muestra en la Figura 2.7. Estas distancias son las mínimas sugeridas para simular automóviles [56]. Este dominio se utilizó para todas las simulaciones, incluyendo las figuras geométricas que se dimensionaron en función del área transversal que ocupa el VFH, de esta forma se estandariza el factor S de la ecuación 2.14 y se puede comparar los resultados en todas las simulaciones.

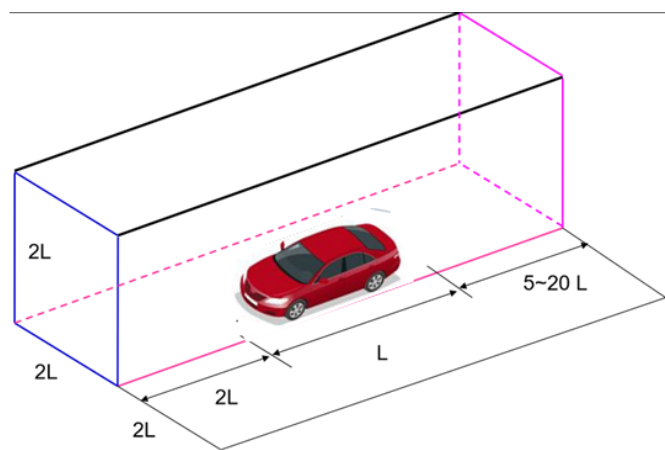


Figura 2.7. Dominio para la simulación de vehículos [57].

Para la simulación se utilizó un mallado rectangular adaptativo, que lo genera automáticamente la herramienta CFD *current* SOLIDWORKS® Flow Simulation. El software es capaz de ajustar el tamaño de la celda del mallado de forma automática, ofreciendo una mejor resolución al hacer más pequeñas las celdas en las áreas críticas (las áreas cercanas al objeto), para ahorrar tiempo de cálculo [58].

La fuerza ejercida sobre el cuerpo y el coeficiente de arrastre son los factores que se consideraron en las simulaciones de los diseños propuestos. De igual forma se observan las líneas de velocidad para comprender como se mueve el fluido a través del cuerpo (Figura 2.8) y un mapa de presión sobre el diseño (Figura 2.9).

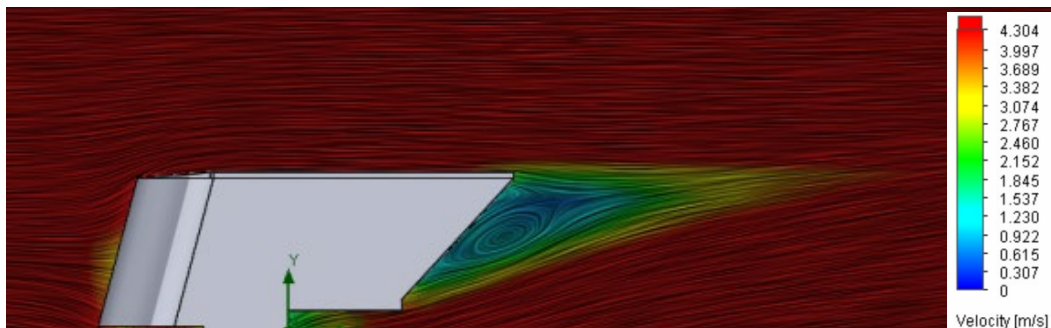


Figura 2.8. Perfil de velocidad de simulación del diseño 1.

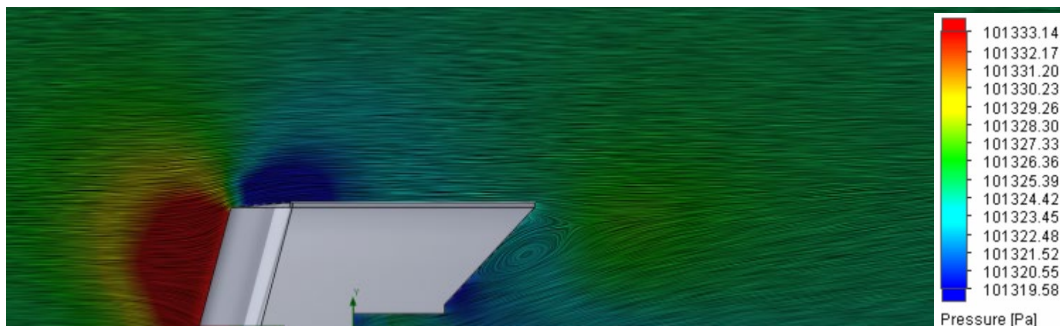


Figura 2.9. Perfil de presión de simulación del diseño 1.

## 2.5 Optimización del grosor del núcleo del material compuesto tipo sándwich

Para el cálculo del grosor del núcleo del material compuesto multilaminado, se utiliza un proceso de optimización mediante la herramienta computacional *fmincon* del software MatLab®, en el que se consideran dos parámetros estudiados y conocidos previamente de cada uno de los elementos que conforma el material compuesto y también las propiedades del multilaminado. Con la finalidad de conseguir la mejor

estructura sándwich para la carrocería del VFH con buenas propiedades mecánicas, eléctrica, térmica y baja densidad.

Los valores que se utilizan para delimitar el grosor máximo y mínimo del aglomerado, son de 10 mm y 2 mm respectivamente. El grosor máximo se determina al suponer la cantidad máxima de material molido que se puede colocar en el molde antes del prensado. Por otra parte, el grosor mínimo se determina por el alcanzado experimentalmente a la hora de realizar los prensados, ya que, utilizar menos material para reducir el grosor compromete la uniformidad del aglomerado.

Las propiedades utilizadas para escribir la función objetivo (es la función que considera todas las variable para el proceso de optimización), son el punto de cedencia, como propiedad mecánica, y la conductividad térmica. Para ambos parámetros se utilizan los datos del aluminio, del aglomerado (núcleo) y de la estructura tipo sándwich con dos grosores de núcleo distintos (3.6 mm y 2 mm). Como base matemática se utiliza la regla de las mezclas para materiales compuestos, con el que se puede estimar el esfuerzo de cedencia ( $\sigma$ ) de la estructura tipo sándwich utilizando las fracciones volumétricas y sus esfuerzos correspondientes de los materiales del compuesto, ecuación 2.20. Para el comportamiento térmico se aplica una simplificación con el método de la resistencia, que se utiliza para estimar la conductividad térmica ( $k$ ) dependiendo del grosor y las propiedades de cada material, ecuación 2.21.

$$\sigma = \frac{g_1}{g_1+g_2} \cdot \sigma_{ag} + \frac{g_2}{g_1+g_2} \cdot \sigma_{al} \quad (2.20)$$

$g_1$ : Grosor variable del aglomerado (mm)

$g_2$ : Grosor fijo del aluminio 0.6 mm

$\sigma_{ag} = 10.56 \text{ MPa}$  Esfuerzo de cedencia del aglomerado

$\sigma_{al} = 118.67 \text{ MPa}$  Esfuerzo de cedencia del aluminio

$$k = \frac{\frac{g_1+g_2}{g_1} + \frac{g_2}{g_1}}{\frac{1}{k_{ag}} + \frac{1}{k_{al}}} \quad (2.21)$$

$k_{ag} = 0.26 \text{ W/m.K}$  Conductividad térmica del aglomerado

$k_{al} = 209.3 \text{ W/m.K}$  Conductividad térmica del aluminio

Se normaliza la función objetivo, al evaluar cada uno de los parámetros por separado, esfuerzo de cedencia y conductividad térmica ( $\sigma$  y  $K$ ), generando un frente de Pareto. Luego el valor de grosor obtenido en esos máximos y mínimos se emplean en el parámetro contrario para colocarlos como denominador en la función objetivo y normalizarla. También se considera un factor de peso ( $\mu$ ) para darle mayor importancia al parámetro de interés, la suma de ambos factores debe ser igual a 1.

Por lo que la función objetivo ( $J$ ) se escribe:

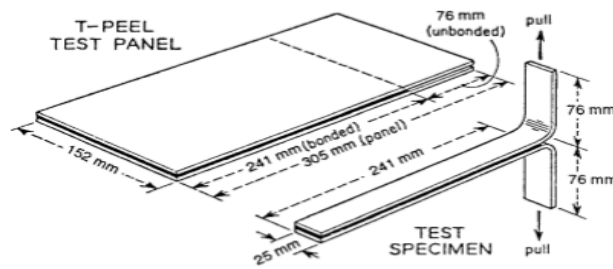
$$J = -\frac{\mu_1 \cdot \sigma^2}{\sigma_{max}} + \frac{\mu_2 \cdot k^2}{k_{max}} \quad (2.22)$$

La primera fracción de la función objetivo es negativa ya que es un término que se quiere maximizar y al utilizar un proceso para hallar mínimos como es el *fmincon*, se traduce como “el mínimo de un negativo es el máximo requerido”. Para la conductividad térmica sí se requiere hallar el valor mínimo, por lo que la fracción se mantiene como un término positivo.

En el Anexo A se encuentran los códigos para encontrar  $\sigma_{max}$  y  $k_{max}$ , al igual que el código de optimización que desarrolla la función objetivo para determinar el mejor grosor del núcleo del material.

## 2.6 Adhesión y desarrollo de técnica de unión entre paneles

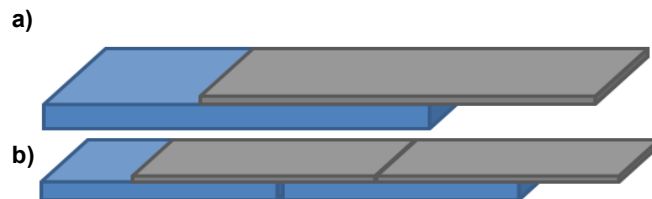
En esta sección se evaluó tres tipos de adhesivos propuestos para la conformación de la estructura sándwich: polietileno modificado (polietileno adhesivo producido en el CICY), Polybond (polietileno adhesivo comercial) y Collano (polipropileno adhesivo comercial). Se implementó la norma ASTM D 1876 – 00 [59], que indica las condiciones y formas de realizar las pruebas de adhesión. En la Figura 2.10 se muestra los detalles de las dimensiones de las probetas. Esta prueba es muy similar a una prueba de tensión, pero las probetas están sujetas por las caras del material compuesto para medir la fuerza que existe en la unión de las caras con el núcleo, a una velocidad de prueba de 254 mm/min.



**Figura 2.10. Dimensionamiento de las probetas para la prueba de adhesión interlaminar [59].**

Además, en esta sección se considera el estudio de diversas formas de unión interlaminar, con el fin de obtener piezas de gran tamaño continuas y sin la implementación de remaches, tornillos o soldadura. De esta forma se plantean las opciones a realizar:

- Traslape simple con el desfase de la cara de aluminio con respecto al núcleo (Figura 2.11), permitiendo la conexión con otra lamina en la que presente un espacio libre por el mismo desfase generado entre el núcleo y el aluminio (esta propuesta se presenta para la opción de un material resultante de una sola cara de aluminio) [60].



**Figura 2.11. Traslape simple a) una pieza (un núcleo y una cara de aluminio), b) unión de dos piezas.**

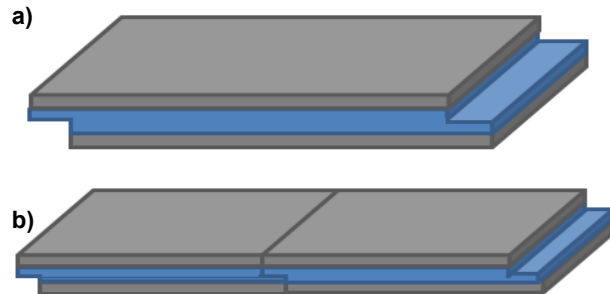
- Traslape doble desfasando las dos caras de aluminio con respecto al núcleo (Figura 2.12), dejando un espacio en el que otra lámina pueda encajar y ser unidas [60].



**Figura 2.12. Traslape doble a) una pieza (un núcleo y dos caras de aluminio desfasadas), b) unión de dos piezas.**



- Traslape simple con desbaste del material compuesto (Figura 2.13), en este caso se realiza un corte que deje la mitad del espesor del MC y se unen las láminas por termo compresión desde la sección de los núcleos.



**Figura 2.13. Traslape simple con desbaste a) una pieza (un núcleo con los dos extremos opuestos desbastados y dos caras de aluminio ajustadas a cada lado del núcleo) b) unión de dos piezas.**

Las distancias de unión entre láminas, considera como la más resistente un desfase del 50% entre la cara de aluminio y el núcleo. Sin embargo, este desfase puede disminuir por motivos de procesos de fabricación y tener distancias igual de resistentes.

## 2.7 Conformado de la estructura multilaminar

### 2.7.1 Recolección, acondicionamiento y molienda de materia prima para el material compuesto

Para la fabricación del nuevo material multilaminado se necesitó realizar una recolección de envases de Tetra Brik® y envases de polietileno de alta densidad desechados, como se muestra en la Figura 2.14.

Posterior a la recolecta se realizó un acondicionamiento de los envases para su molienda. El acondicionamiento consistió en su limpieza utilizando fibras de limpieza y químico alcalino, con el fin de eliminar cualquier residuo de alimento y evitar la proliferación de microorganismos y evitar el proceso de descomposición que genera malos olores, no deseado en el proceso. Luego del lavado se expuso el material al sol para secarlo y eliminar el exceso de agua absorbida.



(a) Tetra Pak



(a) PEAD

**Figura 2.14. Recolecta de materia prima para la fabricación del aglomerado a) envases multilaminados de alimentos, b) envases de polietileno de alta densidad.**

Como resultado de la molienda de los envases se obtuvo una partícula fina para su mejor distribución en el conformado del aglomerado y evitar desprendimiento en el material compuesto por falta de resistencia al corte por partículas grandes de cartón. La disminución del tamaño de partícula se realizó en un molino Pagani modelo 1520 de 5Hp (Figura 2.15) con una criba con agujeros de 4 mm de diámetro. El material obtenido después de molerlo se muestra en la Figura 2.16.



**Figura 2.15. Molino Pagani empleado para procesar.**



(a) Tetra Pak

(b) PEAD

**Figura 2.16. Molienda de la materia prima con criba de 4 mm nominal a) Tetra Pak, b) polietileno de alta densidad.**

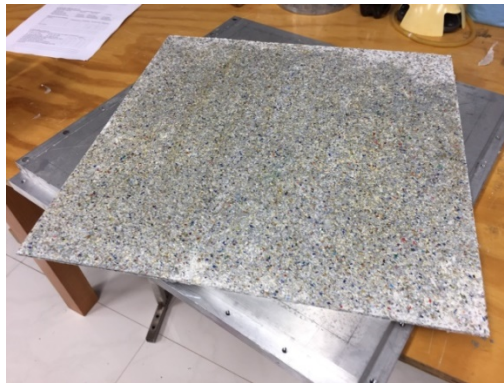
### **2.7.2 Conformación de núcleo de material compuesto por termo-compresión**

Para el conformado del material compuesto de Tetra Brik® se utiliza un proceso de termo-compresión con una prensa CARVER AutoFour/4818-PL, H (Figura 2.17). Paneles de 50 cm x 50 cm fueron elaborados con un grosor de 0.2 cm; la composición del conformado fue de 55% de envases multilaminados y 45% de polietileno de alta densidad (PEAD). Estos porcentajes se tomaron como referencia en el estudio previo realizado y se considera como la mejor composición ya que esta cantidad de polietileno utilizado funciona como matriz del compuesto y permite la conformación uniendo todos los demás componentes aportados por el material reciclado. Bajo esta proporción se requiere 294.25 g de envases molidos y 240.75 g de PEAD, para generar una lámina de 535 g con las dimensiones mencionadas anteriormente, obteniendo como resultado el aglomerado mostrado en Figura 2.18.

En el proceso de conformado se necesita colocar una película de PET en las planchas de la prensa para luego poder retirar el material compuesto; el proceso se lleva a cabo a 150 °C con una presión de 1.13 MPa por 10 minutos, luego se deja enfriar hasta temperatura ambiente en la presa manteniendo la misma presión.



**Figura 2.17. Prensa CARVER para conformar el aglomerado por termocompresión.**



**Figura 2.18. Material aglomerado de 50 cm x 50 cm de TB y PEAD.**

### **2.7.3 Armado de la estructura tipo sándwich**

Luego de obtener el material compuesto, se utilizó como núcleo para la estructura laminar, para las caras externas de la estructura se usó láminas de aluminio 1100H14 y un polietileno modificado como adhesivo (las partes de la estructura se muestran en la Figura 2.19). En la estructura cada uno de los componentes aporta una propiedad deseada, tales como la tenacidad y resistencia a la tracción y compresión del aluminio, la ductilidad y resistencia al corte por el núcleo y resistencia a la flexión por el adhesivo. Para generar esta estructura se utilizó nuevamente la prensa CARVER. Las condiciones de procesamiento fueron: temperatura de 150 °C, aplicación de presión de 0.12 MPa durante 1 minuto y enfriado hasta temperatura ambiente bajo la misma presión. Esta conformación se realiza en un corto periodo de tiempo para que el núcleo no pierda su forma por estar expuesto al calor. Es sumamente importante considerar el pretratamiento de las superficies que se van a adherir, ya que esto afecta directamente en las

propiedades de la estructura final, por lo que se considera importante las condiciones de las superficies, que no tengan partículas de polvo o grasa, por lo que su limpieza es necesaria para que el adhesivo cumpla con su función lo más efectivamente posible [43].

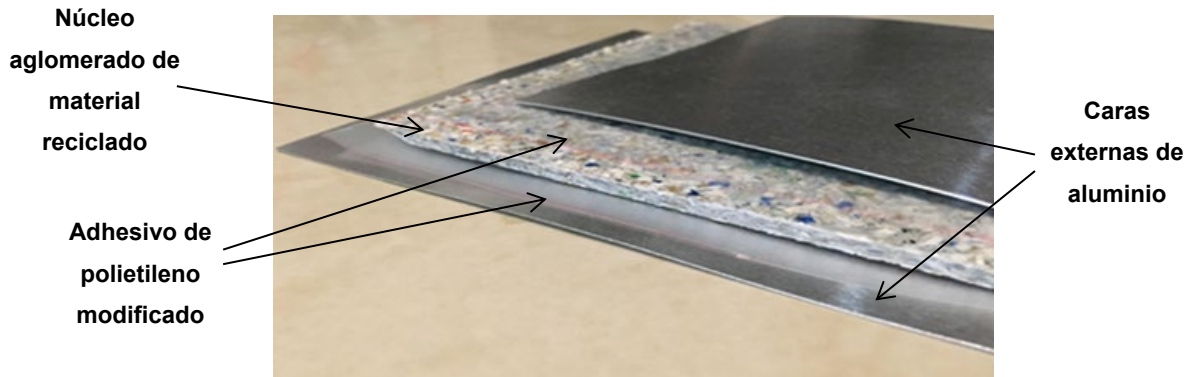


Figura 2.19. Partes de la estructura tipo sándwich.

## 2.8 Rolado de conformados multilaminados

En función de la geometría necesaria para la fabricación de la carrocería aerodinámica, se rolan las láminas para darle la forma deseada, utilizando una roladora mecánica marca JET modelo SBR-30N (Figura 2.20). Con este equipo se pueden rolar láminas de un ancho máximo de 70 cm, limitado por el ancho de los rodillos del equipo. El radio de curvatura del material se ve limitado por las propiedades del material como tal: su módulo elástico, resistencia a la tensión, esfuerzo último de fractura y las interfases del material compuesto; pues, este material tiene la virtud de poder rolar sin precalentamiento alguno (en frío).

El proceso de rolado debe ser progresivo, es decir, la lámina debe presentar pequeñas deformaciones continuas hasta alcanzar el radio de curvatura deseado. El proceso aumentaba aproximadamente el radio de curvatura en 3 mm por pasada hasta alcanzar el radio deseado.





Figura 2.20. Roladora mecánica para dar forma a las láminas.

## 2.9 Caracterización mecánica del material

### 2.9.1 Prueba de tensión del multilaminado

La prueba de tensión es una prueba mecánica cuasiestática que se realiza para obtener una curva esfuerzo-deformación característica de un material, en la que se observe el esfuerzo de cedencia, el esfuerzo último, el esfuerzo de ruptura, el módulo elástico del material y la deformación, como se muestra en la Figura 2.21.

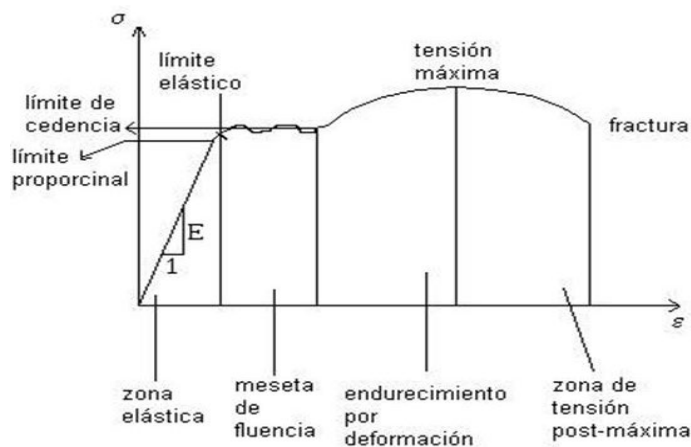
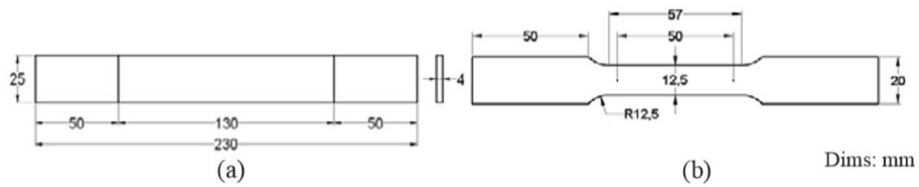


Figura 2.21. Curva característica de una prueba de tensión.

Para esta prueba se utilizaron 7 probetas de la estructura tipo sándwich con forma de huesito (como se muestra en la Figura 2.22(b)), para inducir la falla en la zona válida de prueba, dentro de los 50 mm marcados, al ser una sección de concentración de esfuerzo por la reducción del área transversal. El material tiene un grosor promedio de 0.219 cm, que contiene un 27.4% de aluminio y un 72.6% de aglomerado (porcentajes volumétricos).



**Figura 2.22. Formas de las probetas a tensión: a) Rectangular con tabs b) Huesito [61].**

Las probetas se sujetan en posición vertical en el equipo de pruebas universales SHIMADZU modelo AGX-V, como se muestra en la Figura 2.23. Las pruebas se llevan a cabo a una velocidad del cabezal de 2 mm/min como indica la norma ASTM D3039M-00 [61].



**Figura 2.23. Montaje de probeta a tensión en máquina de pruebas universal.**

De esta prueba se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.23)$$

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_f}{l_i} \quad (2.24)$$

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (2.25)$$

Donde sigma ( $\sigma$ ) representa el esfuerzo que se obtiene al dividir la fuerza ( $F$ ) entre el área transversal de la probeta en la sección media ( $A$ ). Al realizar el cálculo con el área transversal constante, se dice, que es un esfuerzo ingenieril, ya que al irse aplicando la

fuerza el área transversal cambia por la deformación de la pieza y este se denota como esfuerzo real. Por otro lado, la deformación unitaria ( $\mathcal{E}$ ) es la relación entre la deformación total del material entre la longitud original. Por último,  $E$  es el módulo elástico, el cual es la relación entre el esfuerzo ( $\sigma$ ) y la deformación ( $\mathcal{E}$ ) del material en la zona elástica de la curva esfuerzo-deformación.

### 2.9.2 Prueba de flexión en 3 puntos del multilaminado

Es una prueba cuasiestática, en la que una probeta de forma rectangular es sometida a una fuerza, aplicada en su centro mientras se encuentra apoyada en dos puntos próximos a los extremos, como se muestra en la Figura 2.24. Los resultados son similares a las curvas de esfuerzo-deformación de las pruebas de tensión y compresión; sin embargo, el esfuerzo se grafica en función de la deflexión, como indica la norma ASTM C393 – 00 [62]. En esta prueba se puede obtener el módulo de flexión del material, la resistencia a la flexión y la deformación por flexión.

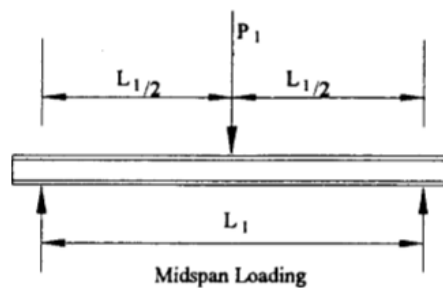


Figura 2.24. Disposición de fuerzas en la prueba de flexión [62].

La ecuación utilizada en esta prueba para el cálculo del módulo a la ruptura (MOR) o resistencia a la flexión es:

$$MOR = \frac{3 F l}{2 w h^2} \quad (2.26)$$

Dónde:

$F$ : Fuerza aplicada (N)

$l$ : Longitud entre los puntos de apoyo (m)

$w$ : Ancho de la probeta (m)

$h$ : Grosor de la probeta (m)



Para esta prueba se utilizaron 7 probetas rectangulares con una longitud total de 25 cm de largo, 4 cm de ancho y 0.236 cm de grosor promedio. Estas probetas se disponen de forma horizontal como se muestra en la Figura 2.25 en la máquina de pruebas universal SHIMADZU modelo AGX-X, con una velocidad de cabezal de 3 mm/min, aplicando la norma ASTM C393-00 [62].



**Figura 2.25. Prueba de flexión en máquina universal.**

## 2.10 Estudio de transferencia de calor transversal del multilaminado

La estructura multilaminada se evaluó en un equipo de transferencia de calor de fabricación casera ( Figura 2.26). Para la prueba se coloca el material de estudio dentro de un espacio aislado térmicamente, se genera un diferencial de calor controlado mediante una resistencia que calienta una de las caras del material y se coloca un instrumento de medición de temperatura para cada lado del material; de esta forma se halla el diferencial de la temperatura entre los lados del material. Al realizar diversas medidas se puede calcular la constante térmica del material, mediante la ecuación 2.27. La finalidad de realizar estas pruebas es demostrar que tan buen aislante térmico es el material. Esto es importante pues está relacionado con el factor de confort que se busca para el habitáculo del VFH.

$$K = \frac{QL}{A \Delta T} \quad (2.27)$$

Q: Flujo de calor (W)

A: Área por el que el flujo de calor es transferido (m<sup>2</sup>)

L: Espesor del material en la dirección en la que fluye el calor (m)

$\Delta T$ : Diferencial de temperatura que presenta el material (K)



**Figura 2.26. Equipo para determinar conductividad térmica de materiales [38].**

Los experimentos se rigen por la norma ASTM C518 [63] que indica los parámetros para un método de prueba de transferencia térmica en estado estacionario a través de muestras planas utilizando un equipo de flujo de calor. Esta norma es ampliamente utilizada ya que abarca un rango de temperatura de 10 °C hasta 40 °C, en muestras de hasta 25 cm.

### 2.11 Estudio de resistividad eléctrica transversal del multilaminado

Para el MC laminado se realizan las pruebas de resistividad eléctrica, ya que al ser un material con componentes metálicos (cara de aluminio y partículas de aluminio en el aglomerado), por la seguridad de los usuarios es necesario comprobar que estarán aislados de cualquier descarga imprevista. La dispersión y distribución de las partículas de aluminio en el aglomerado es el centro de atención del estudio ya que las partículas están distribuidas de forma aleatoria y serían los componentes que permitirían el paso de corriente transversal en el material.

Para realizar el estudio se utiliza la norma ASTM B 193 – 2 [64], con la que se determina la resistividad eléctrica de un material en función de su sección transversal o de su volumen con la ecuación 2.28:

$$\rho_v = \left( \frac{A}{l} \right) \cdot R \quad (2.28)$$

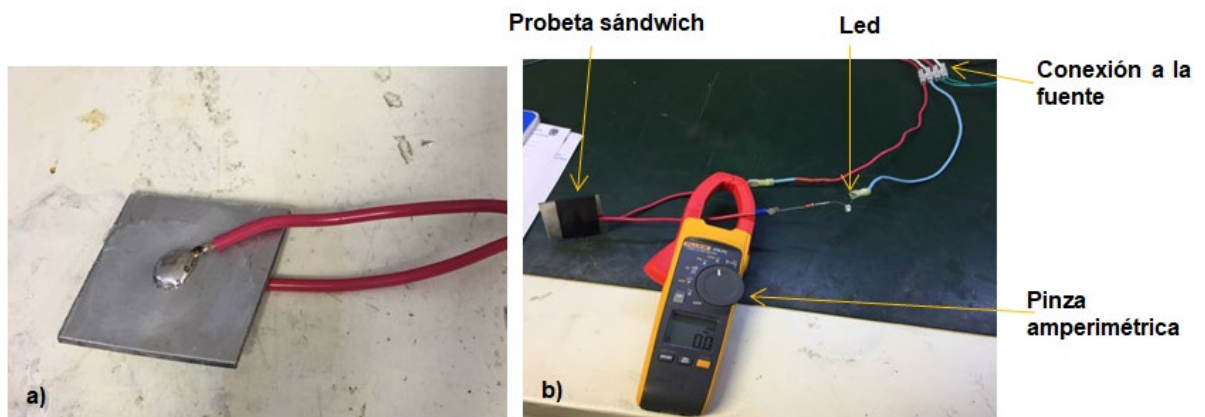
$\rho_v$ : Resistividad volumétrica ( $\Omega \cdot mm/m$ )

$A$ : Área de la sección transversal ( $mm^2$ )

$l$ : Longitud ( $m$ )

$R$ : Resistencia ( $\Omega$ )

Con el fin de determinar el nivel de conductividad eléctrica del arreglo sándwich, se diseñó un experimento en el que: se conecta una fuente de poder que permite variar el voltaje (de corriente continua) y la corriente, a una cara del material compuesto, con unas dimensiones de 5 cm x 5 cm (Figura 2.27(a)), al otro lado de la cara se conecta una resistencia y un led que seguidamente se vuelve a conectar a la fuente para cerrar el circuito, como se muestra en la Figura 2.27(b).



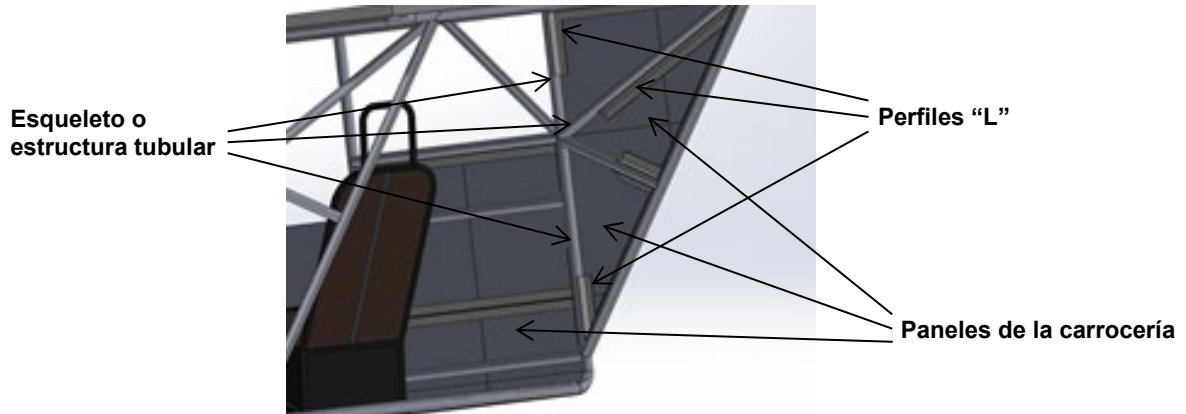
**Figura 2.27. Material compuesto tipo sándwich de 5 cm x 5 cm para prueba de conductividad eléctrica: a) conexión de la probeta; b) circuito de prueba de conductividad eléctrica.**

Se programa la fuente para un paso de corriente de 1 A y de 2 A para los voltajes de 5 V, 10 V, 15 V, 20 V, 25 V y 30 V con la finalidad de observar si ocurría un paso de corriente en la sección transversal del material a diferentes condiciones. No se aumentó más el voltaje de la fuente ya que los circuitos eléctricos que estarán cercanos al material que se desarrolló, no sobrepasarán los 25 V, ya que es el voltaje máximo de operación del VFH.

## 2.12 Instalación de la carrocería y pruebas de rendimiento

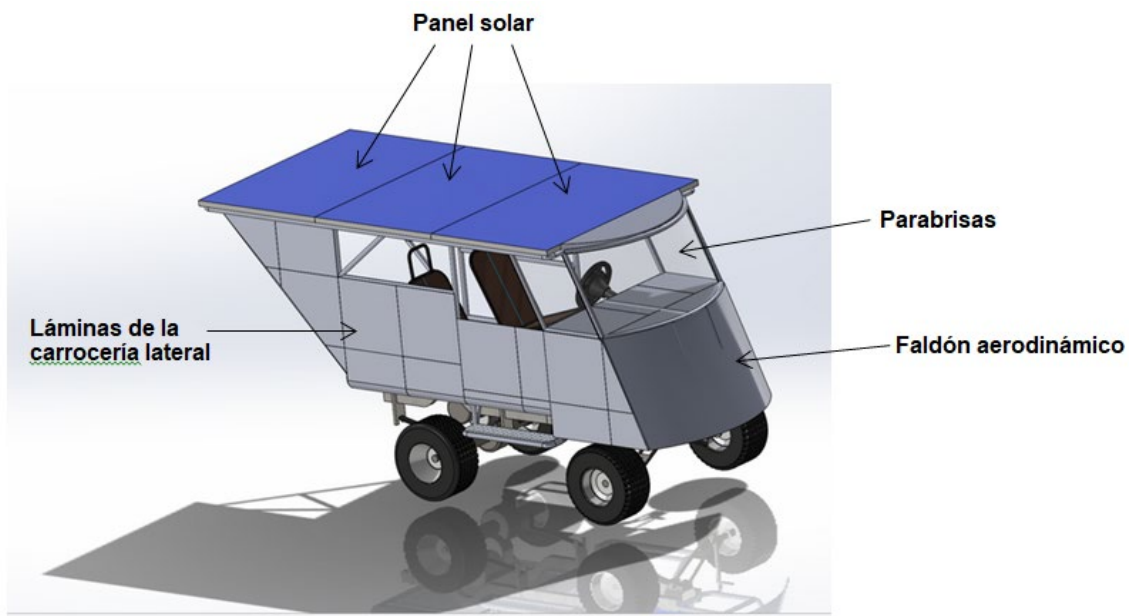
Una vez que se tienen todas las piezas creadas para la carrocería se procede a la fijación de las láminas a la estructura del VFH. Se utiliza perfiles de aluminio en “L”, donde uno de los laterales del perfil va a la estructura tubular del vehículo fijados mediante remaches y el otro lado del perfil de aluminio se fija a la lámina utilizando un adhesivo

epóxico (polímero termoestable) y entre las láminas en las líneas de unión se utiliza un adhesivo elastomero, como se ilustra en la Figura 2.28.



**Figura 2.28. Método de unión de las láminas a la estructura del VFH.**

Se muestra el CAD de la vista previa del diseño final del VFH en la Figura 2.29. Luego se evalúa el rendimiento de forma experimental al medir los tiempos de funcionamiento a carga completa del vehículo sin carrocería y con la nueva carrocería para comparar como influye el diseño realizado. Luego se puede realizar una simulación bajo las mismas condiciones si se hubiese realizado la carrocería con otro material, al añadir el peso que representaría el volumen instalado de carrocería en el vehículo.



**Figura 2.29. Vista previa del VFH con la carrocería final.**

## CAPITULO 3

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 3.1 Análisis mecánico del vehículo fotovoltaico híbrido

Mediante las ecuaciones 2.2 y 2.3, se obtuvo la velocidad máxima teórica de 7.4 m/s del VFH. Este valor permitió realizar un barrido de velocidad para hallar la fuerza de tracción disponible del VFH, esta relación de velocidad y fuerza de tracción se muestra en la Figura 3.1. Se observa una fuerza máxima de 2060 N entregados por el motor, para el desplazamiento inicial sin deslizamiento (la ecuación 2.18 muestra el límite de la fuerza que se puede ejercer), donde se alcanza la máxima aceleración de 3.43 m/s<sup>2</sup>.

Estas condiciones de máxima fuerza disponible y máxima aceleración se mantienen hasta alcanzar una velocidad de 2.25 m/s. Luego de esta velocidad ocurre un decaimiento de fuerza y aceleración, porque la potencia del motor es limitada (de 2.4 KW) y debe sacrificar la fuerza para aumentar la velocidad, este comportamiento es el correspondiente a un motor eléctrico CC cuando se grafica torque vs velocidad. La misma tendencia que sigue la curva de la fuerza es la curva de la aceleración, ya que la masa del vehículo es constante en todo momento. Esto significa que, cuando decae la aceleración el aumento de velocidad ocurre más lentamente.

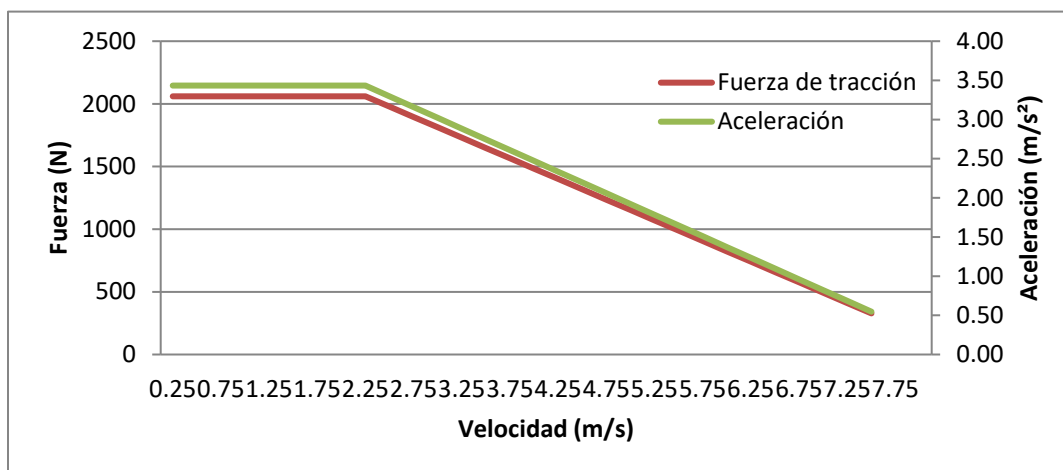


Figura 3.1. Fuerza de tracción de las llantas motrices y aceleración sin deslizamiento en función a la velocidad.

Posteriormente de conocer la fuerza disponible del sistema, se realizó un desglose de la demanda de fuerzas por cada componente que se observan en la ecuación 2.19. De esta forma se realizó un análisis individual del consumo de potencia, sobreponiendo las fuerzas de demanda sobre la disponible, como se mostrará a continuación.

Para la resistencia aerodinámica se utilizó dos coeficientes de arrastre, el primero corresponde al valor deseado para el diseño final de  $C_d = 0.38$  (ya que es similar al valor de los automóviles comerciales con bajo  $C_d$  [11]) y un segundo relacionado con un diseño propuesto en el trabajo previo del VFH ( $C_d = 0.59$ ) [65]. En este caso se representan 3 curvas de velocidades para cada  $C_d$ , la primera representa la velocidad del vehículo en un medio sin viento en contra, el segundo caso se utilizó la velocidad del vehículo más el aporte de la velocidad de viento en contra con un valor de 3.3 m/s (ya que es la máxima velocidad promedio de viento en la península de Yucatán) y por ultimo un caso extremo que aproxime la velocidad absoluta entre el vehículo y el viento a 100 km/h, que equivaldría a un viento en contra de 22.2 m/s (esta extrapolación se realizó con el fin de ver la demanda que puede significar la resistencia aerodinámica a altas velocidades). Con este barrido de datos se obtiene la Figura 3.2.

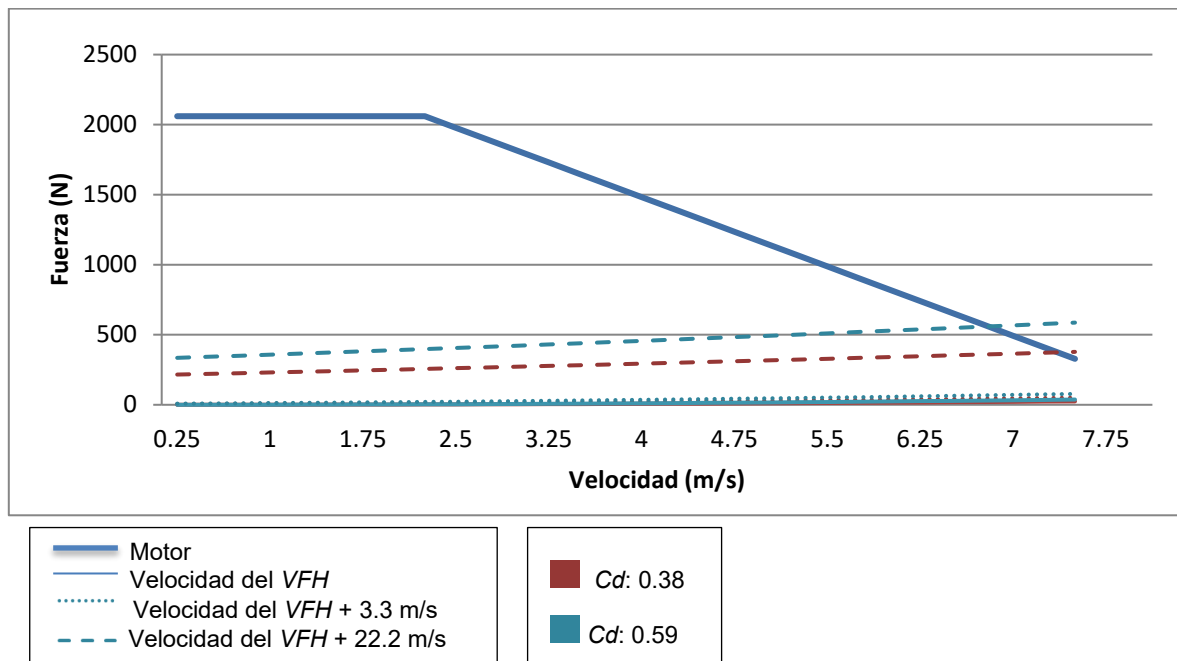


Figura 3.2. Resistencia aerodinámica para diferentes coeficientes de arrastre y velocidades.

Lo que se observó es que la resistencia aerodinámica en condiciones y rango normales de operación no constituyen un gasto energético elevado para el VFH. Sin embargo, como expresa A. Muthuvel, *et al.*, al reducir las fuerzas de arrastre entre un 16% y 35% se puede conseguir un ahorro de combustible de 30% a 34% [13]; lo que la disminución del  $C_d$  de 0.59 a 0.38 representa ese margen de reducción del 35%, una gran mejoría para el diseño. Para el caso del  $C_d = 0.38$  y solo la velocidad del vehículo la demanda es de 0.59% de la fuerza disponible para su desplazamiento. En el caso de tener viento en contra de 3.3 m/s la demanda de fuerza representó un 1.69% de la fuerza disponible. Sin embargo, para los casos extremos de velocidades muy altas, la fuerza aerodinámica si representó una limitante, cuando se compara el  $C_d = 0.38$  (diseño 1) con el  $C_d = 0.59$  (diseño preliminar) representa un 55% menos en fuerza demandada y por esto es importante un coeficiente aerodinámico bajo para reducir la fuerza de arrastre a altas velocidades.

El término de  $F_{pr}$  de la ecuación 2.19, es la fuerza que aparece por el momento de inercia de las llantas oponiéndose al cambio de velocidad, como se observa en la ecuación 2.8. Por lo tanto, su gasto energético es en función de la aceleración y representa un 2.00% de la fuerza disponible. Como se observa en la Figura 3.3, la demanda de fuerza es muy baja y va decayendo mientras el VFH avanza, ya que es una resistencia directamente proporcional a la aceleración que va disminuyendo al aumentar la velocidad (Figura 3.1).

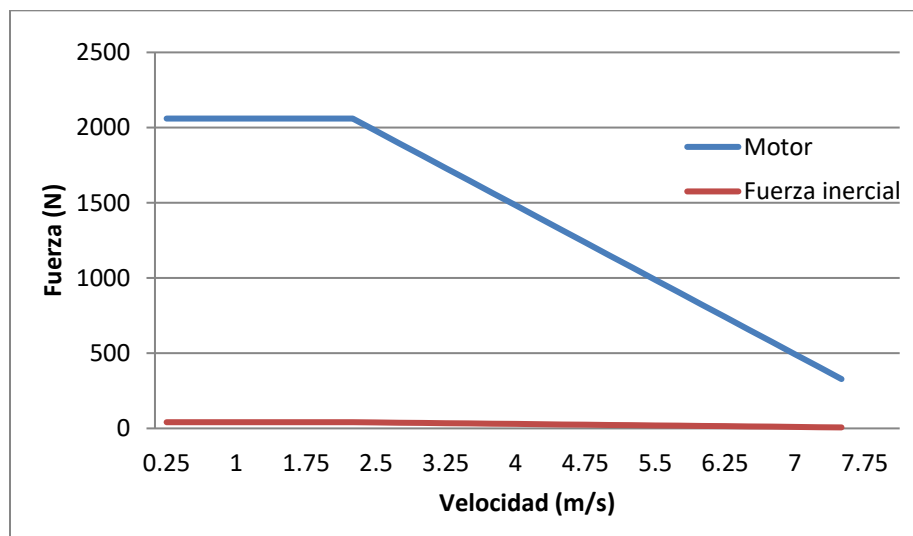


Figura 3.3. Fuerza inercial de las llantas.

Al considerar los factores relacionados al peso del VFH, existen dos términos: la resistencia a la rodadura y el peso del vehículo sobre una pendiente. Ambos términos varían con respecto a la inclinación del suelo, pero de forma distinta. La resistencia a la rodadura disminuye su valor al ir aumentando la inclinación, como se observa en la ecuación 2.17, es un término dependiente de la fuerza normal al plano y este es en función al coseno del ángulo de la inclinación. En cambio, la componente del peso aumenta al crecer el ángulo de inclinación al ser una fuerza en función del seno del ángulo mencionado. Por lo que en las Figuras 3.4 se mostrarán las demandas de estas dos fuerzas en un barrido de ángulos de inclinación hasta un máximo que se halló por la ecuación 3.1, que describe el equilibrio entre la fuerza de tracción (que de igual forma disminuye con la inclinación) y las dos fuerzas mencionadas anteriormente.

$$\beta \leq \tan^{-1} \left( \frac{F_t - F_{rr}}{W} \right) \quad (3.1)$$

A partir de esta ecuación se conoció la pendiente máxima  $\beta = 30.9^\circ$ .

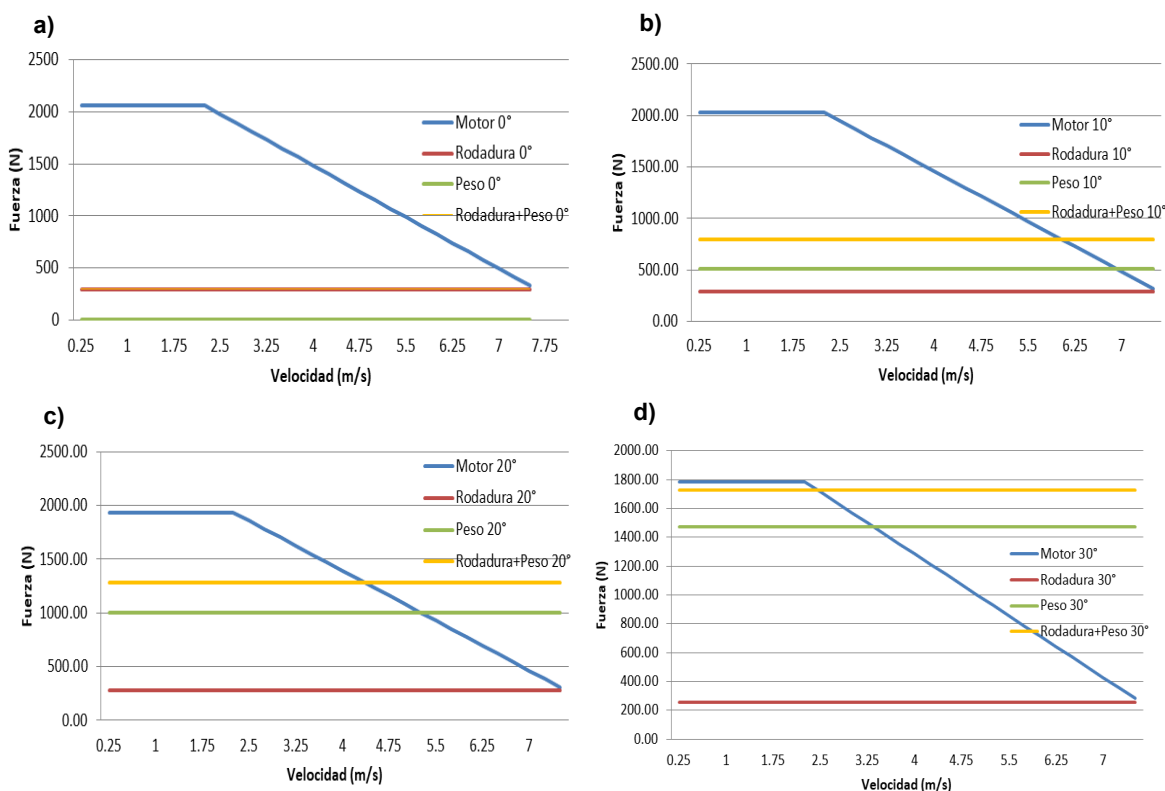


Figura 3.4. Fuerzas de rodadura y peso en plano inclinado: a) 0° b) 10° c) 20° d) 30°.



En la Figura 3.4 (a) se representa la demanda de ambas fuerzas asociadas al peso del VFH, con una pendiente de  $0^\circ$ , es decir, un plano horizontal donde el factor del peso desaparece y solo existe el aporte de la resistencia a la rodadura en su máximo valor y esto representa el 20.65% de la fuerza de tracción disponible. Esta es la condición en la que el VFH tiene mayor rendimiento.

En el caso de la Figura 3.4 (b), se realizó el estudio con la inclinación de  $10^\circ$ . Es notable el factor del peso del vehículo, que a pesar de estar relacionado con el seno del ángulo es un factor con una demanda de 33.75% de fuerza con un ángulo pequeño. Al sumar ambas componentes de demanda se obtuvo un total de 49.36%. Con la pendiente la fuerza de tracción disminuye de 2060 N a 2028.28 N, ya que la fuerza de roce de las llantas motrices está en función de la fuerza normal. Como resultado ya no se pueden alcanzar las máximas velocidades del VFH y se limita a  $v = 6.2 \text{ m/s}$ , el punto de intersección de las curvas del motor y la de las fuerzas de rodadura y peso.

En la Figura 3.4 (c) ocurre lo mismo que el caso anterior de la Figura 3.4 (b), pero se observó la disminución de la fuerza de tracción disponible de 2060 N del plano horizontal a 1935.86 N con la pendiente de  $20^\circ$  y el aumento del efecto del peso. En esta condición de inclinación, la fuerza de rodadura representa un 11.34% de toda la potencia disponible y la fuerza de peso representa un 61.08% de la potencia disponible, por lo que en esta condición se demanda un 72.42% de toda la potencia, permitiendo alcanzar una velocidad máxima de  $v = 4.3 \text{ m/s}$ .

Por último, se realizó un estudio cercano a la pendiente máxima del sistema ( $30^\circ$ ), ya que si se realiza el estudio en el último punto solo se sobrepondrían las curvas, indicando que solo se podría superar esa pendiente a una velocidad casi nula para tener la máxima potencia disponible y sin generar deslizamiento. Pero para el caso de la Figura 3.4 (d) aún se puede alcanzar una velocidad de  $v = 2.2 \text{ m/s}$ ; representando 96.77% de la demanda de la fuerza hasta esa velocidad.

Finalmente, al evaluar todos los factores que involucran la dinámica del VFH, se observa que el factor del peso es de mayor impacto para situaciones de planos con inclinación, incluso en un plano horizontal es el valor con mayor demanda al comparar los porcentajes de cada factor. Esto concuerda con los estudios de aumento de eficiencia energética de

vehículos, que buscan la disminución del consumo de combustible con la reducción del peso de los vehículos implementando carrocerías más livianas donde expresan que al reducir un 10% de peso de la carrocería puede aumentar entre un 6% - 8% su eficiencia [66].

### 3.2 Simulaciones CFD de los modelos

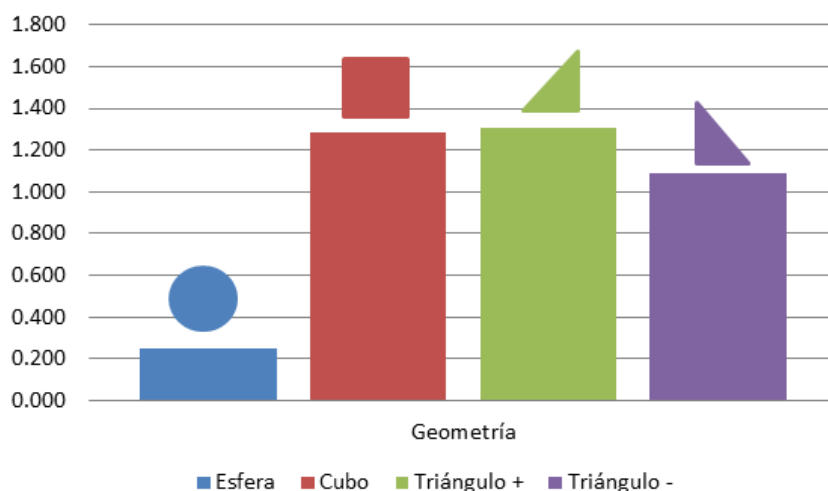
En función de los resultados obtenidos con las figuras geométricas y la literatura sobre el diseño para vehículos se estableció los parámetros de diseño y criterios de evaluación.

Los valores de Cd de las figuras geométricas (Tabla 3. 1) se ajustaron a los reportados en la literatura y esto soporta los resultados de la simulación, a pesar de que los valores no son exactos porque dependen de las condiciones de la simulación si respetan los rangos reportados [67].

**Tabla 3. 1. Coeficiente de arrastre de las figuras geométricas.**

<b>Geometría</b>	<b>Cd Promedio</b>
<b>Esfera</b>	0.252
<b>Cubo</b>	1.284
<b>Prisma Triangular +</b>	1.309
<b>Prisma Triangular -</b>	1.085

En la Figura 3.5 se muestra la diferencia entre el coeficiente entre cada figura y su posición suponiendo que el flujo del aire fuera de izquierda a derecha. Como se observa, la esfera es la figura geométrica con el menor coeficiente de arrastre. Luego le sigue el prisma triangular que posee la cara vertical del lado derecho, éste posee un menor coeficiente de arrastre que el cubo porque el flujo de aire luego de pasar la pared vertical deja de sentir la resistencia o fuerza de roce que aplica el cubo en la parte superior al aire, lo que en el prisma triangular no sucede. Por último, observamos el triángulo con pendiente positiva, esta geometría posee el mayor coeficiente de arrastre debido a la burbuja de aire que se forma delante de la figura, por consecuencia de la cortina que forma el aire al chocar con el triángulo, ya que el aire hace una especie de ampliación de área frontal para el próximo flujo de aire.



**Figura 3.5. Coeficiente de arrastre de las figuras geométricas.**

Luego de realizar el estudio de las figuras anteriores se tomó de referencia el diseño propuesto en el trabajo de tesis anterior, donde se adapta el vehículo de golf para el proyecto del VFH [65], y se corroboró el valor de coeficiente de arrastre bajo las mismas condiciones que se utilizó para los demás modelos y se obtuvo un resultado diferente al reportado. Esto pudo deberse al dominio utilizado en las simulaciones, ya que en la tesis anterior el diseño se simuló en un dominio genérico, no recomendado para vehículos y se colocaba la carrocería al ras del piso del dominio y las condiciones de velocidad en las que se estudió.

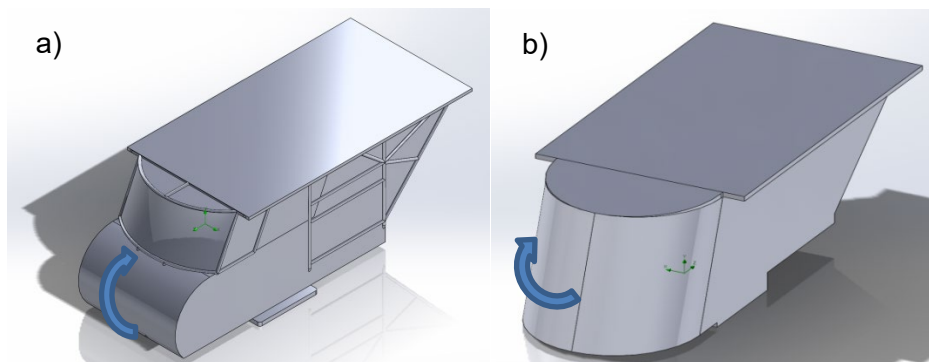
El valor de  $C_d$  que se reporta surge de un cálculo con base en la fuerza que se ejerce sobre el objeto de estudio en la simulación, por lo que al restringir el espacio del fluido en un dominio determinado y no se simula en un espacio abierto, las fuerzas del aire cambian, principalmente porque el paso del aire por debajo del vehículo es restringido y no libre como las simulaciones que se realizaron anteriormente. Además, no se reportan las dimensiones del dominio para poder replicar los resultados. Sin embargo, se utiliza el diseño ya que es el que se utilizó para construir el esqueleto del VFH. En función a las simulaciones de los diseños mostrados en el capítulo anterior de las Figura 2.5, se tienen los siguientes valores mostrados en la Tabla 3. 2.

**Tabla 3. 2. Coeficiente de arrastre de los diseños propuestos para la carrocería del VFH.**

Diseño	Preliminar	1	2	3	4
<b>Cd</b>	0.59	0.38	0.39	0.41	0.39

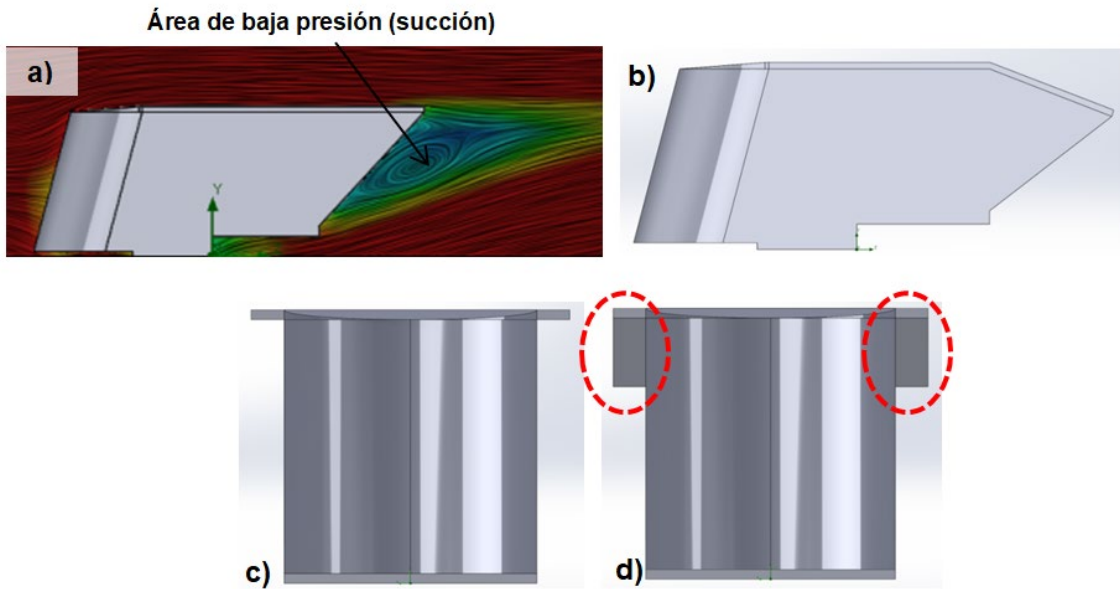
La notable diferencia del coeficiente de arrastre de los nuevos modelos propuestos al preliminar, es que la desviación del aire se realiza hacia los costados por la forma cilíndrica que se le dio a la parte frontal, y el flujo de aire no se ve restringido hacia esos sentidos, de igual forma tiene una pendiente positiva para reducir los esfuerzos del aire hacia esta sección y desviar parcialmente el aire hacia arriba, como se muestra en la Figura 3.6 (b).

En cambio, el diseño preliminar (Figura 3.6 (a)) desvía el aire hacia la zona central del vehículo por su curvatura en el frente. Además, de desviar el aire hacia el suelo que formaría una sección de estancamiento, porque por el perfil de velocidad que tiene el aire con respecto al suelo hace que se aproxime la velocidad a cero en las zonas más cercanas al piso. Por estos motivos no es tan favorable el diseño preliminar.



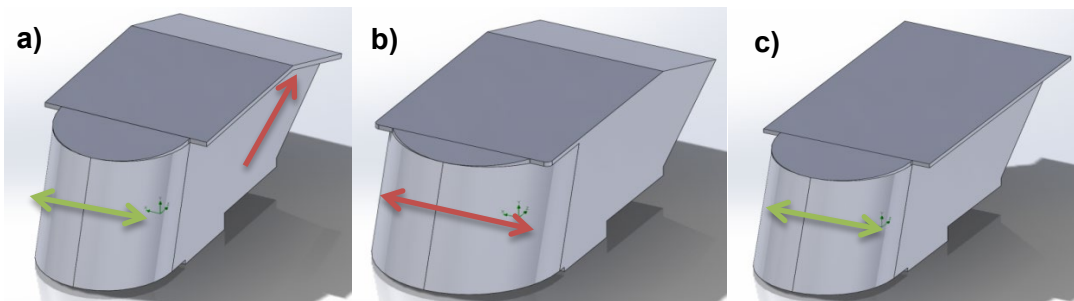
**Figura 3.6. Comparativo del flujo de aire entre a) diseño preliminar y b) diseño 1.**

En el segundo diseño se buscaba reducir la turbulencia generada en la parte posterior del VFH (Figura 3.7 (a)), al darle una inclinación a las bases del último panel fotovoltaico en el techo como se muestra en la Figura 3.7 (b). Sin embargo, se aumentó el área transversal como se muestra en la Figura 3.7 (d), generando mayores fuerzas de arrastre y por ende un aumento en el  $C_d$ .



**Figura 3.7. Comparación de los diseños del VFH, en turbulencia y del área transversal: a) diseño 1 con turbulencia en la parte posterior; b) diseño 2 con inclinación del techo; c) diseño 1 vista frontal; d) diseño 2 vista frontal.**

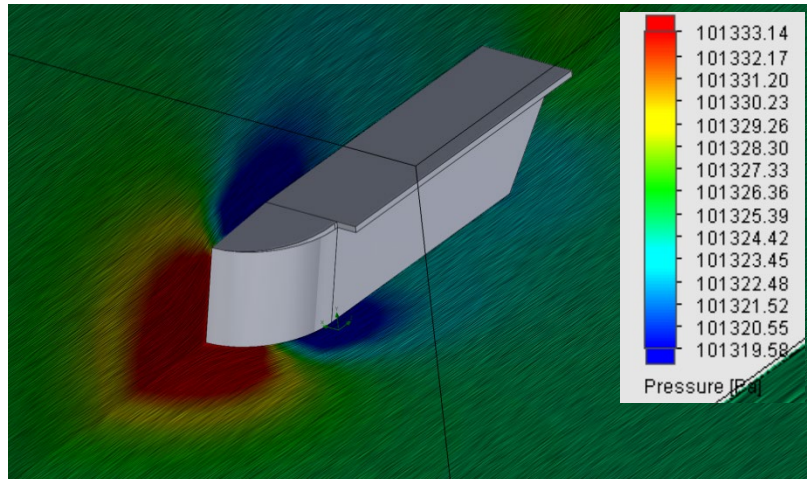
Para el caso del diseño 3 se quiso reducir el impacto que significaba el desvío del aire sobre la base del último panel del diseño 2, aumentando la curvatura frontal. Pero esto significó, de igual manera, el aumento del área transversal y aumento del material para la carrocería por lo que representa una doble pérdida (Figura 3.8 (b)).



**Figura 3.8. Comparación del efecto del alerón del techo y ancho frontal: a) diseño 2; b) diseño 3; c) diseño 1.**

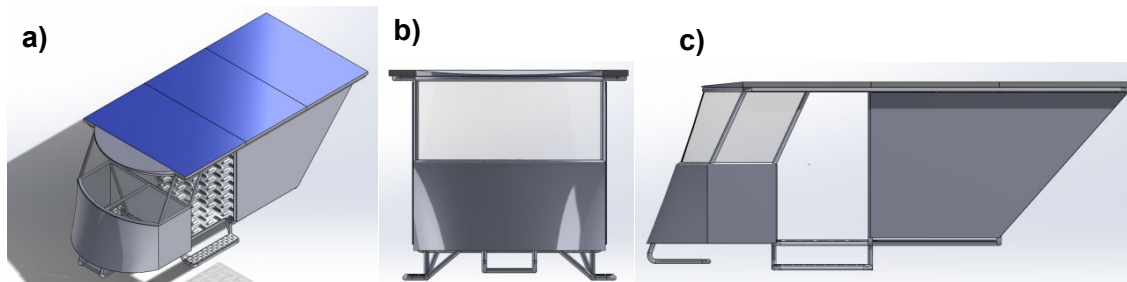
Por último, en el diseño 4 se consideró extender la parte posterior para no generar el vacío en la sección bajo el último panel, como se muestra en la Figura 3.7 (a), pero no representó una disminución del coeficiente de arrastre e implicaría añadir mayor cantidad de material a la carrocería, factor que no es conveniente soportado por el estudio

mecánico realizado anteriormente. Además, como se muestra en la Figura 3.9 la diferencia de presión entre la entrada y salida de aire en el vehículo con el diseño 1 es de 10 Pa a la velocidad máxima del VFH (7.4 m/s), lo que no es una presión de succión significativa, lo que representa un resultado favorable.



**Figura 3.9. Líneas de presión sobre el diseño 1.**

Con base a lo evaluado previamente, el mejor diseño propuesto es el número 1, por tener el menor coeficiente de arrastre e implicar la menor cantidad de material requerido, lo que se traduce en un ahorro de peso, con una vista preliminar mostrada en la Figura 3.10.



**Figura 3.10. Vista preliminar del diseño 1 a) vista isométrica; b) vista frontal; c) vista lateral**

### 3.3 Optimización del grosor del núcleo

Al aplicar los códigos mostrados en el Anexo B para la optimización del grosor del núcleo considerando las dos propiedades por separado (esfuerzo de cedencia a tensión y conductividad térmica), se comprueba el comportamiento del material compuesto tipo sándwich, en el que un núcleo más delgado aumenta la propiedad de esfuerzo de

cedencia a tensión y al hacer un núcleo más grueso aumenta la resistencia a la conductividad térmica.

Por lo que tenemos dos metas contrarias en la función objetivo, ya que queremos maximizar el esfuerzo de cedencia del material reduciendo el grosor del núcleo, para evitar deformaciones permanentes en la estructura por esfuerzos dinámicos en la carrocería, y minimizar la conductividad térmica de la estructura tipo sándwich al engrosar el núcleo, para aislar la temperatura alcanzada en la parte externa de la carrocería y la cara interna del material. Esto debido a que la cara externa puede alcanzar 60 °C por la radiación recibida por el Sol.

Al resolver el esfuerzo de cedencia se obtiene que el grosor óptimo es el grosor mínimo, de 2 mm. Con este resultado se busca la conductividad térmica bajo esta condición y se tiene un  $k_{max} = 0.3379 \text{ W/m.K}$  teórico del método de la resistencia, este valor se utiliza como denominador en la fracción de conductividad térmica de la función objetivo. En el caso de que si se tratase de una lámina solo de aluminio la conductividad térmica sería de  $k = 209.3 \text{ W/m.K}$ , una conductividad muy alta y no deseada para el objetivo del material compuesto.

Con un procedimiento similar explicado anteriormente, se resuelve la conductividad térmica del material compuesto, dando como punto óptimo el grosor máximo, de 10 mm. Con ese resultado se evalúa el esfuerzo a cedencia mediante la ecuación de la mezcla de los materiales compuestos, obteniendo  $\sigma_{max} = 16.67 \text{ MPa}$ , al igual que el término anterior el valor obtenido se utiliza como denominador en la fracción de esfuerzo de cedencia de la función objetivo. Para el caso del esfuerzo de cedencia a tensión del aluminio es de  $\sigma = 118.67 \text{ MPa}$  y del aglomerado es de  $\sigma = 10.56 \text{ MPa}$ .

Adicionalmente, en la función objetivo se utiliza un término de peso, como lo es  $\mu$  para cada fracción. Esto lo que representa es a qué término le damos mayor importancia. Para la fracción del punto de cedencia se utiliza un  $\mu_1 = 0.6$  y para la fracción de conductividad térmica se coloca un  $\mu_2 = 0.4$ , dándole un poco más de importancia a la propiedad mecánica que la térmica.

Al resolver la función objetivo se obtiene que el grosor óptimo para las consideraciones demandadas es el mínimo de 2 mm; resultando en una estructura más liviana, ya que el

peso del material es directamente proporcional al grosor final. El peso no se refleja en la ecuación de optimización directamente, sin embargo, se contempla en la fracción de esfuerzo, ya que a menor grosor del núcleo menor es el peso final y mayor es el esfuerzo de cedencia.

### 3.4 Pruebas de adhesión

En esta sección se reportan los valores de la resistencia al pelado de la estructura tipo sándwich con los tres tipos de adhesivos: polietileno modificado, Polybond (polietileno adhesivo comercial) y Collano (polipropileno adhesivo comercial). Para cada tipo de adhesivo se realizaron 5 pruebas de pelado. Los resultados de adhesión se muestran en la Tabla 3. 3.

Los resultados obtenidos se compararon con los reportados por Koh, F. donde reporta un estudio similar de pelado para la estructura tipo sándwich con núcleo grueso (4 mm), sus resultados muestran valores mucho más elevados pero con una desviación estándar mucho mayor, donde la fuerza de adhesión reportada es de  $124.7 \pm 45.1$  N [38]. La fuerza de adhesión con el Collano se encuentra dentro del margen de adhesión reportado por Koh, lo que indica una adecuada ejecución de los métodos aplicados.

En todos los casos se observó una falla cohesiva en el núcleo del material, dejando parte del aglomerado adherido a las caras de aluminio. Esto se debe a que las fuerzas de unión que conforman el núcleo son de tipo mecánico (ocurre cuando el polímero líquido moja las partículas de cartón y aluminio) y esta adhesión mecánica es más débil que la generada por los adhesivos en película de PE y PP que proporcionan una mejor adhesión con las caras de aluminio de la estructura sándwich.

**Tabla 3. 3. Resistencia al pelado con tres tipos de adhesivo en el material compuesto.**

<b>Fuerza al pelado promedio (N)</b>		
<b>PE Modificado (D.S.)</b>	<b>PE PolyBond (D.S.)</b>	<b>PP Collano (D.S.)</b>
22.95 (0.85)	56.09 (5.43)	102.51 (9.24)

Estos resultados muestran la posibilidad de utilizar el adhesivo producido en el CICY, ya que genera una resistencia suficientemente alta para soportar rolados con valores mecánicos intermedios, suficientes para su uso en la carrocería del VFH.

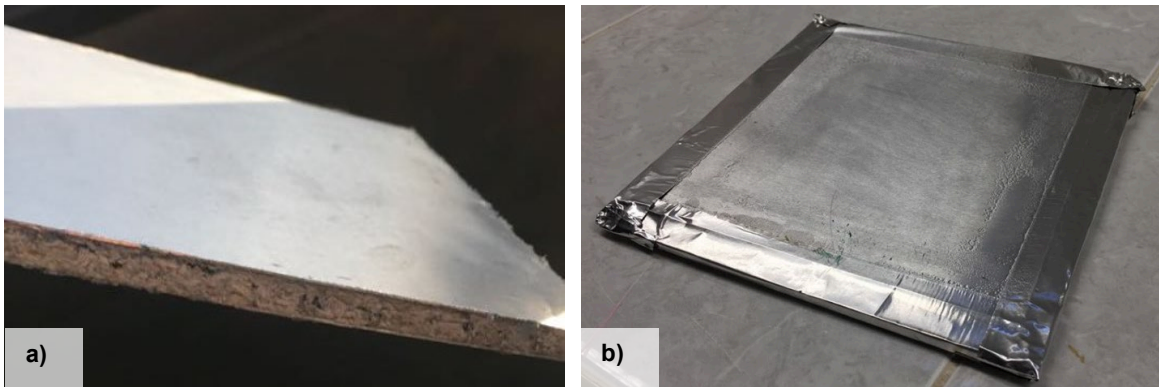


Por otra parte, a pesar de que el Collano (PP Maleico) posee la mayor fuerza de adhesión, no es compatible térmicamente con la producción de la estructura sándwich, al tener que elevar las temperaturas de procesamiento a niveles más altos en los que el polietileno del aglomerado queda en un estado de alta fluidez y fomenta el escurrimiento no deseado del material. En el caso del polybond, el adhesivo comercial, posee el segundo puesto de adhesión en este estudio, aunque no se considera su implementación debido a que es de difícil obtención por importación.

### **3.5 Conformado de la estructura multilaminar**

Luego de elaborar el aglomerado de Tetra Pak y PEAD, se realizaron las pruebas de conformado del material compuesto con estructura multilaminar con las capas de aluminio calibre 30 (espesor de 0.305 mm). Durante las pruebas de conformado se utilizaron 3 tipos de adhesivos, uno de polipropileno y dos de polietileno, todos modificados para la adhesión.

El primer conformado tipo sándwich se realizó con polipropileno como adhesivo, ya que es un material que provee mejores propiedades de adhesión. Sin embargo, como el polipropileno necesita temperaturas más altas para su fusión (180 °C) para generar el conformado por lo general ocurre escurrimiento del núcleo por poseer una matriz de polietileno de alta densidad, que su punto de fusión es de 110°C. Para la obtención de una estructura tipo sándwich sin desfase entre las partes que lo conforman (Figura 3.11 (a)), no se generan muchos problemas ya que en los bordes el material se contiene mediante una cinta adhesiva de aluminio, como se muestra en la Figura 3.11 (b). Pero, los problemas principalmente se observan cuando se desea realizar un desfase entre las láminas de aluminio y el aglomerado ya que en el desfase no hay nada que contenga el material en el interior y este fluye a espacios vacíos (Figura 3.12); donde el propósito del desfase es desarrollar la técnica de unión interlaminar.



**Figura 3.11. Estructura tipo sándwich con núcleo aglomerado de Tetra Pak y polietileno: a) con los bordes descubiertos; b) con los bordes cubiertos con cinta adhesiva de aluminio para el conformado.**



**Figura 3.12. Estructura tipo sándwich desfasado para técnica de unión, observando el escurrimiento del núcleo, dentro del espacio generado para el traslape.**

Luego de observar los problemas de fluidez del núcleo por altas temperaturas se procedió a cambiar de adhesivo para evitar este escurrimiento utilizando un polietileno modificado para adhesión. Este elemento requiere una temperatura de 150 °C para su aplicación, por lo que no se ve tan afectado el núcleo usando presiones de conformado más bajas.

Con este adhesivo se procedió a realizar las pruebas de unión con una sola cara para evaluar la factibilidad de utilizar un material más delgado, para reducir peso en el producto final. Para este conformado se utilizó un molde con dimensiones de 14 cm x 14 cm en el que se colocaron 4 piezas del aglomerado de 7 cm x 7 cm y se unieron a una sola lámina de aluminio como cara posterior, para observar si era perceptible las uniones entre los aglomerados. Con esto se obtuvo un conformado uniforme en el que las uniones entre los núcleos son casi imperceptibles a la vista, generando un material bastante bueno, como se muestra en la Figura 3.13.



**Figura 3.13. Unión de cuatro núcleos con una cara de aluminio.**

Adicionalmente se realizó una estructura tipo sándwich con el polietileno como adhesivo y utilizando la técnica de traslape doble entre dos núcleos de 15 cm x 8 cm. Estos se colocaron entre dos láminas de aluminio compartiendo la mitad de la sección para realizar la unión. De esta forma se obtuvo una unión muy resistente en el que la sección de unión entre los dos núcleos parece desaparecer y fundirse entre ellos, como se aprecia en la Figura 3.14.



**Figura 3.14. Estructura tipo sándwich, consolidado con adhesivo de polietileno.**

Validada esta técnica, se contempla que trabajos futuros puedan adoptar esta metodología de elaboración continua con un sistema que pueda conformar las partes en un proceso continuo que permita obtener laminados sin límite de longitud.

### 3.6 Rolado de conformados multilaminados

Los multilaminados elaborados con el fin de poner a prueba las técnicas de adhesión se sometieron a pruebas de rolado para observar el radio de curvatura límite o necesario para la fabricación de la carrocería del VFH.

Para la estructura con una cara de aluminio se logró realizar un rolado con un radio de curvatura de 6 cm, lo que indica una curvatura muy pronunciada (para aplicaciones en carrocerías) como se muestra en la Figura 3.15. En esta prueba se llegó al límite del material en el que comenzó a mostrar desunión (radio de curvatura de 6 cm), en el que uno de los lados del material comenzó a despegarse (el núcleo del aluminio), por efectos de deslizamiento y esfuerzos internos.



**Figura 3.15. Rolado de laminado de una cara de aluminio, hasta un radio de 6 cm de curvatura.**

Para la estructura tipo sándwich en el que se realizó un traslape doble también se le realizó el rolado, pero en este caso solo se llegó hasta un radio de curvatura de 14 cm, como se muestra en la Figura 3.16, ya que es una curvatura que cubre satisfactoriamente cualquier curva del diseño propuesto para el VFH. El material respondió favorablemente, donde simplemente no se observó desprendimiento, ni desunión de las dos partes de núcleos unidas. Con esta técnica se valida la posibilidad de ir conjugando por traslape, partes del núcleo y aluminio para que, en un proceso continuo, se pueda elaborar laminados de longitud indefinida para el revestimiento de vehículos.



**Figura 3.16. Rolado de estructura tipo sándwich hasta 14 cm de radio de curvatura.**

### 3.7 Caracterización mecánica del material

#### 3.7.1 Prueba de tensión del multilaminado

En la prueba de tensión se obtuvieron datos de fuerzas y desplazamiento de la estructura sándwich de 2.19 mm de grosor, que posteriormente se transformaron en datos de esfuerzo y deformación, mediante las ecuaciones 2.21 y 2.22, para representarlo gráficamente (Figura 3.17). En estas pruebas se observó la uniformidad del comportamiento del material en la sección elástica con un módulo de Young de  $5.33 \pm 0.86$  GPa mostrando una desviación estándar pequeña. La uniformidad de las muestras se mantuvo hasta que se alcanza el esfuerzo máximo o máxima resistencia a tensión con un valor de 51.61 MPa y una desviación estándar de 2.02 MPa. Luego de este punto comienzan a dispersarse los resultados de cada muestra, debido a que fallan las caras de aluminio del MC y el aglomerado es el que mantiene la resistencia y genera una falla progresiva hasta la ruptura del material, por este motivo tenemos una deformación de ruptura promedio de 3.19% con una desviación estándar de 0.66.

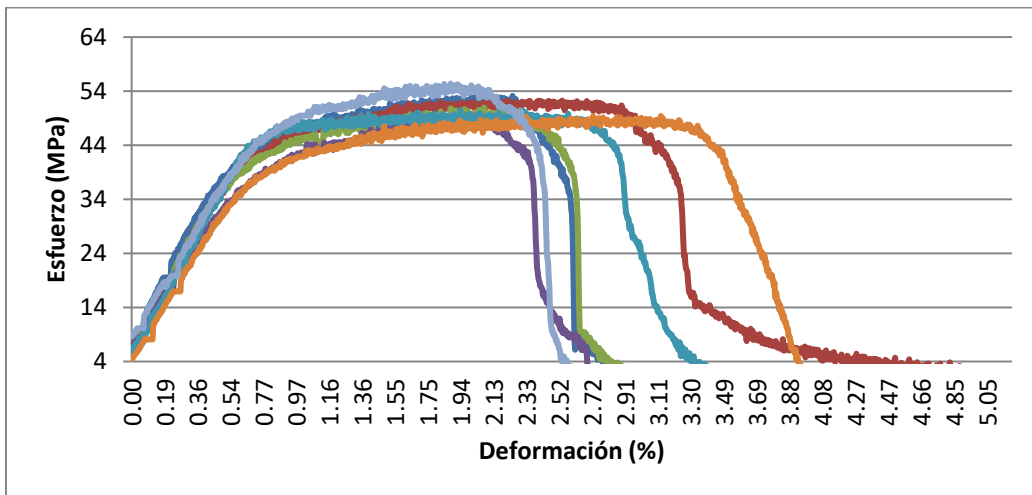
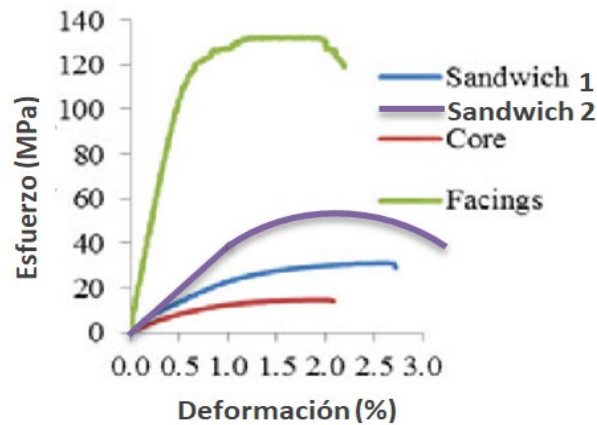


Figura 3.17. Resultado del ensayo de tensión: Gráfica esfuerzo vs. deformación.

Los datos obtenidos en esta prueba se compararon con datos de pruebas realizadas anteriormente por J. A. Moo-Tec [68], para observar el comportamiento de los componentes del material compuesto y de la estructura sándwich similar con un grosor de 4 mm (Figura 3.18).



**Figura 3.18. Gráfica de tensión Esfuerzo vs. Deformación, de la estructura sándwich con dos grosores de núcleos distintos, del aluminio y el aglomerado [68].**

El comportamiento mostrado por la estructura tipo sándwich corresponde a lo esperado, ya que, aunque se reduce el espesor del material compuesto, esa reducción solo corresponde al núcleo y las caras de aluminio mantienen su grosor de 0.3 mm por cada lado, por lo tanto, se aumenta el porcentaje de aluminio en el material compuesto y se refleja en la Figura 3. 18, respetando la teoría de la regla de las mezclas, donde la estructura sándwich 2 se aproxima más al comportamiento del aluminio.

Para facilitar la comparación numérica se muestran los resultados en la Tabla 3. 4. En la estructura tipo sándwich 1, el estudiado por Carrillo, Moo-Tec y Gamboa [68], con un grosor de 4 mm (15% de aluminio y 85% de aglomerado), al comparar el resultado experimental con el teórico por medio de la regla de las mezclas se observó que teóricamente se obtiene un módulo elástico de 4.78 GPa, lo que corresponde a un 4.1% superior al módulo experimental (4.59 GPa). La estructura tipo sándwich 2, el desarrollado en el presente estudio, con un grosor de 2.19 mm (27.4% de aluminio y 72.6% de aglomerado), de igual forma al comparar el resultado experimental con la regla de las mezclas, el resultado teórico del módulo elástico fue de 6.01 GPa, con un 12.76% por encima del resultado experimental (5.33 GPa); resultando en una diferencia mayor. Sin embargo, este aumento de los esfuerzos y módulo elástico se debió al aumento del porcentaje de aluminio en la estructura, que se aumentó un 12.4% de aluminio en la estructura, ya que el grosor del núcleo disminuyó pero el espesor de las láminas de

aluminio se mantuvieron igual, por lo tanto el porcentaje de aluminio global de la estructura aumenta.

Tabla 3. 4. Propiedades a tensión de los materiales.

Material	Prueba de tensión				
	Max. resistencia MPa (D.S.)	Resistencia de cedencia MPa (D.S.)	Módulo Elástico GPa (D.S.)	Módulo Específico (MPa m <sup>3</sup> /kg)	Deformación de ruptura % (D.S.)
<b>Al 1100 –H14, 0.3 mm grosor</b>	130.93 (1.56)	118.67 (3.30)	20.86 (0.76)	7.755	1.68 (0.14)
<b>Aglomerado (núcleo)</b>	14.83 (0.53)	10.56 (0.30)	1.94 (0.08)	1.796	1.99 (0.27)
<b>Sándwich estructura 1 (4 mm de grosor)</b>	30.34 (1.06)	27.55	4.59 (0.39)	3.350	2.78 (0.39)
<b>Sándwich estructura 2 (2.19 mm de grosor)</b>	51.61 (2.02)	44.93 (2.63)	5.33 (0.86)	3.60	3.19 (0.66)

Haciendo una comparación entre una fuerza determinada que pueda tolerar la estructura tipo sándwich 2 con respecto el aluminio, se obtiene que con un grosor de 0.86 mm el aluminio soportaría las mismas fuerzas de 113 KN. Sin embargo, una lámina de aluminio de ese espesor no posee la misma rigidez y tendería a pandearse por ser tan delgado y no tener el suficiente grosor para generar el momento necesario para no doblarse.

No obstante, se realiza la comparativa de peso de un metro cuadrado entre el aluminio y las estructuras tipo sándwich para observar cómo es la variación de peso en cada uno. Para el aluminio se tendría una masa de 2.31 kg, la masa de la estructura tipo 1 sería de 5.52 kg y la masa de la estructura 2 sería de 3.24 kg. Si escalamos esta propuesta a las dimensiones del VFH, que corresponde a un área de carrocería de 5.41 m<sup>2</sup>, la masa de aluminio sería de 12.52 kg, la masa de la estructura 1 de 28.56 kg y de la estructura 2 de 17.53 kg. Sin embargo, este grosor de aluminio no se puede implementar directamente como carrocería por ser muy delgado y por ende se pandea con facilidad, el grosor equivalente a la estructura tipo sándwich para que no pandee se refleja en las pruebas de flexión, en el siguiente apartado.

Como se ha observado en el análisis de fuerzas el factor más influyente es el peso, por lo que se realiza la comparación de las masas de la carrocería si se realizara de un material



u otro. Entre los tres materiales propuestos la estructura sándwich 1 es la más pesada por lo que se descarta, ya que los beneficios que posee esta estructura, están presentes igualmente en la estructura sándwich 2, siendo una estructura más delgada y por ende más liviana. Sin embargo, entre la estructura sándwich 2 y el aluminio hay una diferencia de 5.01 kg, lo que representa un 28.58% de la masa de la carrocería, una masa que representaría un 1.04% de la masa total del vehículo.

### 3.7.2 Prueba de flexión en 3 puntos del multilaminado

En la prueba de flexión se registró datos de fuerza y desplazamiento, que se utilizan en la ecuación 2.26 para hallar la resistencia a flexión de la estructura tipo sándwich de 0.236 cm de grosor, que genera un comportamiento como se observa en la curva típica de esfuerzo-deflexión en la Figura 3.19. La zona elástica se extiende hasta aproximadamente los 70 MPa (zona en la cual se calcula el módulo de flexión). Se observó en la figura respuestas consistentes para las 10 muestras evaluadas, donde el módulo de flexión es de 13.78 GPa con una desviación estándar de 0.22 GPa, módulo más elevado que el reportado por Koh de  $4.6 \pm 0.3$  GPa [38] y la resistencia alcanzada es de 101.65 MPa con una desviación estándar de 1.91 MPa. De igual forma es mayor al reportado por Koh de  $70.18 \pm 1.5$  MPa [38]. Estos aumentos corresponden a la elevación del porcentaje de aluminio en la estructura de un 15.38% a un 25.42%. Las pruebas no se llevaron hasta la fractura del material debido a que el equipo llegó a su máximo desplazamiento sin que el MC se fracturara.

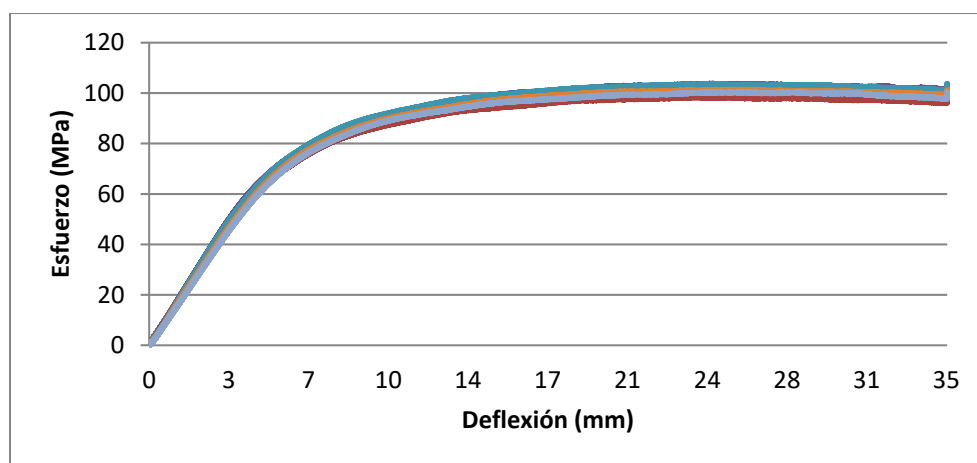


Figura 3.19. Resultados del ensayo de flexión para los paneles tipo sándwich de 0.236cm de grosor: Gráfica esfuerzo de flexión vs. deflexión.



Estos datos se comparan con los datos de pruebas pasadas, para observar el comportamiento en las diferentes estructuras por su cambio de porcentaje de los componentes y el grosor (Tabla 3. 5). Para la estructura probada se tiene un grosor de 2.36 mm con un 25.42% de aluminio y 74.58% de aglomerado volumétrico, en comparación a la estructura sándwich 1 con un grosor de 3.9 mm se tiene 15.38% aluminio y 84.62% aglomerado. Adicionalmente se comparó con un estudio realizado por Cruz, I. en el que reporta la resistencia a flexión (MOR) de una estructura sándwich con núcleo de polialuminio (96% PEBD y 4% aluminio) [40]. Para todos los casos de las estructuras tipo sándwich, el de mayor resistencia a la flexión corresponde a la estructura desarrollada en este estudio (sándwich 2).

**Tabla 3. 5. Resistencia a la flexión.**

<b>Material</b>	<b>MOR MPa (D.S.)</b>
<b>Aluminio</b>	474 (12.45)
<b>Aglomerado (núcleo)</b>	26.7 (1.04)
<b>Sándwich 1 (3.9 mm de grosor)</b>	70.18 (1.5)
<b>Sándwich 2 (2.36 mm de grosor)</b>	101.65 (1.91)
<b>Sándwich de polialuminio</b>	58 (2.8)

Se realiza un análisis similar a la prueba de tensión, en el que se compara la fuerza que puede soportar la estructura sándwich 2 de 75 N y se calcula el grosor del aluminio mediante la ecuación de resistencia a flexión (ecuación 2.24), dando como resultado 1.09 mm. Si se hace el análisis de la masa en un metro cuadrado se tiene que el aluminio sería una masa de 2.93 kg, del sándwich 1 sería 4.86 kg y del sándwich 2 una masa de 3.52 kg. Haciendo este análisis para el área de la carrocería de 5.41 m<sup>2</sup> la masa total de aluminio sería 15.86 kg, la masa de la estructura 1 de 26.31 kg y la masa de la estructura 2 sería de 19.02 kg. Como en la prueba de tensión se obtiene un resultado similar, sin embargo, la diferencia entre las masas de la carrocería de aluminio y de la estructura sándwich 2 es de 3.16 kg, en este caso disminuye la diferencia de masa con respecto al caso anterior porque el aluminio para soportar la misma fuerza a flexión necesitó aumentar su grosor.

### 3.8 Estudio de transferencia de calor transversal del multilaminado

Para el estudio de transferencia de calor, se realiza un análisis teórico en base a los datos conocidos de conductividad térmica ( $K$ ) de los componentes del material compuesto y mediante el método de la resistencia. Para la simplificación de la conductividad térmica, se obtuvo los valores de ambas estructuras tipo sándwich mostrados en la Tabla 3. 6.

Por la composición del aglomerado es de esperar una baja capacidad de transferencia de calor, ya que en su mayoría es de polietileno y cartón. La conductividad térmica del cartón es de 0.13 W/m K, el polietileno de baja densidad 0.45 W/m K, el polietileno de alta densidad 0.52 W/m K y el aluminio 209.3 W/m K [38]. Por este motivo cuando se junta el aglomerado con las láminas de aluminio para formar la estructura tipo sándwich aumenta la conductividad térmica del material, donde es indispensable tener cierto grosor de núcleo para evitar la transferencia de calor entre ambas caras del material.

Además la conductividad térmica se ve interrumpida por la resistencia térmica interfacial de los constituyentes del compuesto, donde se considera como un defecto en los materiales compuestos particulados [69].

**Tabla 3. 6. Conductividad térmica de los componentes y de dos estructuras tipo sándwich con diferente grosor.**

<b>Material</b>	<b>Conductividad térmica (<math>K</math>) W/(m. K)</b>
<b>Aluminio</b>	209.3
<b>Aglomerado (núcleo)</b>	0.26
<b>Sándwich estructura 1 (3.9 mm de grosor)</b>	0.31
<b>Sándwich estructura 2 (2.36 mm de grosor)</b>	0.35

Para reflejar estos valores en como influirían en la carrocería del VFH, se plantea una situación en la que la parte externa del VFH recibe un calor a una potencia constante, generando un diferencial de temperatura de 25 °C (ej. entre 30 °C y 55 °C) entre la parte externa e interna del vehículo y se observa que para aislar la diferencia de temperatura como lo realiza la estructura sándwich 2 de un espesor de 2.36 mm se necesitaría 1411.28 mm de grosor del aluminio, por lo que se generaría una carrocería poco viable para construir y sería en exceso pesada. La carrocería de la estructura tipo 2 tendría una masa de 19.02 kg y la de aluminio de 20538.22 kg.

### 3.9 Estudio de resistividad eléctrica transversal del multilaminado

El comportamiento en conductividad térmica y eléctrica de los materiales compuestos particulados es similar siempre y cuando las partículas reforzantes sean buenos conductores en ambos casos mencionados, por ejemplo los metales. La buena conductividad de ellos dependen de la concentración y dispersión de las partículas, por ende al aumentar el número de partículas contenidas en la matriz polimérica aumenta la conductividad, porque la distancia entre partículas conductoras disminuye hasta alcanzar un valor crítico donde se forman rutas de conducción [69].

En este estudio de conductividad eléctrica transversal del multilaminado tipo sándwich no se obtuvo lectura de paso de corriente en el circuito (Figura 2.27). Es decir, el material al poseer un núcleo de un 97.75% de material aislante, el 2.25% del aluminio que corresponde al núcleo como se encuentra de forma dispersa no genera ningún paso de corriente de forma transversal en el grosor estudiado (2.36 mm). Se asume entonces que las partículas de aluminio se encuentran encapsuladas por el plástico predominante, además la interfaz existente entre el polímero y el material de refuerzo actúa como una especie de aislante ya que no permite el transporte continuo eléctrico o térmico, fenómeno llamado resistencia de Kapitza [69].

Otros factores fundamentales relacionados con la conducción térmica y eléctrica, son las formas de las partículas dispersas, la orientación y los pretratamientos que puedan llevar (cargas eléctricas o baños químicos). Entre las formas la esfera no es la más conductora, para una mejor conducción se pueden implementar formas laminares o fibrilares con orientación de la conducción deseada [69]. En el caso del MC desarrollado, las partículas de aluminio dispersas en la matriz polimérica no tienen forma definida, ni orientación que pueda fomentar la conductividad.

Lo que se comprobó fue el paso de corriente en una misma cara de aluminio del material, al registrar continuidad si las dos terminales del circuito se encontraban del mismo lado del MC. Por ende es importante la uniformidad del núcleo para que las dos caras de aluminio de la estructura sándwich no puedan estar en contacto.

### 3.10 Estudio de rendimiento del vehículo fotovoltaico híbrido

Mediante los análisis teóricos se determinó el aumento de la autonomía del VFH. Se disminuyó 12.84 kg de la carrocería total con la nueva estructura sándwich, dando como

resultado una carrocería con un peso de 19.02 kg, lo que significa una reducción de 27.71% del peso en la carrocería. Esta disminución de peso representa una reducción total de 4.28% de peso en todo el vehículo, aumentando el rendimiento en un 3.63% en un terreno sin inclinación o un aumento de 4.12% en planos con inclinaciones de 20° (pendiente promedio en la Península de Yucatán [70]), resultado altamente favorable conociendo las aproximaciones en la industria automotriz, donde expone que al disminuir un 10% el peso de un vehículo se puede aumentar su rendimiento de un 6 a 8% [25].

Con la reducción del peso del VFH el aumento del 4.12% de eficiencia representa en términos de tiempo, el aumento de 20 minutos de las 8 horas que posee de autonomía a una velocidad de 7.4 m/s (velocidad máxima teórica). En estas condiciones significa que el VFH ganaría 8.8 km de recorrido.

## CONCLUSIONES

En particular dentro de este estudio, el diseño 1 obtuvo el mejor desempeño aerodinámico entre los propuestos, consiguiendo un  $C_d = 0.38$ , un coeficiente de arrastre muy bueno para la geometría que posee el vehículo, por su gran área transversal. Además, es un coeficiente de arrastre similar al que poseen los automóviles comerciales actuales, por lo que igualmente se considera un buen diseño.

Debido a que el peso representa el mayor porcentaje de consumo de energía disponible en el VFH, el diseño 1 resulta la mejor opción. Porque este diseño sobresale por poseer una cantidad optimizada de láminas, es decir, el diseño más compacto con el que se reduce el peso final del VFH.

En relación al peso final del vehículo, se formuló una función de optimización considerando factores de esfuerzos, termodinámicos, eléctrico y peso del material para determinar la mejor proporción de la estructura sándwich propuesta. Por lo que el proceso de optimización del material estuvo acompañado de su caracterización mediante pruebas experimentales, validando la resistencia del material y permitiendo su comparación bajo las diferentes condiciones.

En tensión la estructura sándwich 2 (la más delgada de 2.19 mm), obtuvo un aumento en la resistencia a tensión de un 70.1% comparado con la estructura sándwich 1 (4 mm), en la resistencia a cedencia de un 63.1% (factor utilizado para la ecuación objetivo de optimización) y en el módulo elástico de un 16.12%. En flexión ocurre un caso similar, en el que el menor grosor de la estructura aumenta su resistencia a flexión en un 44.8%. Estos aumentos en sus características favorecen para su consolidación como material para la carrocería, ya que es un material que soporta mayores fuerzas por unidad de área y se reduce el peso final por unidad de área.

Con respecto a la conductividad térmica, la estructura sándwich más gruesa posee una conductividad 12.9% menor que la estructura sándwich más delgada, que es lo que se requiere (que sea un material aislante). Sin embargo, al comparar la estructura sándwich delgada con el aluminio representa un 0.16% de la conductividad. Es decir, el aglomerado que se utiliza como núcleo funciona como aislante térmico con un valor de conductividad de 0.26 W/ (m. K). Igualmente al evaluarse la conductividad eléctrica se obtiene que el

núcleo trabaja como aislante hasta condiciones de 30 V en corriente continua, condición completamente necesaria para la carrocería al formar parte de un vehículo eléctrico y que requiere aislar cualquier posibilidad de paso de corriente.

Por lo tanto, bajo estas consideraciones se valida que el grosor de 2 mm es adecuado para su implementación en el VFH. Esto permite disminuir 12.84 Kg de la carrocería final en comparación a la estructura sándwich 1 propuesta inicialmente con núcleo de 3.2 mm. Esto permite aumentar un 4.28% el rendimiento del VHF, es decir, si en condiciones normalizadas de operación el VFH tiene 8 horas de autonomía, con esta reducción de peso se ganaría 20 minutos de operación, que se traduce en 8.8 km a 7.4 m/s.

## **RECOMENDACIONES Y TRABAJO A FUTURO**

Como trabajo a futuro se propone realizar la instalación de la carrocería de las láminas del material compuestos ya fabricadas, mediante la propuesta de instalación propuesta en el presente trabajo.

Se recomienda realizar un estudio de fatiga del material compuesto tipo sándwich, bajo la norma ASTM C394 [71], para complementar su caracterización mecánica por las condiciones dinámico-mecánico en la que el material estará expuesto.

Por otra parte, se tuvo limitaciones para el desarrollo de la unión de grandes secciones de láminas sándwich, ya que las prensas disponibles confinan las dimensiones de prensado por sus rejas de seguridad. Cuando se desarrolle un método de producción continua de la estructura sándwich aumentará el atractivo de la implementación de este material, que ya fue demostrado que tiene un gran potencial por sus distintas propiedades y beneficio medioambiental, al ser en su mayoría material reciclado.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Martin, H., Bargallo Pernina, R., Llaverías, J. (2015) El vehículo eléctrico y la eficiencia, 11–14
- [2] Areiza, Y., Rendón, W. (2016) Desarrollo de carrocería aerodinámica para monoplace eléctrico de la escudería ARA de la Regional Antioquia en el marco de la formula SENA ECO 2013-2014, *Ing. USBMed*, vol. 7, no. 2, 48–53
- [3] Majewski, T., Bledzki, A. (2013) Plásticos reforzados con fibras naturales en el sector automotriz, *IDEAS*, 23–33.
- [4] Yong, J. Y., Ramachandramurthy, V. K., Tan, K. M., Mithulananthan, N. (2015) A review on the state-of-the-art technologies of electric vehicle, its impacts and prospects, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 49, 365–385
- [5] Bhatti, A. R., Salam, Z., Aziz, M. J. B. A., Yee, K. P., Ashique, R. H. (2016) Electric vehicles charging using photovoltaic: Status and technological review, *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 54, 34–47
- [6] Patterson, M. G. (1996) What is energy efficiency? Concepts , indicators and methodological issues, *ELSEVIER*, vol. 24, no. 5, 377–390
- [7] Linares, P.(2009) Eficiencia energética y medio ambiente, *Econ. y Medio Ambient.*, vol. 847, 75–92
- [8] Carretero Peña, A., García Sánchez, J. M. (2012) *Gestión de la eficiencia energética: cálculo del consumo, indicadores y mejora*, AENOR. Madrid: AENOR
- [9] Mott, R. L. (2006) *Mecánica de fluidos*, 6th ed. Mexico: Pearson Educación



- [10] Johnson, C., Le Good, G. (2016) The aesthetics of Low Drag vehicles.
- [11] SRINIVAS, V. L. (2016) Shape optimization of a car body for drag reduction and to increase downforce
- [12] Solmaz H., Icingür, Y. (2015) Drag coefficient determination of a bus model using reynolds number idependence, *Int. J. Automot. Eng. Technol.*, vol. 4, no. 3, 146–151
- [13] Muthuvel, A., Murthi, M. K., Sachin, N. P., Koshy, V. M., Sakthi, S., Selvakumar, E. (2013) Aerodynamic exterior body design of bus, *Int. J. Sci. Eng. Res.*, vol. 4, no. 7, 2453–2457
- [14] Hull, D.(2003) *An introduction to Composite Materials*, 1st ed. Barcelona: Editorial Reverté, S.A.
- [15] Bower, C. M. (1895) *Composite materials glossary*. Los Angeles: T/C PRESS
- [16] Matthews, F. L., Rawlings, R. D. (2008) *Composite Materials: Engineering and Science*. Cambridge: CRC Press
- [17] Rodríguez, J., Castro, L., del Real, J. (2006) *Procesos industriales para materiales metálicos*, 2nd ed. Visión Libros
- [18] Elías, X., (2012)*Reciclaje de residuos industriales: Residuos solidos urbanos y fangos de depuradora*, 2nd ed.
- [19] Mallick, P. K. (2008) *Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design*, 3rd ed. Boca Raton, FL.: Taylor & Francis Inc

- [20] Jones, R. M. (1999) *Mechanics of composite materials*, 2nd ed. New York: Taylor & Francis Group, LLC.
- [21] Martínez, X., Verdejo, R. (2019) *Materiales Compuestos AEMAC*, 1, vol. 3
- [22] “Panel sandwich Dibond colores (Aluminio-PE),” *Material world*, 2019. [Online]. Available: <https://www.mwmaterialsworld.com/es/panel-sandwich-dibond-colores-aluminio-pe.html>. [Accessed: 18-Jun-2019].
- [23] “panel sándwich para fachada / de aluminio / alma de polietileno,” *qnap*, 2019. [Online]. Available: <http://www.archiexpo.es/prod/qnap-qatar-national-aluminum-panel/product-149628-1661299.html>. [Accessed: 19-Jun-2019].
- [24] “etalbond ®,” *etalbond* ®, 2019. [Online]. Available: <https://www.elval-colour.com/es/products/etalbond>. [Accessed: 19-Jun-2019].
- [25] Mata Cabrera, F. (2004) Utilización de composites de matriz polimérica en la fabricación de automóviles, *Técnica Ind.* 254, 42–47
- [26] Holbery, J., Houston, D. (2006) Natural-Fiber-Reinforced Polymer Composites in Automotive Applications
- [27] Espinoza Beltrán, G. E., Hidalgo Pacheco, J. A. (2016) Caracterización de materiales compuestos para la aplicación en la carrocería del vehículo monoplace tipo Formula SAE, Universidad Politécnica Salesiana Sede Matriz Cuenca
- [28] Rourke, B. P. O. (1990) The uses of composite materials in the design and manufacture of Formula 1 racing cars, *J. Automob. Eng.*, vol. 1, no. 204, 41–48
- [29] Arriola Lara, E. A., Velásquez Martell, F. E. (2013) Evaluación técnica de

alternativas de reciclaje de poliestireno expandido ( EPS ), Universidad De El Salvador

- [30] Saltos, P. , Chango, I., Aldás, M., Quiroz, F. (2015) Reciclaje de poliestireno expandido por el método de disolución precipitación, *Rev. Politécnica*, vol. 36, no. 2, 9
- [31] Conroy, A., Halliwell, S., Reynolds, T. (2006) Composite recycling in the construction industry, *ELSEVIER*, vol. 37, 1216–1222
- [32] Yang, Y., Boom, R., Irion, B., Heerden, D., Kuiper, P., Witt, H. (2012) Recycling of composite materials, *ELSEVIER*, vol. 51, 53–68
- [33] McDougall, F. R., White, P. R., Franke, M., Hindle, P. (2008) *Integrated solid waste management a life cycle inventory*, 2nd ed. United Kindong: Blackwell Science
- [34] S. G. Ambiental, “Gestión Integral de Residuos,” *Conceptos Generales*, 2013. [Online]. Available: <http://www.sema.gob.mx/SGA-RESIDUOS-CONCEPTOS.htm>.
- [35] Tetra Pak, “Reciclaje posterior al consumo,” 2018. [Online]. Available: <https://www.tetrapak.com/mx/sustainability/recycling>. [Accessed: 12-Sep-2018].
- [36] Alavez, M.(2018) “Tetra Pak aprovecha impulso de mexicanos en mercado on the go, *El Sol De Mexico*, Ciudad de México, 10-Dec-2018.
- [37] Silva Tapia, J. D., Acosta Horna, J. E. D. (2016) Diseño de un proceso para la elaboración de placas de polialuminio, Universidad Nacional de Trujillo
- [38] Koh Dzul, J. F. (2015) Caracterización mecánica y térmica de un material compuesto tipo sándwich con núcleo particulado a partir de material reciclado,

- [39] Chan Koyoc, M. del C. (2016) Estudio del desempeño físico-mecánico de un aglomerado experimental de tetra brik reciclado expuesto a intemperismo acelerado, Centro de Investigación Científico de Yucatán
- [40] Cruz Martin, I. M. (2015) Caracterización mecánica de un material compuesto tipo sándwich reciclado del tetra brik, Instituto Tecnológico Superior De Motul
- [41] Baldan, A. (2012) Adhesion phenomena in bonded joints, *Int. J. Adhes. Adhes.*, vol. 38, 95–116
- [42] Sarmiento Rivera, C. C., Casas Rodríguez, J. P. (2012) Análisis de uniones adhesivas con base de poliuretano sometidas a cargas cuasiestáticas y cíclicas Analysis of adhesive joints with a polyurethane base under quasi static and cycle loads ., *Sci. Tech.*, no. 52, 44–49
- [43] Banea, M. D., Da Silva, L. F. M. (2009) Adhesively bonded joints in composite materials: An overview, *Proc. Inst. Mech. Eng. Part L J. Mater. Des. Appl.*, vol. 223, no. 1, 1–18
- [44] Weigraeber, P. , Stein, N., Becker, W. (2014) A general sandwich-type model for adhesive joints with composite adherends, *Int. J. Adhes. Adhes.*
- [45] Askeland, D. R. (1998) *Ciencia e Ingeniería de los Materiales*, 3rd ed. Distrito Federal: Argueta Garay, René
- [46] Askeland, D. R. (2001) *Ciencia e ingeniería de materiales*, 6th ed.
- [47] Kumlutas, D., Tavman, I. H., Turhan Coban, M. (2003) Thermal conductivity of

particle filled polyethylene composite materials, *ELSEVIER*, vol. 63, 113–117

- [48] Way, F., Examiner, P. , Deb, A. (2007) Systems and methods for inspecting electrical conductivity in composite materials, US 7,312.608 B2
- [49] Nocedal, J., Wright, S. J. (2006) *Numerical Optimization*, Second. United States of America: Springer
- [50] Papalambros, P., Wilde, D. (2000) *Principles of optimal design*, Second Edi. Cambridge: The Press Syndicate Of The University Of Cambridge
- [51] Stegmann, J., Lund, E. (2009) Discrete material optimization of general composite shell structures, *Int. J. Numer. Methods Eng.*, no. February 2005, 2009–2027
- [52] Hibbeler, R. (2010) *Ingeniería mecánica estática*, 12th ed. Estado de México: Pearson Educación
- [53] Pozrikidis, C. (2009) *Fluid dynamics: Theory, Computation, and Numerical Simulation*, 2nd ed. New York: Springer
- [54] Mozota Azcutia, A. (2011) *Gestion tecnica trafico*
- [55] Fletcher, C. A. J., Stewart, G. D. H. (1986) Bus drag reduction by the trapped vortex concept for a single bus and two buses in tandem, *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 24, 143–168
- [56] Lanfrit, M. (2005) Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT, vol. 2. 1–14
- [57] Kuzmin, D. Computational Domain Selection for CFD Simulation. p. 34.

- [58] Matsson, J. E. (2010) *An Introduction to SolidWorks Flow Simulation 2010*, 1st ed. United States of America: SDC PUBLICATIONS
- [59] ASTM, "Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives ( T-Peel Test )," D 1876-00, 2001.
- [60] Barnes, T. A., Pashby, I. R. (2000) Joining techniques for aluminium spaceframes used in automobiles Part II ð adhesive bonding and mechanical fasteners, vol. 99, 72–79
- [61] ASTM, "Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials," D 3039/D 3039M-00, 2002.
- [62] ASTM, "Standard Test Method for Flexural Properties of Sandwich Constructions," C 393-00, 2000.
- [63] ASTM, "Standard Test Method for Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus," C 518-02, 2002.
- [64] ASTM, "Standard Test Method for Resistivity of Electrical Conductor Materials," B 193-02, 2002.
- [65] Sánchez Cuevas, C. I. (2018) Instrumentación e integración de un sistema fotovoltaico en un vehículo eléctrico para maximizar el rendimiento de energía, Centro de Investigación Científico de Yucatán
- [66] Joost, W. J. (2012) Reducing Vehicle Weight and Improving U . S . Energy Efficiency Using Integrated Computational Materials Engineering, *Springer*, vol. 64, no. 9, 1032–1038

- [67] Haider, A., Levenspiel, O. (1989) Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonspherical particles, *Powder Technol.*, vol. 58, 63–70
- [68] Carrillo, J. G., Moo-Tec, J. A., Gamboa, R. A. (2014) Novel Sandwich Composite with Recycled Multilayer Carton Core and Aluminum Facings, vol. 1611, 7–12
- [69] Borjas, J. (2018) Estudio y desarrollo de nanocompósitos con conductividad térmica mejorada basados en polietileno de alta densidad obtenidos por la incorporación vía mezclado en fundido de partículas de grafito y nitruro de boro tratadas en plasma de etileno, Centro de Investigación en Química Aplicada
- [70] Palacio, A. G. (2005) *Caracterización y manejo de los suelos de la Península de Yucatán*, Ilustrada. Campeche: Instituto Nacional de Ecología
- [71] ASTM, “Standard Test Method for Shear Fatigue of Sandwich Core,” C 394-00, 2000.

## Anexo A: CODIGOS DE OPTIMIZACIÓN

### Esfuerzo de cedencia:

```
function fobja=funobja(ga)
Sag=10.56; %Esfuerzo de cedencia del aglomerado (MPa)
Sal=118.67; %Esfuerzo de cedencia del aluminio (MPa)
fobja=-((ga/(ga+0.6))*Sag+(0.6/(ga+0.6))*Sal);

clear all
clc

li=[2]; %Grosor mínimo para el aglomerado en (mm)
ls=[10]; %Grosor máximo para el aglomerado en (mm)
A=[];
B=[];
Ae=[];
Be=[];
PO=[5]; %Grosor semilla
[Pot]=fmincon(@funobja,PO,A,B,Ae,Be,li,ls)

kmax=(Pot+0.6)/((Pot/0.26)+(0.6/209.3))
```

### Conductividad térmica:

```
function fobjb=funobjb(gb)
kag=0.26; %Conductividad térmica del aglomerado (W/m.k)
kal=209.3; %Conductividad térmica del aluminio (W/m.k)
fobjb=(gb+0.6)/((gb/kag)+(0.6/kal));

clear all
clc

li=[2]; %Grosor mínimo para el aglomerado en (mm)
ls=[10]; %Grosor máximo para el aglomerado en (mm)
A=[];
B=[];
Ae=[];
Be=[];
PO=[5]; %Grosor semilla
[Pot]=fmincon(@funobjb,PO,A,B,Ae,Be,li,ls)

Smax=(Pot/(Pot+0.6))*10.56+(0.6/(Pot+0.6))*118.67
```



## **Función objetivo:**

```
function fobj=funobj(g)
Miu1=0.6; %valores de Miu, asociados al peso de cada factor para la
ecuación de optimización (Miu1+Miu2=1)
Miu2=0.4; %valores de Miu, asociados al peso de cada factor para la
ecuación de optimización (Miu1+Miu2=1)
Smax=16.6794; %Ecuación de optimización previa "a" para la normalización
de la función objetivo
kmax=0.3379; %Ecuación de optimización previa "b" para la normalización
de la función objetivo
S=-((g/(g+0.6))*10.56+(0.6/(g+0.6))*118.67); %Esfuerzo de cedencia (MPa),
primera partede la ecuación aporte del aglomerado, segunda parte de la
ecuación aporte del aluminio (0.6 grosor fijo del aluminio)
k=(g+0.6)/((g/0.26)+(0.6/209.3)); %Conductividad térmica (W/m.k),
Conductividad del aglomerado y conductividad del aluminio (0.6 grosor
fijo del aluminio)
fobj=-Miu1*S^2/Smax+Miu2*k^2/kmax;

clear all
clc

li=[2]; %Grosor mínimo para el aglomerado en (mm)
ls=[10]; %Grosor máximo para el aglomerado en (mm)
A=[];
B=[];
Ae=[];
Be=[];
PO=[5]; %Grosor semilla
[Pot]=fmincon(@funobj,PO,A,B,Ae,Be,li,ls)
```