

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Mecánica

Trabajo de Investigación

**Diseño de deflectores para la reducción de la  
resistencia aerodinámica en la locomotora GT42AC  
utilizando dinámica de fluidos computacional**

Jesus Alberto Domenique Zea  
Yolaos Sammir Chávez Delgado

Para optar el Grado Académico de  
Bachiller en Ingeniería Mecánica

Arequipa, 2020

Repositorio Institucional Continental  
Trabajo de investigación



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradecemos a Dios por el día a día que nos brinda, además de darnos las oportunidades de obtener una profesión culminada y poder ejercerla con la responsabilidad y eficiencia impartida en los años de preparación.*

*Agradecemos a los ingenieros de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica, por impartirnos de sus conocimientos, experiencias y sobre todo de su compromiso hacia nosotros por culminar nuestros estudios como verdaderos profesionales.*

*Agradecemos a la Universidad Continental por comprometerse y brindarnos a los mejores profesionales para nuestra enseñanza.*

*Los autores.*

## **DEDICATORIA**

*Dedicamos este trabajo de investigación a la memoria de Eron Félix Delgado Cerpa por ser nuestro apoyo en la recolección de datos y conocimientos del tema, además de los consejos, técnicas y enseñanza brindadas desde el inicio del proyecto de investigación. También queremos agradecer a nuestros padres por su apoyo incondicional de nuestra trayectoria académica.*

*Dominique Zea, Jesús Alberto y Chávez Delgado, Yolaos Sammir*

# ÍNDICE DE CONTENIDOS

<b>AGRADECIMIENTO</b>	<b>ii</b>
<b>DEDICATORIA</b>	<b>iii</b>
<b>RESUMEN</b>	<b>xvi</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>xvii</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	<b>xviii</b>
<b>CAPÍTULO I PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO</b>	<b>20</b>
1.1 Planteamiento y formulación del problema	20
1.2 Problemas	24
1.2.1 Problema general	24
1.2.2 Problema específicos	24
1.3 Objetivos	24
1.3.1 Objetivo General	24
1.3.2 Objetivos Específicos	24
1.4 Justificación e importancia	25
1.4.1 Justificación práctica	25
1.4.2 Justificación metodológica	25
1.4.3 Justificación económica	26
1.4.4 Justificación ambiental	26
<b>CAPÍTULO II</b>	<b>27</b>
<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>27</b>
2.1 Antecedentes del problema	27
2.1.1 Antecedentes internacionales	27
Segundo antecedente	27
Tercer antecedente	28

Cuarto antecedente	28
Quinto antecedente	29
Sexto antecedente	29
Séptimo antecedente	30
Octavo antecedente	31
Noveno antecedente	32
Décimo antecedente	32
2.2 Bases Teóricas	33
2.2.1 Principales parte de las locomotoras	33
2.2.2 Diseño de deflectores	37
2.2.3 Resistencia aerodinámica en locomotoras y difusores	39
2.2.4 Problemas de resistencia aerodinámicas en la locomotora GT42AC	45
2.2.5 Dinámica de fluidos computacional	46
2.3 Definición de términos básicos	46
<b>CAPÍTULO III</b>	<b>48</b>
<b>METODOLOGÍA</b>	<b>48</b>
3.1 Tipo de Investigación	48
3.2 Alcance de la investigación	48
3.2 Metodología aplicada para el desarrollo de la solución	49
<b>CAPÍTULO IV</b>	<b>51</b>
<b>ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN</b>	<b>51</b>
4.1 Estado del arte	51
4.1.1 Diagnóstico situacional	51
4.2 Diagramas de estructura de funciones	56
4.2.1 Caja Negra	56
4.2.2 Diagrama de funciones	57

4.3 Listas de exigencias	58
4.5 Matriz Morfológica	61
4.5.1 Descripción de los conceptos de solución	63
4.5.1.1 Concepto de solución N°1	63
4.5.1.2 Concepto de solución N°2	64
4.5.1.3 Concepto de solución N°3	65
4.5.1.4 Concepto de solución N°4	66
4.6 Evaluación Técnica	67
4.7 Evaluación Económica	68
4.8 Modelado locomotora GT42AC	70
4.9 Datos ambientales para simulaciones	70
4.10 Cálculo de Área	71
4.11 Cálculo de Densidad	72
4.11.1 Pillones	72
4.11.2 Arequipa	72
4.11.3 Matarani	72
4.12 Cálculo de Viscosidad Cinemática	72
4.12.1 Pillones	72
4.12.2 Arequipa	73
4.12.3 Matarani	73
4.13 Simulación de locomotora GT42AC	73
4.13.1 Simulación a condiciones ambientales de Pillones	73
4.13.2 Simulación a condiciones ambientales de Arequipa	74
4.13.3 Simulación a condiciones ambientales de Matarani	75
4.14 Cálculos Teóricos	75
4.14.1 Cálculo teórico de Coeficiente de arrastre	76

4.14.2 Cálculo teórico de Coeficiente de sustentación	76
4.14.3 Cálculo teórico de Eficiencia Aerodinámica	77
4.14.4 Cálculo del Número de Reynolds	78
4.14.5 Calculo de la Potencia de Arrastre Aerodinámico	79
4.9 Diseño de Deflectores de Estudio	80
4.9.1 Deflector frontal 01	81
4.9.2 Deflector frontal 02	85
4.9.3 Deflector superior de cabina	89
<b>CAPÍTULO V</b>	<b>93</b>
<b>SIMULACIÓN</b>	<b>93</b>
5.1 Simulación para primera alternativa de solución	93
5.1.1 Modelado locomotora GT42AC	93
5.1.2 Cálculo de Área	93
5.1.3 Cálculo de Densidad	93
5.1.4 Simulación de locomotora GT42AC (1ra propuesta)	94
5.1.5 Cálculos Teóricos	96
5.2 Simulación para segunda alternativa de solución	99
5.2.1 Modelado locomotora GT42AC	99
5.2.2 Cálculo de Área	99
5.2.3 Cálculo de Densidad	100
5.2.4 Simulación de locomotora GT42AC	100
5.2.5 Cálculos Teóricos	102
5.2.5.3 Cálculo teórico de Eficiencia Aerodinámica (segundo modelo)	104
5.3 Tabla de balance de resultados por estaciones	105
5.3.1 Tabla Pillones	105
5.3.2 Tabla Arequipa	106

5.3.2 Tabla Matarani	106
5.3.3 Análisis de resultados	106
5.3.5 Material a utilizar	108
5.3.6 Tipo de Anclaje	112
5.3.7 Producto Comercial	113
<b>CONCLUSIONES</b>	<b>114</b>
<b>TRABAJOS FUTUROS</b>	<b>115</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	<b>116</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>120</b>
<b>Anexo 1. Frontis de la locomotora.</b>	<b>120</b>
<b>Anexo 2. Prueba de carga de la locomotora GT42AC.</b>	<b>121</b>
<b>Anexo 3. Lista de abreviaturas.</b>	<b>122</b>
<b>Anexo 4. Guía de la locomotora GT42AC.</b>	<b>cxxiii</b>
<b>Anexo 5. Guía de Inspección la locomotora GT42AC.</b>	<b>cxxiv</b>
<b>Anexo 6. Manual del operador de la locomotora GT42AC.</b>	<b>cxxv</b>
<b>Anexo 7. Guía de operación y solución de problemas del sistema EMDEC (locomotora GT42AC).</b>	<b>cxxvi</b>
<b>Anexo. Planos</b>	<b>cxxvii</b>
<b>Anexo 8. Planos de difusor frontal</b>	<b>cxxviii</b>
<b>Anexo 9. Planos del difusor superior de la cabina</b>	<b>cxxix</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Especificaciones de locomotora GT42AC .....	22
Tabla 2 Especificaciones de locomotora GT42AC .....	22
Tabla 3 Especificaciones de locomotora GT42AC .....	22
Tabla 4 Leyenda para los conceptos de solución. ....	62
Tabla 5. Resumen de valor técnico y valor económico para las alternativas de solución.....	69
Tabla 6. Parámetros Ambientales. Ruta de la locomotora GT24A. ....	70
Tabla 7. Resultados del modelo original. SOLIDWORKS. características Pillones .....	74
Tabla 8. Resultados del modelo original. SOLIDWORKS. características Arequipa. ....	74
Tabla 9. Resultados del modelo original. SOLIDWORKS. características Matarani.....	75
Tabla 10. Datos obtenidos mediante simulación CFD. (Modelo Original).....	75
Tabla 11. valores de numero de Reynolds y eficiencia aerodinámica. ....	79
Tabla 12. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Pillones .....	83
Tabla 13. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Arequipa .....	83
Tabla 14. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Matarani.....	83
Tabla 15. Tabla de resultados 1er difusor (SolidWorks).....	84
Tabla 16. Tabla de resultados deflector 2 Solid Word. Pillones .....	87
Tabla 17. Tabla de resultados deflector 2 Solid Word. Arequipa .....	87
Tabla 18. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Matarani.....	87
Tabla 19. Tabla de resultados 2do difusor (SolidWorks).....	88
Tabla 20. Tabla de resultados deflector superior de la cabina Solid Word. Pillones .....	90
Tabla 21. Tabla de resultados deflector superior de la cabina Solid Word. Arequipa .....	91
Tabla 22. Tabla de resultados deflector superior de la cabina Solid Word. Matarani.....	91
Tabla 23. Tabla de resultados deflector superior de la cabina. ....	91

Tabla 24. Resultados del ensamble propuesta de solución 1. SOLIDWORKS características Pillones.....	94
Tabla 25. Resultados del ensamble propuesta de solución 1. SOLIDWORKS características Arequipa.....	95
Tabla 26. Resultados del ensamble propuesta de solución 1. SOLIDWORKS características Matarani. ....	95
Tabla 27. Datos obtenidos mediante simulación CFD. ....	96
Tabla 28. Resultados del ensamble propuesta de solución 2. SOLIDWORKS características Pillones.....	100
Tabla 29. Resultados del ensamble propuesta de solución 2. SOLIDWORKS características Arequipa.....	101
Tabla 30. Resultados del ensamble propuesta de solución 2. SOLIDWORKS características Matarani. ....	101
Tabla 31. Datos obtenidos mediante simulación CFD. ....	102
Tabla 32. Balance de resultados de la estación Pillones (modelo original) (solucion1) (solución2).....	105
Tabla 33. Tabla 34. Balance de resultados de la estación Arequipa (modelo original) (solucion1) (solución2).....	106
Tabla 35. Tabla 36. Balance de resultados de la estación Matarani (modelo original) (solucion1) (solución2).....	106
Tabla 37. Valores promedios de la ruta en general. (modelo original) .....	106
Tabla 38. Valores promedios de la ruta en general. (modelo 1).....	106
Tabla 39. Valores promedios de la ruta en general. (modelo 2).....	107
Tabla 40. Propiedades físicas del aluminio serie 3003.....	109
Tabla 41. Composición química del aluminio serie 3003. ....	109
Tabla 42. Propiedades mecánicas del aluminio serie 3003. ....	109
Tabla 43. Propiedades térmicas del aluminio serie 3003. ....	110
Tabla 44. Propiedades físicas del aluminio serie 6061.....	111
Tabla 45. Disponibilidad para Procesos térmicos aluminio serie 6061.....	111
Tabla 46. Composición química del aluminio serie 6061. ....	111
Tabla 47. Propiedades térmicas del aluminio serie 6061 .....	112
Tabla 48. Propiedades eléctricas del aluminio serie 6061.....	112
Tabla 49. Tabla de selección para el material de aporte.....	112

Tabla 50. Costo de Diseño.....	113
Tabla 51. Costos de elementos comerciales. ....	113
Tabla 52. Costos de fabricación de elementos diseños. ....	113
Tabla 53. Resumen de costos. ....	113

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Ruta de la locomotora GT42AC (Arequipa-Pillones-Arequipa-Matarani-Arequipa). .....	20
Figura 2 Clasificación de la función de velocidad máxima permisible por sección o tramos. Nota. Tomado de “Reglamento Nacional de Ferrocarriles" N° 002-2006-PRODUCE/DNEPP .....	21
Figura 3 Locomotora GT42AC en su ruta Pillones – Matarani. Nota. Tomada de <a href="https://rail.pictures/pictures/large/27058.jpg">https://rail.pictures/pictures/large/27058.jpg</a> .....	23
Figura 4. Bastidor de Bogíes o chasis del tren. Nota. Tomada de: <a href="https://www.iscarib.es/newarticles.aspx/countryid/14/newarticleid/2731">https://www.iscarib.es/newarticles.aspx/countryid/14/newarticleid/2731</a> .....	33
Figura 5. Sistema de suspensión SGP-VT para locomotora de carga. Nota. Tomado de: <a href="https://www.sim-impex.com/index.php/es/productos/industria-ferroviaria/material-rodante/231-sistemas-de-suspension">https://www.sim-impex.com/index.php/es/productos/industria-ferroviaria/material-rodante/231-sistemas-de-suspension</a> .....	34
Figura 6. Motores de tracción. Nota. Tomado de: <a href="https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/MotoresEl%C3%A9ctricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tensi%C3%B3n/L%C3%ADneas-Dedicadas/Tracci%C3%B3n-El%C3%A9ctrica/Locomotoras/MotoresTracci%C3%B3n/p/MKT_WEN_TRACTION">https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/MotoresEl%C3%A9ctricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tensi%C3%B3n/L%C3%ADneas-Dedicadas/Tracci%C3%B3n-El%C3%A9ctrica/Locomotoras/MotoresTracci%C3%B3n/p/MKT_WEN_TRACTION</a> .....	35
Figura 7. Motor 710-1985. Nota. Tomada de: “GT42AC RESUMEN DE LOS SISTEMAS MECANICOS” .....	36
Figura 8. Alternador acoplado a motor de locomotora <a href="https://www.railpictures.net/viewphoto.php?id=88115&amp;showexif=1">https://www.railpictures.net/viewphoto.php?id=88115&amp;showexif=1</a> .....	37
Figura 9. Diseño de deflectores para vehículos pesados .....	38
Figura 10. Locomotora de carga NdM – 3034 con difusores.....	38
Figura 11. Parte frontal de la locomotor GT42AC. Fuente propia.....	39
Figura 12. Flujo turbulento y laminar. Nota. Tomado de: “Yunus Cengel 1 <sup>ra</sup> Edición Mecánica de Fluidos”.....	41
Figura 13. Indicadores del coeficiente de arrastre para un Re turbulento. Nota: tomado de “Yunus Cengel 1 <sup>ra</sup> Edición Mecánica de Fluidos” .....	43
Figura 14. Indicadores del coeficiente de arrastre para un Re turbulento. Nota: tomado de “Yunus Cengel 1 <sup>ra</sup> Edición Mecánica de Fluidos” .....	44
Figura 15. Locomotora de carga GT42AC.....	46

Figura 16. Proceso de investigación aplicada para mejorar el conocimiento. Nota: tomado de la revista científica Dialnet “Investigación aplicada, definición, propiedad Intelectual e Industria” .....	49
Figura 17. Análisis climatológico de la ciudad de Arequipa. Nota. Tomado de: <a href="https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375/">https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375/</a> .....	51
Figura 18. Análisis climatológico de la ciudad de Matarani. Nota. Tomado de: <a href="https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375/">https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375/</a> .....	52
Figura 19. Análisis climatológico de la ciudad de Pillones. Nota. Tomado de: <a href="https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375">https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375</a> .....	52
Figura 20 Diagrama de funcionamiento del sistema de una locomotora diesel eléctrica. Nota: Tomado de la investigación análisis de funcionamiento del grupo motor-alternador mg 138a-f análisis de averías y propuesta de soluciones de Miguel Martínez García-Denche .....	53
Figura 21 Partes complementarias para la reducción del coeficiente de arrastre en camiones. Nota : Tomado de la investigación Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis.....	54
Figura 22 Simulación aerodinámica de camión. Nota: Tomado de la investigación Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD análisis .....	55
Figura 23 Diagrama de funciones.....	57
Figura 24 Concepto de solución n°1 .....	63
Figura 25 Concepto de solución N°2 .....	64
Figura 26 Concepto de solución N°3 .....	65
Figura 27 Concepto de solución N°4 .....	66
Figura 28 Gráfica de evaluación para la selección de alternativa de solución ..	69
Figura 29. Modelado de la locomotora GT42AC (SolidWorks)- modelo original .....	70
Figura 30. Malla del modelo original (simulación SolidWorks).....	70
Figura 31. Sección proyectada del área frontal de la locomotora GT42AC .....	71
Figura 32. Simulación locomotora modelo original condiciones Pillones.....	73
Figura 33. Simulación locomotora modelo original condiciones Arequipa.....	74
Figura 34. Simulación locomotora modelo original condiciones Matarani .....	75
Figura 35. Alternativa de solución 1 – deflector zona frontal [ Tipo 1].....	81

Figura 36. Área de la vista frontal, deflector [Tipo 1].....	81
Figura 37. Simulación (deflector 1 parte frontal) vista Isométrica. En función a la presión y velocidad.....	82
Figura 38. Simulación (deflector 1 parte frontal) vista lateral. En función a la velocidad.....	82
Figura 39. Alternativa de solución 2 – deflector zona frontal [ Tipo 2].....	85
Figura 40. Área de la vista frontal, deflector [Tipo 2].....	85
Figura 41. Simulación (deflector 2 parte frontal) vista Isométrica. En función a la presión y velocidad.....	86
Figura 42. Simulación (deflector 2 parte frontal) vista lateral. En función a la velocidad.....	86
Figura 43. Alternativa de solución – deflector zona superior cabina .....	89
Figura 44. Área de la vista frontal, deflector superior cabina .....	89
Figura 45. Simulación (deflector parte superior cabina) vista Isométrica. En función a la presión y velocidad.....	89
Figura 46. Simulación (deflector parte superior cabina) vista lateral. En función a la velocidad.....	90
Figura 47 Modelo de deflector frontal seleccionado .....	108
Figura 48 Modelo de deflector superior seleccionado .....	108
Figura 49 Planos de fabricación para deflector frontal .....	cxxviii
Figura 50 Plano de fabricación deflector superior .....	cxxix

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1. Área Frontal .....	39
Ecuación 2. Densidad .....	40
Ecuación 3. Presión .....	40
Ecuación 4. Número de Reynolds .....	41
Ecuación 5. Viscosidad cinemática .....	42
Ecuación 6. Fuerza de arrastre.....	42
Ecuación 7. Coeficiente de arrastre .....	43
Ecuación 8. Potencia de arrastre.....	44
Ecuación 9. Coeficiente de sustentación .....	45
Ecuación 10. Eficiencia Aerodinámica .....	45
Ecuación 11 Cálculo de área de sección frontal.....	71

## RESUMEN

El presente trabajo de investigación es de tipo tecnológico además que se busca un alcance aplicativo para determinar cuan efectivo será su implementación, la metodología aplicada para el desarrollo será la VDI 2222 Y VDI 2221 con sus cuatro y siete pasos podremos obtener lo esperado. Buscamos la reducción de cargas aerodinámicas en la locomotora GT 42 AC, ya que esta máquina utilizada para el transporte de mineral en su ruta, (Arequipa- Pillones- Arequipa – Matarani- Arequipa) presenta una cierta cantidad de complicaciones por su forma estructural frontal. Los coeficientes de arrastre y sustentación, la eficiencia aerodinámica, la fuerza y potencia de arrastre son lo que se busca hallar y determinar con la ayuda de la dinámica de fluidos computacional (CFD), una vez determinando el comportamiento aerodinámico en las tres distintas estaciones se plantea la fabricación de difusores, teniendo en cuenta el ángulo de enfrentamiento a usar, ya que esta selección será clave para obtener una reducción de los factores ya mencionados, con cálculos y simulaciones se lograra obtener una solución óptima y que presente como resultados la disminución de: fuerzas de arrastre, coeficientes de arrastre y sustentación y por último la reducción de la potencia que tendrá que ser ejercida por el motor siendo este capaz de vencer las fuerza aerodinámicas en contra y cumplir con el objetivo de una mejora en la eficiencia y un menor consumo de combustible, además del aumento de la eficiencia aerodinámica. Una vez logrando los objetivos planteados se busca el material para su fabricación, dicho material debe cumplir con diferentes cualidades ya que el cambio de clima, temperatura y altitud son perjudiciales para ciertos metales ferroso y no ferrosos y por último determinar los puntos de anclaje donde deberá de instalarse los difusores, permitiendo una sólida estructura y que no produzca peligro alguno con los operarios.

**Palabras Clave:** Aerodinámica, difusores, fuerza de arrastre, potencia de arrastre y dinámica de fluidos computacional.

## ABSTRACT

This research work is of a technological nature, in addition to seeking an applicative scope to determine how effective its implementation will be, the methodology applied for the development will be the VDI 2222 AND VDI 2221 with its four and seven steps we will be able to obtain what is expected. We seek the reduction of aerodynamic loads in the GT 42 AC locomotive, since this machine used to transport ore on its route (Arequipa- Pillones- Arequipa - Matarani-Arequipa) presents a certain number of complications due to its frontal structural shape. Drag and lift coefficients, aerodynamic efficiency, drag force and power are what is sought to be found and determined with the help of computational fluid dynamics (CFD), once the aerodynamic behavior in the three different stations is determined. proposes the manufacture of diffusers, taking into account the angle of confrontation to be used, since this selection will be key to obtain a reduction of the factors already mentioned, with calculations and simulations it will be possible to obtain an optimal solution and that presents as results the reduction of : drag forces, drag and lift coefficients and finally the reduction of the power that will have to be exerted by the engine, being able to overcome the aerodynamic forces against and meet the objective of an improvement in efficiency and a lower fuel consumption, in addition to increased aerodynamic efficiency. Once the proposed objectives are achieved, the material is sought for its manufacture, said material must comply with different qualities since the change in climate, temperature and altitude are detrimental to certain ferrous and non-ferrous metals and finally determine the anchor points where it must to install the diffusers, allowing a solid structure and that does not produce any danger with the operators.

**Keywords:** Aerodynamics, diffusers, drag force, drag power and computational fluid dynamics.

# INTRODUCCIÓN

El uso de locomotoras de carga aún tiene un grado de importancia muy elevado en nuestro país, desde el punto de vista de la cantidad de carga que este puede transportar, hasta la seguridad de los trabajadores y de la propia carga. Como un país rico en minerales y abundantes minas, se envía hacia el exterior la materia prima que es extraída y esta es devuelta como producto terminado. Para que el servicio ferroviario sea óptimo se plantea el diseño de deflectores para la reducción de la resistencia aerodinámica en la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional. Apoyados en los avances tecnológicos podemos determinar mediante simulaciones de CFD, cómo la locomotora enfrenta las cargas aerodinámicas en su trayecto (Pillones-Arequipa-Matarani), además de poder determinar dónde se requieren los difusores para mejorar la eficiencia, disminuir el consumo del combustible, y poder mejorar el modelo aerodinámico de la máquina. En el contexto señalado, el objetivo de este trabajo es diseñar y construir modelos de difusores teniendo como principales puntos el material que los constituirá, el ángulo de posicionamiento para el ataque del flujo de aire y por último el tipo de sujeción a la locomotora sin afectar la visualización de los operarios. Para cumplir con el objetivo planteado, el presente trabajo fue distribuido por cinco capítulos. En el primer capítulo se presenta: el planteamiento del estudio, este engloba al planteamiento y formulación del problema en la actualidad, los objetivos que se buscan alcanzar mediante el tiempo de trabajo y como parte final del capítulo uno están las justificaciones del porqué se debe realizar el siguiente trabajo de investigación. En el segundo capítulo, está determinado por el marco teórico. Este comprende los estudios relacionados al problema que será trabajado además de las bases teóricas fundamentales para la obtención de cálculos que podrán determinar la factibilidad de la investigación y por último la definición de términos básicos para la ayuda de los lectores a entender los términos técnicos y que se desconocen respecto a la locomotora, programas de simulación y temas como mecánica de fluidos avanzada, elementos de máquinas, etc. En el tercer capítulo, se muestra la metodología aplicada para el desarrollo de la solución, mediante la cual se logra

describir los procesos que se realizaran para el diseño de deflectores además del uso de las normas VDI2221 – VDI 2222 y como será posible finalizar el trabajo de investigación. En el cuarto capítulo, ya se analiza y se genera el diseño de la solución, para ello se hace una breve identificación de los requerimientos, una vez determinados se procede al análisis de la solución mediante simulaciones y cálculos que tengan una relación, por último, se cumple con los objetivos planteados se aprueba su diseño. En el quinto capítulo, esta como paso final la construcción de los difusores ya que se valida su funcionamiento y su cumplimiento de objetivos planteados. Como cierre se realizan pruebas y se buscan resultados de los ya instalados difusores de reducción de cargas aerodinámicas. Para finaliza el informe se presenta las conclusiones y recomendaciones para trabajos futuros.

# CAPÍTULO I

## PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

### 1.1 Planteamiento y formulación del problema

La industria ferroviaria es muy solicitada a nivel mundial en la actualidad, aun cuando existe una gran gama de opciones de vehículos de transporte, los trenes siguen liderando el transporte de cargas pesadas y de grandes volúmenes por tierra. En el Perú las vías ferroviarias son el ferrocarril del centro del Perú y ferrocarril del sur del Perú operados por FVCA y PERURAIL respectivamente. Como sabemos hoy en día la tecnología crece a pasos agigantados, es por esta razón que nosotros como país en vías de desarrollo nos vemos en la necesidad de actualizarnos cada vez más en nuestras técnicas y procesos.



*Figura 1 Ruta de la locomotora GT42AC (Arequipa-Píllones-Arequipa-Matarani-Arequipa).*

Uno de los sectores económicos más importantes del país alcanzando casi el 10% del PBI en 2018 fue la minería y representó el 61% del valor de todas las exportaciones a nivel país (MINEM,2019), esta industria requiere de métodos masivos para el transporte de los minerales extraídos hacia su disposición final en fundiciones o puertos. En el caso de Arequipa el concentrado de cobre extraído de

Cerro Verde el cual es muy cotizado en el mercado internacional es exportado por el puerto de Matarani al igual que el concentrado de cobre de las Bambas (Ayacucho) dónde su traslado se da por medio de trenes. Las locomotoras utilizadas en estos transportes son capaces de remolcar hasta 1300 toneladas y tienen como máximo de carga 20 ton/eje debido a la infraestructura ferroviaria.

La locomotora GT42AC en su trayecto de PILLONES – MATARANI usualmente conocida como la 800 es exclusiva para el transporte de mineral debido a su potencia de 3250 HP. También como se tiene el conocimiento de las velocidades que esta alcanza (Figura 2), Velocidad máxima de 40 a 35 Km/h (línea recta) y una Velocidad mínima de 20 a 25 Km/h (curvas y pendientes negativas) con carga. Uno de los datos más importantes y relevantes es el consumo de combustible ya que dependiendo a su capacidad de 5000 Litros (tabla 3), esta consume alrededor de 4800 a 4900 Litros de combustible (Diesel) en su tramo (figura 1) Arequipa – Pillones – Arequipa – Matarani – Arequipa cumpliendo una ruta de aproximadamente 450 km, luego debe volver a repostar combustible en Arequipa para terminar su ruta.

**Por la Máxima Velocidad de Operación Permisible:**

Se clasifican en función de la velocidad máxima permisible por secciones o tramos, en la forma siguiente:

Clase de Vía	Máxima Velocidad de Operación Permitida	
	Trenes de Mercancías (Km/Hora)	Trenes de Pasajeros (Km/Hora)
1	16	24
2	40	48
3	64	96
4	96	128
5	128	144

*Figura 2 Clasificación de la función de velocidad máxima permisible por sección o tramos. Nota. Tomado de "Reglamento Nacional de Ferrocarriles" N° 002-2006-PRODUCE/DNEPP*

Un factor relevante sobre el consumo de combustible está relacionado a la procedencia de las locomotoras siendo estas americanas (USA) su diseño y especificaciones están dadas según a su lugar de origen, sin embargo, las condiciones geográficas del Perú son muy variables en comparación a las de Estados Unidos (USA), dando saltos de altura desde los 0 msnm hasta los 4700 msnm originando un escenario de trabajo no concebido en su diseño original, es por esto por lo que el consumo y la eficiencia que tiene esta locomotora no son aprovechadas al máximo.

*Tabla 1 Especificaciones de locomotora GT42AC*

Potencia	Velocidad máx.	Esfuerzo tracción de arranque	Esfuerzo tracción continua	Esfuerzo de frenado DB
<i>HP</i>	<i>km/h</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>	<i>kN</i>
3250	120	500	470	284

*Nota:* Tomada de manual resumen de sistemas mecánicos Electro-Motive, Inc 2015

*Tabla 2 Especificaciones de locomotora GT42AC*

<i>Peso</i>	<i>Longitud</i>	<i>Ancho</i>	<i>Alto</i>	<i>Ruedas</i>
<i>Ton</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>m</i>	<i>mm</i>
132.28	20.3	2.9	4.2	1067

*Nota:* Tomada de manual resumen de sistemas mecánicos Electro-Motive, Inc 2015

*Tabla 3 Especificaciones de locomotora GT42AC*

<i>Combustible</i>	<i>Aceite</i>	<i>Agua</i>	<i>Arena</i>
<i>Litros</i>	<i>Litros</i>	<i>Litros</i>	<i>Litros</i>
5000	624	1030	238

*Nota:* Tomada de manual resumen de sistemas mecánicos Electro-Motive, Inc 2015

Los fabricantes de trenes actualmente se encuentran enfocados en la producción de trenes más veloces y con mejores prestaciones aerodinámicas para el sector de transporte de personas, pero el sector de transporte de mercancías no ha sido atendido de igual manera, lo que da un punto importante de partida para poder investigar acerca de las prestaciones aerodinámicas de los trenes de mercancías, específicamente las locomotoras como agente motriz del conjunto de vagones y ser la parte del tren que enfrenta en primera instancia la resistencia del aire. El consumo de combustible de los trenes de mercancías es elevado pero comparado con el consumo de combustible con camiones por tonelada-kilómetro [Ton-Km] la eficiencia es muy superior siendo su equivalente hasta 30 camiones por una locomotora. La optimización de las fuerzas aerodinámicas de las locomotoras sumadas a su rendimiento como medio de transporte podrían resultar una gran alternativa de transporte no sólo para minería sino para la industria en general, además de disminuir la huella de impacto ambiental.



*Figura 3 Locomotora GT42AC en su ruta Pillones – Matarani. Nota. Tomada de <https://rail.pictures/pictures/large/27058.jpg>*

## **1.2 Problemas**

### **1.2.1 Problema general**

- ¿Cómo diseñar deflectores para la reducción de la resistencia aerodinámica en la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional?

### **1.2.2 Problema específicos**

- ¿Qué materiales y tipo de sujeción deberían utilizarse para la fabricación de los deflectores para la locomotora GT42AC?
- ¿Qué ángulo de enfrentamiento deben tener los deflectores para la locomotora GT42AC?
- ¿Cuáles son las fuerzas de arrastre, los coeficientes de arrastre y las potencias de arrastre del modelo original y del modelo con deflectores para la locomotora GT42AC?

## **1.3 Objetivos**

### **1.3.1 Objetivo General**

- Diseñar deflectores para la reducción de la resistencia aerodinámica en la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

- Determinar qué materiales y tipos de sujeción deberían utilizarse para la fabricación de los deflectores para la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional.
- Determinar qué ángulo de enfrentamiento deben tener los deflectores para la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional.

- Determinar las fuerzas de arrastre, los coeficientes de arrastre y las potencias de arrastre del modelo original y del modelo con deflectores para la optimizar las cargas aerodinámicas en la locomotora GT42AC.

## **1.4 Justificación e importancia**

### **1.4.1 Justificación práctica**

La motivación de esta investigación es diseñar deflectores capaces de lo optimizar el coeficiente de arrastre de la locomotora logrando su desplazamiento a mayor velocidad y estabilidad, así mismo como consecuencia se tendría una disminución en los tiempos de operación y una disminución del consumo de combustible de la locomotora GT42AC. También dada la geografía accidentada del sistema ferroviario del sur del Perú en su trayecto desde el puerto de Matarani hasta Aguas Calientes en Cuzco y considerando la diferencia de los niveles altitudinales es necesaria la implementación de dispositivos que ayuden a la optimización de los trenes en nuestra región.

### **1.4.2 Justificación metodológica**

Esta mejora (implemento de deflectores aerodinámicos) nos proporcionará que la locomotora GT42AC, mejore su eficiencia y su velocidad ya que el impacto que se dará contra las cargas aerodinámicas como el  $D_s$  (downforce spoiler), sentido de avance, peso, drag (coeficiente de arrastre), lift (levantamiento). Estos serán analizados y mediante esto podremos buscar que al colocar los deflectores cuanto es que se mejorara estos indicadores que comprometen el buen funcionamiento de la locomotora. Además de poder buscar los puntos estratégicos de sujeción, el ángulo que brindara la mejor eficiencia y el material que se utilizara para no perjudicar el incremento de cargas.

### **1.4.3 Justificación económica**

Las empresas siempre buscan generar mayor rentabilidad en sus procesos, el mejoramiento de máquinas o equipos logra optimizar su performance el cual se ve reflejado al lograr la producción esperada consumiendo una menor cantidad de recursos. Es por esto que al optimizar las cargas aerodinámicas de la locomotora GT42AC logramos un menor consumo de combustible dando como resultado ahorro en el consumo de combustible y por lo tanto también ahorro de dinero. Las cargas aerodinámicas no aprovechadas se pueden ver reflejadas como cargas sumadas a la locomotora, en este tipo de industria se habla de consumo de combustible por Tonelada-Kilómetro, la optimización del diseño podría lograr una disminución de este indicador.

### **1.4.4 Justificación ambiental**

La emisión de gases de efecto invernadero es un tema de debate actual muy importante, los aportes para la disminución o erradicación de estos gases es una batalla permanente para el sector industrial. La presente investigación está centrada en la disminución del consumo de diésel para las operaciones de la locomotora GT42AC sin afectar su performance aprovechando la energía de las cargas aerodinámicas a favor del movimiento de la misma.

# CAPÍTULO II

## MARCO TEÓRICO

### 2.1 Antecedentes del problema

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales

##### **Primer antecedente**

(LÓPEZ 2017) realizó la investigación: “Estudio de los efectos derivados del viento lateral en la circulación de trenes de alta velocidad” de la Universidad Politécnica de Madrid. El estudio busca analizar de manera profunda los efectos similares del viento, se hizo un análisis del comportamiento y de la evolución histórica del viento para poder discernir la mejor manera de eliminar los efectos adversos de los vientos laterales, para la investigación se utilizaron sensores de viento, componentes de protección para el modelo aerodinámico óptimo de los recientes trenes de velocidad. Además de demostrar cuán efectiva es la dinámica de fluidos computacional (CFD) para obtener el comportamiento del viento con respecto a la locomotora, como complemento adicional se utiliza el (CEC) curva eólica característica, está determina dichas limitaciones en función a su diseño aerodinámico y la estabilidad lateral. Viendo como solución el implemento de alerones orientados hacia afuera de la vía. Finalmente se concluye que el análisis del efecto de viento lateral para un tren de velocidad es un efecto que no puede ser analizado de manera aislada y las investigaciones que afirman beneficios en la implementación de un hueco inferior en las pantallas no implica mejoras significativas dado que la evaluación se debe realizar en conjunto y esta investigación no utilizó un método dual.

##### **Segundo antecedente**

El artículo científico de ESTUPIÑÁN Y POLONIA (2011), que tiene como título “Las locomotoras del desarrollo: Minas energía e innovación” cuyo

objetivo es determinar cómo la implementación de las locomotoras, minero energético y de sectores basados en la innovación, impulsará la economía del país. La investigación conduce a obtener una proyección para el 2014 de una suba en su economía presentando un estudio del presente año, dificultades, logros, y estrategias específicas para lograr los objetivos establecidos. El trabajo nos brinda una aplicación de desarrollo de distribuidores que brindaran mayores capacitaciones y competencias de empresas distribuidoras de los aportes del sector minero-energético.

### **Tercer antecedente**

(PANIORA 2019), realizó la investigación: “Diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simuladores” en la Escuela de Ingeniería Industrial de la Universidad Nacional Federico Villarreal. El estudio aporta una metodología de modelo de simulación microscópica sincrónica para la construcción y diseño de modelos de operaciones ferroviarias usando la simulación, por lo que fue necesario aplicar los conocimientos y conceptos de modelamiento de infraestructura, la definición de locomotoras (material rodante), buscar cuales son los servicios que brindan y los horarios de salida y llegada, así como la realización de la simulación del servicio ferroviario. Además, que este método fue aplicado en la línea 4 de mayo de Lima-Callao, utilizando un software especializado en simulaciones ferroviarias (Opentrack) obteniendo como resultados tiempo de recorrido, la velocidad comercial, uso de energía de tracción y dimensiones de las locomotoras apreciando el escenario férreo planteado.

### **Cuarto antecedente**

(BELTRAMO 2015) realizó la investigación: “Simulación dinámica estructural de un automóvil de competición” de la escuela de Ingeniería Mecánica Electricista de la Universidad Nacional de Córdoba. El estudio fue estudiar, analizar y determinar la influencia que posee la rigidez de torsión del chasis del Super TC 2000 (Renault Fluence) en su desenvolvimiento dinámico determinado por un software computacional la distribución de carga normal sobre cada neumático, teniendo como objetivo

el desarrollo del programa informático que ayude a obtener las diversas condiciones, para que así se pueda conseguir la magnitud mínima suficiente de rigidez torsional, este software está constituido por elementos finitos para ser más precisos en la rigidez de la jaula, adoptando como ejemplo de modelo la estructura que se le equipo al Renault Fluence de Súper TC 2000.

#### **Quinto antecedente**

El artículo científico de LIZCANO (2018), que lleva como título “ Análisis Comparativo De Las Variables Infraestructura, Volumen de Carga y Tecnología entre el Sistema de Transporte Férreo de Carga en Colombia y Estados Unidos”, su finalidad de la investigación es identificar y contrastar la diferencia de infraestructura, volumen de carga y tecnología del sistema de transporte férreo de cargas, aplicando como base es sistema de transporte férreo de carga de los Estados Unidos ya que este además de tener una de las más largas extensiones de vías férreas a nivel mundial y además de realizar un aporte económico fuera de pérdidas en el uso de combustible en camiones y el riesgo de los trabajadores ya que estos recorrían largas distancias por vías públicas y teniendo capacidades de carga no tan extensas como las locomotoras, su metodología es emplear un análisis sistemático, donde se plantean acciones de mejora para el transporte de carga en Colombia, para así mejorar el aporte económico y sobre todo un consumo bajo de combustible. Identificando que Colombia es un país rezagado a la competitividad en la innovación de infraestructura férrea, y gracias al uso de (STFC, sistema de transporte férreo de carga), (CTC, control de tráfico Centralizado), (ITCS, incremental train control system) y el sistema (OBMCS, sistema de monitoreo y control a bordo), para la recolección de datos en cuanto a la velocidad, acelerómetros, sensores de proximidad y comunicaciones inalámbricas.

#### **Sexto antecedente**

El artículo científico presentado por SACCO y GIUGGIOLONI (2019) sobre el “Análisis de cargas aerodinámicas en un auto de competición”, el cual tuvo como objetivo medir las cargas aerodinámicas de un vehículo de

competencia de la categoría TC 2000 mediante el uso de software de simulación de mecánica de fluidos computacional mediante el método de elementos finitos, el entorno virtual utilizado fue un ambiente de 20 metros de ancho por 20 metros de largo por 10 metros de alto lo cual es importante de mencionar dada la naturaleza no estacionaria , también se analizó la downforce debido a que esta puede ocasionar variación en la altura del vehículo, se analizó también las frecuencias vibracionales generadas por el desplazamiento del vehículo y se determinó que las vibraciones de frecuencia mayor a 3 hz son filtradas por los neumáticos y la suspensión, lo cual indicaría que se debe tener mayor atención en las bajas frecuencias vibracionales, sin embargo dada la amplitud para este caso es despreciable por ser de 2mm. Se demostró mediante la simulación que las cargas aerodinámicas se dan con mayor intensidad en el tren delantero con un incremento de hasta 10% mientras en el tren trasero se presenta una disminución de cargas hasta un 13% para la simulación de un vehículo Ford Focus a 230 km/h en condiciones estándar.

### **Séptimo antecedente**

BELTRÁN y GARRIDO (2017) , realizaron la investigación “Análisis estructural y optimización de la carrocería de un bus interprovincial modelo GR de la empresa olímpica quito”, presentada en la escuela profesional de ingeniería automotriz de la Universidad de las Fuerzas Armadas de Ecuador, su estudio aporta el análisis de túnel de viento y pruebas aerodinámicas para buses utilizando SOLIDWORK como simulador de mecánica de fluidos computacional mediante el método de elementos finitos, al mismo tiempo realizaron ensayos con túnel de viento y túnel subsónico a un prototipo impreso en 3D escala 1:200 equipado con sensores para así contrastar los datos obtenidos mediante la simulación de software, se hicieron tres pruebas tanto en túnel de viento como en simulación en computadora para el modelo original de bus, un modelo con dos alerones y un modelo con deflector emulando una velocidad de desplazamiento de 25 m/s, los resultados indican que la entre las opciones de elementos aerodinámicos de los buses el deflector es el que ofrece mejoras en el coeficiente de arrastre según norma,

se concluye que la experimentación con túnel de viento y software para los tres diseños son muy similares y por lo tanto se puede utilizar el túnel de viento para otros modelos a escala.

### **Octavo antecedente**

AYALA, MARTINEZ y VALBUENA (2017) de la Fundación Universitaria Los Libertadores realizaron la investigación titulada “Diseño de un dispositivo reductor de la resistencia aerodinámica en un bus intermunicipal”, tuvieron como objetivo diseñar un dispositivo estructural con el fin de reducir la resistencia aerodinámica de un bus intermunicipal, para la investigación se utilizó el modelo Marcopolo 1200 de séptima generación, se analizó el flujo de aire sobre el bus por el método de software de dinámica de fluidos computacional, también se realizaron pruebas con un prototipo a escala del bus en el túnel de viento con humo, luego se sometió a una prueba de visualización superficial con aceite y Dióxido de Titanio y finalmente se utilizó la visualización superficial con el uso de hilos (tufts). También se hizo una prueba de medición de fuerza aerodinámica en el túnel de viento mediante un juego de poleas y sensores de fuerzas digitales, los resultados se compararon para el modelo con y sin el dispositivo fabricado. Sobre los resultados se logró identificar experimentalmente las alteraciones superficiales en algunas regiones específicas del bus tales como la parte posterior y anterior del bus, también sobre la claraboya y la toma de aire acondicionado. En la realización de la comparación se determinó para las cuatro pruebas experimentales que el coeficiente de Drag se reduce, sin embargo en las simulaciones de software se demuestra un aumento del coeficiente de resistencia debido probablemente por la baja calidad de la malla generada en el software y la presencia de elementos piramidales, para concluir los autores concluyen que los resultados del diseño del elemento estructural son favorables sin embargo la disminución del coeficiente de Drag no pudo ser validado computacionalmente.

### **Noveno antecedente**

Los autores PhD. ZULFAA MOHAMED-KASSIM de la escuela de ingeniería aeroespacial de la Universidad de Minnessota y PhD. ANTONIO FILIPPONE de la facultad de ingeniería civil y aeroespacial de la Universidad de Manchester presentan su investigación titulada “Ahorro de combustible en un vehículo pesado a través de la reducción aerodinámica de arrastre” [Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction] En su estudio se analizaron el potencial de ahorro de combustible ofrecido por dispositivos que disminuyan el coeficiente de arrastre vehículos pesados. Para el estudio se tomaron en cuenta las rutas y condiciones convencionales que puede presentar un vehículo pesado tanto en carretera como en zona urbana. También se consideran variaciones en el peso del vehículo. Los resultados muestran que el rendimiento de los dispositivos creados depende tanto de sus funciones como de cómo se operan los vehículos. También se logró hallar que los vehículos que se emplean para rutas largas normalmente logran duplicar el ahorro de combustible en comparación con los que circulan en zonas urbanas. Finalmente lograron una disminución del consumo de combustible debido a los dispositivos desarrollados. Las disminuciones van desde el 1% hasta el 9% del costo del combustible utilizado en un camión grande para un recorrido de 80'000 millas [129'000 km] anuales.

### **Décimo antecedente**

La investigación presentada por KHOSRAVI en el Journal of Central South University titulada “Reducción aerodinámica de arrastre de vehículos pesados utilizando agregar dispositivos mediante análisis CFD” [Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis], tuvo como objetivo el mejoramiento del consumo de combustible, la optimización del rendimiento y la eficiencia aerodinámica mediante la disminución del coeficiente de arrastre para vehículos pesados. En esta investigación se trató sobre qué efectos trae la adición de un dispositivo deflector para vehículos pesados comerciales. Para el estudio de los datos y modelamiento se utilizó el análisis computacional de fluidos

dinámicos (CFD) bajo el método de materiales finitos con la finalidad mejorar la estructura aerodinámica más adecuada. Los resultados muestran que el dispositivo complementario con mayor efectividad es el deflector, debido a que el coeficiente de arrastre disminuye considerablemente, también al adicionar dos aletas en ambos bordes frontales de la cabina, se nota una reducción significativa de la resistencia, debido a que estos elementos ayudan a dirigir la turbulencia generada. Finalmente, a través los resultados muestran que la paleta de la cabina reduce el consumo de combustible y el coeficiente de arrastre hasta en un 20%, también a este proceso se suman las aletas laterales. Finalmente, agregando todos los dispositivos diseñados, las cargas aerodinámicas logran obtener una reducción de la fuerza de arrastre del 41% en comparación con el modelo original.

## 2.2 Bases Teóricas

### 2.2.1 Principales parte de las locomotoras

#### 2.2.1.1 Bastidor de bogie

También conocido como chasis con ruedas unido a la locomotora, se utiliza como una subestructura de ruedas y eje proporcionando cierta amortiguación contra los shocks recibidos desde los carriles durante el trayecto. (Industrealize Railway, 2020).

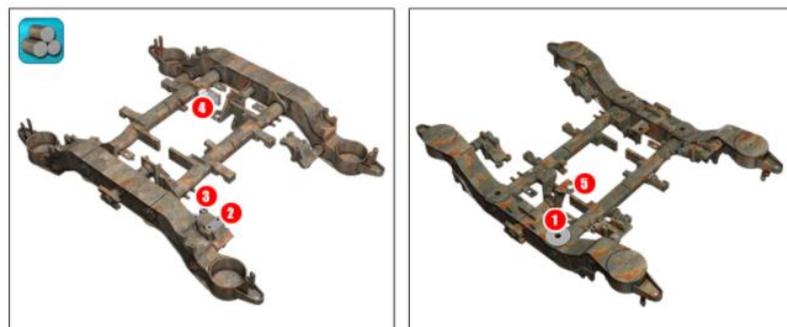


Figura 4. Bastidor de Bogies o chasis del tren. Nota. Tomada de: <https://www.iscarib.es/newarticles.aspx/countryid/14/newarticleid/2731>

### 2.2.1.2 Caja reductora

Empleada para la disminución de velocidades del motor eléctrico de una forma eficiente y segura. Los reductores modifican las velocidades de un motor para que brinde el par que requiere una máquina para un correcto funcionamiento. (Gutiérrez, Bautista, Gómez and Ascoy, 2017)

### 2.2.1.3 Sistema de suspensión

Estos componentes permiten que la locomotora compense la carga con el sistema de anti-vibraciones, esto depende de los niveles de exigencia a los que el sistema estará expuesto, componentes de suspensión primaria (cono, rodillo, muelles de la suspensión), varillas de empuje, cojinetes del muñón, el sistema de la suspensión neumática secundaria y por ultimo los brazos de torsión y muelles de aire. (User, 2017)

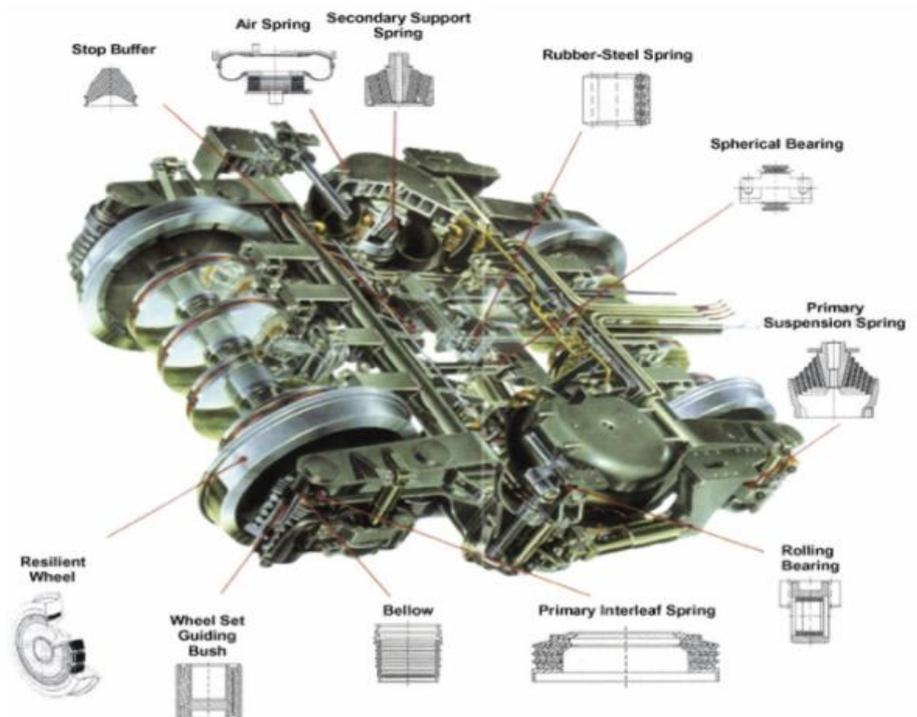
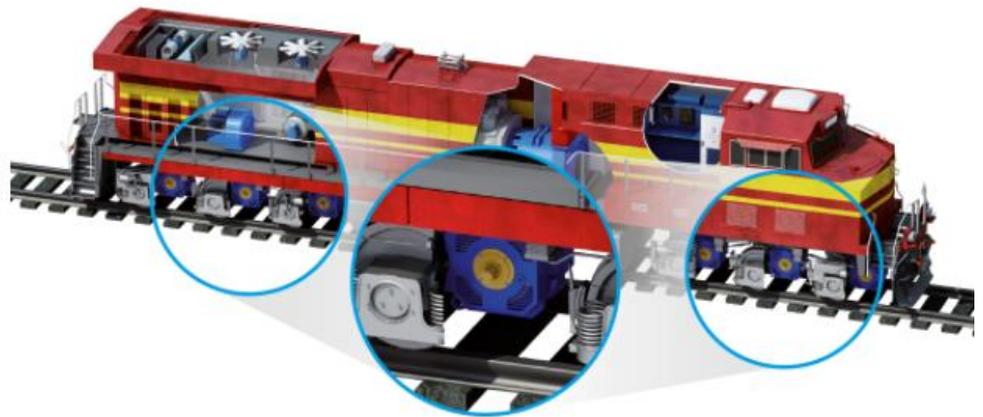


Figura 5. Sistema de suspensión SGP-VT para locomotora de carga. Nota. Tomado de: <https://www.sim-impex.com/index.php/es/productos/industria-ferroviaria/material-rodante/231-sistemas-de-suspension>

#### 2.2.1.4 Motor de tracción

Con una función multifacética en la locomotora ya que este nos brinda una potencia de 100 a 1100 CV, con un voltaje de 220 a 4000 V, además de un aislante de alta rigidez dieléctrica (aislamiento de clase H, impregnación al vacío), cuenta con bobinas perforadas, elevado torque de partida, alta capacidad de disipación térmica, su refrigeración está dada por un sistema de ventilación forzada extrema y por último su diseño es flexible generando una óptima aplicación. (Motores de Tracción | Locomotoras | Tracción Eléctrica | Líneas Dedicadas | Trifásico - Alta Tensión | Motores Eléctricos | WEG - Productos, 2017).



*Figura 6. Motores de tracción. Nota. Tomado de:*

*[https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/MotoresEl%C3%A9ctricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tensi%C3%B3n/L%C3%ADneas-Dedicadas/Tracci%C3%B3n-El%C3%A9ctrica/Locomotoras/MotoresTracci%C3%B3n/p/MKT\\_WEN\\_TRACTIO](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/MotoresEl%C3%A9ctricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tensi%C3%B3n/L%C3%ADneas-Dedicadas/Tracci%C3%B3n-El%C3%A9ctrica/Locomotoras/MotoresTracci%C3%B3n/p/MKT_WEN_TRACTIO)*

*N*

#### 2.2.1.5 Motor de Generación

La principal fuente de la energía de la locomotora, su conformación está dada por un gran bloque de cilindros, estos ubicados en serie. El motor logra girar al eje a unos 1000 RPM, permitiendo que se accionen los distintos componentes

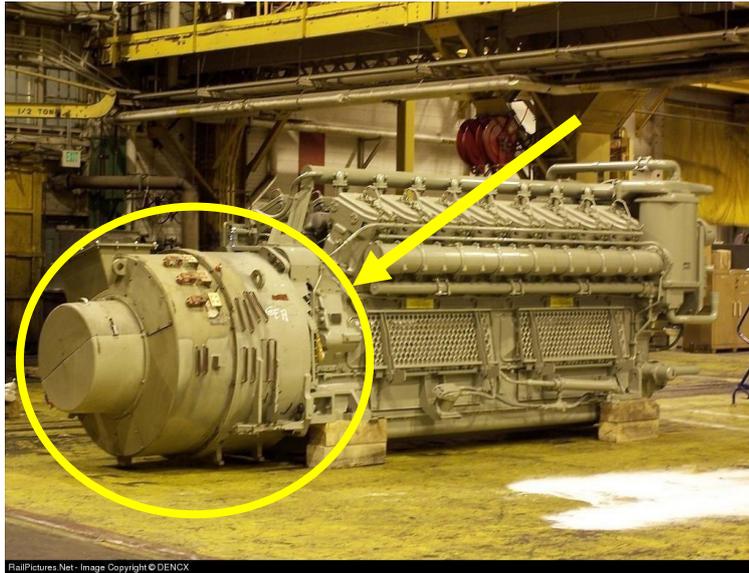
permitiendo el movimiento de la locomotora. Como se sabe la locomotora es de transmisión normalmente eléctrica, es por esto que su función está directamente a dar energía al alternador que se encarga de abastecer de energía eléctrica necesaria para el funcionamiento de la locomotora. (Locomotoras Diésel | Locomotora Diésel - Eléctrica - Historia del tren, 2020)



*Figura 7. Motor 710-1985. Nota. Tomada de: “GT42AC RESUMEN DE LOS SISTEMAS MECANICOS”*

#### **2.2.1.6 Alternador**

Su función principal de esta máquina eléctrica rotativa es de transformar energía mecánica en energía eléctrica. La energía es obtenida debido al movimiento rotativo del conjunto subsistemas rotor y estator. Cuando un generador eléctrico está en funcionamiento, una de las dos partes genera un flujo magnético, por el contrario, los generadores eléctricos se distinguen según el tipo de corriente que producen, dando lugar a dos grandes grupos: los alternadores y los dínamos. Los alternadores generan electricidad en corriente alterna y los dinamos generan electricidad en corriente continua. (Locomotoras Diésel | Locomotora Diésel - Eléctrica - Historia del tren, 2020[JADZ1])



*Figura 8. Alternador acoplado a motor de locomotora*  
<https://www.railpictures.net/viewphoto.php?id=88115&showexif=1>

Proporciona la potencia necesaria para darle movimiento a la locomotora, genera CA (corriente alterna) este da funcionamiento a los motores de tracción montados en los camiones (bogies). La salida de CA es rectificadora para que sea la necesaria para los motores. (Locomotoras Diésel | Locomotora Diésel - Eléctrica - Historia del tren, 2020)

## **2.2.2 Diseño de deflectores**

### **2.2.2.1 Diseño**

Expresión de una idea que de forma innovadora que solucione un problema concreto además que sirve de referencia para emplearlo en la práctica y cumplir con los pasos de construirlo y evaluarlo. Se pueden efectuar distintos ya que se tiene que evaluar cómo es que se dará el comportamiento al momento de su uso.

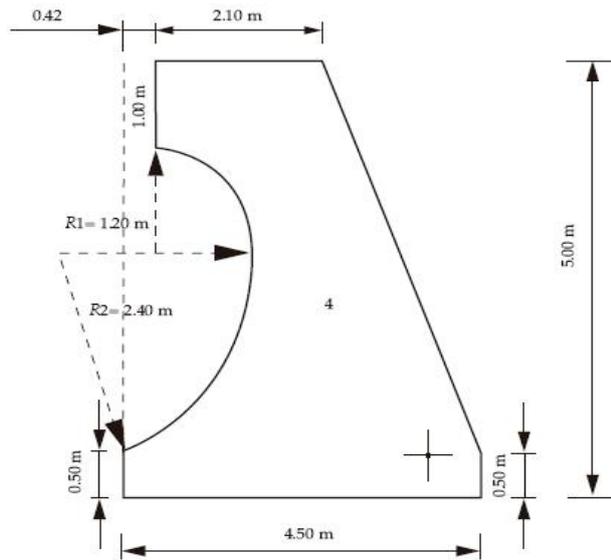


Figura 9. Diseño de deflectores para vehículos pesados

### 2.2.2.2 Deflectores

Elementos aplicados para desviar el aire además que brindar una visión aerodinámica no común en el equipo al que será adicionado, su incremento en la eficiencia de ventilación a grandes velocidades es su principal función. (figura 4).



Figura 10. Locomotora de carga NdM – 3034 con difusores

## 2.2.3 Resistencia aerodinámica en locomotoras y difusores

### 2.2.3.1 Área Frontal

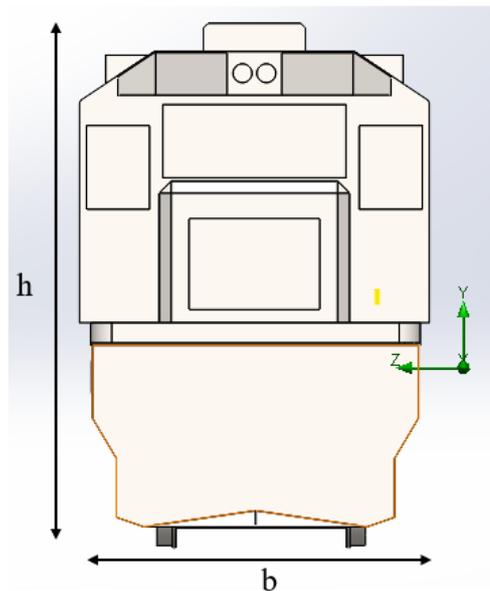
Aquel tamaño del frente que será impactado directamente con el flujo de aire, esto para que la locomotora se habrá paso a la resistencia del fluido se tiene en consideración todo lo que se enfrenta de forma frontal: parabrisas, espejos, las porciones de ruedas que sobresalen de la carrocería. (G. Artés 2020)

$$A_f = b * h$$

*Ecuación 1. Área Frontal*

Donde:

- $A_f$ : Área frontal [m<sup>2</sup>]
- $b$ : base de la locomotora [m]
- $h$ : altura de la locomotora. [m]



*Figura 11. Parte frontal de la locomotor GT42AC. Fuente propia*

### 2.2.3.2 Densidad

Un valor que depende de la temperatura y la presión además de conocer la masa y el volumen del fluido que se trabajara.  $R_{air}=0.2870$  [kJ/kg. °K]

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

*Ecuación 2. Densidad*

Donde:

- $\rho$ : densidad [kg/m<sup>3</sup>]
- $P$ : Presión [Pa]
- $R$ : Constante del aire [kJ/kg. °K]
- $T$ : Temperatura [°C]

### 2.2.3.3 Presión

Esta es generada sobre un área que se encuentra en sentido opuesto a la dirección del fluido. Se obtiene cuanta presión es la que se genera por el impacto.

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

*Ecuación 3. Presión*

Donde:

- $P$ : presión [Pa]
- $F$ : fuerza [N]
- $A$ : área [m<sup>2</sup>]

### 2.2.3.4 Número de Reynolds

Un numero adimensional, usado en muchas ramas de la mecánica de fluidos como también en transferencia de calor y masas, además de ser un dato importante de diseño de reactores y fenómenos generados por el transporte. Podemos obtener las características

del fluido, relacionando la densidad, viscosidad, velocidad y dimensiones. Este se puede evaluar de la siguiente forma:

- Flujo laminar: Normalmente el comportamiento del fluido es de forma ordenada, moviéndose en laminas paralelas sin colisionar una con otra. Se sigue un trayecto quieto y definido.
- Flujo turbulento: Su movimiento es totalmente desordenado formando pequeños remolinos ya que las partículas en su trayecto colisionan unas a otras.

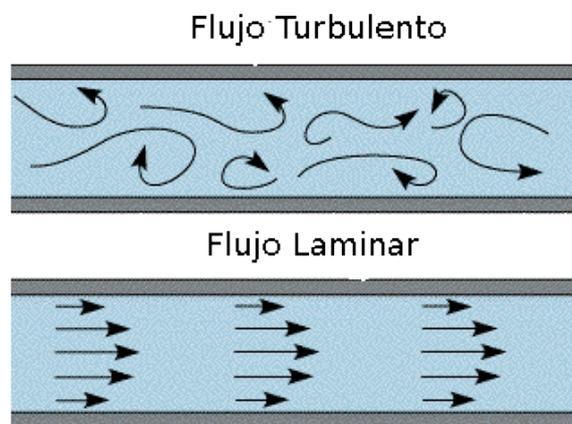


Figura 12. Flujo turbulento y laminar. Nota. Tomado de: “Yunus Cengel 1<sup>ra</sup> Edición Mecánica de Fluidos”

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

Ecuación 4. Número de Reynolds

Donde:

- $V$ : velocidad del fluido [m/s]
- $L$ : longitud de la locomotora [m]
- $\nu$ : viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s]
- $Re$ : <2000. Flujo laminar
- $Re$ : >4000. Flujo turbulento

### 2.2.3.5 Viscosidad Cinemática

Con la relación de la densidad y la viscosidad dinámica de un fluido se obtiene la viscosidad cinemática, esta varía dependiendo de la presión y temperatura a la que este ejercida en cuanto a gases, para los líquidos solo depende de la variación de la temperatura.

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

*Ecuación 5. Viscosidad cinemática*

Donde:

- $v$ : viscosidad cinemática [m<sup>2</sup>/s]
- $\mu$ : viscosidad dinámica [N.s/m<sup>2</sup>]
- $\rho$ : densidad [kg/m<sup>3</sup>]

### 2.2.3.6 Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre en una comparación con el movimiento de objetos que se desplazan sobre una superficie tendría como equivalente a la fricción, por lo cual podemos deducir que la fuerza de arrastre es la fuerza que se resiste al flujo del fluido sobre la superficie del objeto en movimiento.

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * C_d * V^2 * A_f$$

*Ecuación 6. Fuerza de arrastre*

Donde:

- $F_D$ : Fuerza de arrastre. [N]
- $\rho$ : Densidad del fluido [kg/m<sup>3</sup>]
- $V$ : Velocidad relativa del fluido [m/s]
- $A_f$ : Área frontal del vehículo [m<sup>2</sup>]
- $C_d$ : Coeficiente de arrastre

### 2.2.3.7 Coeficiente de arrastre ( $C_D$ Drag Force)

El coeficiente de arrastre es una medida adimensional que relaciona la fuerza de arrastre con el área de enfrentamiento del objeto en movimiento.

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_f}$$

Ecuación 7. Coeficiente de arrastre

Donde:

- $F_D$ : Fuerza de arrastre [N]
- $\rho$ : Densidad del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $V$ : Velocidad relativa del fluido [m/s]
- $A_f$ : Área frontal del vehículo [ $\text{m}^2$ ]

Coeficientes de arrastre  $C_D$  de varios cuerpos bidimensionales para  $Re > 10^4$  con base en el área frontal  $A = bD$ , donde  $b$  es la longitud en la dirección normal a la página (para uso en la relación de fuerza de arrastre  $F_D = C_D A \rho V^2 / 2$  donde  $V$  es la velocidad corriente arriba)

<p>Barra cuadrada</p> <p>Esquinas agudas: <math>C_D = 2.2</math></p> <p>Esquinas redondeadas (<math>r/D = 0.2</math>): <math>C_D = 1.2</math></p>	<p>Barra rectangular</p> <p>Esquinas agudas:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>L/D</math></th> <th><math>C_D</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.0*</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.1</td><td>1.9</td></tr> <tr><td>0.5</td><td>2.5</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>2.2</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>1.7</td></tr> <tr><td>3.0</td><td>1.3</td></tr> </tbody> </table> <p>* Corresponde a placa delgada</p> <p>Borde frontal redondeado:</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th><math>L/D</math></th> <th><math>C_D</math></th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>0.5</td><td>1.2</td></tr> <tr><td>1.0</td><td>0.9</td></tr> <tr><td>2.0</td><td>0.7</td></tr> <tr><td>4.0</td><td>0.7</td></tr> </tbody> </table>	$L/D$	$C_D$	0.0*	1.9	0.1	1.9	0.5	2.5	1.0	2.2	2.0	1.7	3.0	1.3	$L/D$	$C_D$	0.5	1.2	1.0	0.9	2.0	0.7	4.0	0.7
$L/D$	$C_D$																								
0.0*	1.9																								
0.1	1.9																								
0.5	2.5																								
1.0	2.2																								
2.0	1.7																								
3.0	1.3																								
$L/D$	$C_D$																								
0.5	1.2																								
1.0	0.9																								
2.0	0.7																								
4.0	0.7																								
<p>Barra circular (cilindro)</p> <p>Laminar: <math>C_D = 1.2</math></p> <p>Turbulento: <math>C_D = 0.3</math></p>	<p>Barra elíptica</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2"><math>L/D</math></th> <th colspan="2"><math>C_D</math></th> </tr> <tr> <th>Laminar</th> <th>Turbulento</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>2</td><td>0.60</td><td>0.20</td></tr> <tr><td>4</td><td>0.35</td><td>0.15</td></tr> <tr><td>8</td><td>0.25</td><td>0.10</td></tr> </tbody> </table>	$L/D$	$C_D$		Laminar	Turbulento	2	0.60	0.20	4	0.35	0.15	8	0.25	0.10										
$L/D$	$C_D$																								
	Laminar	Turbulento																							
2	0.60	0.20																							
4	0.35	0.15																							
8	0.25	0.10																							
<p>Barra triangular equilátera</p> <p><math>C_D = 1.5</math></p> <p><math>C_D = 2.0</math></p>	<p>Cascarón semicircular</p> <p><math>C_D = 2.3</math></p> <p><math>C_D = 1.2</math></p>	<p>Barra semicircular</p> <p><math>C_D = 1.2</math></p> <p><math>C_D = 1.7</math></p>																							

Figura 13. Indicadores del coeficiente de arrastre para un  $Re$  turbulento. Nota: tomado de “Yunus Cengel 1ra Edición Mecánica de Fluidos”

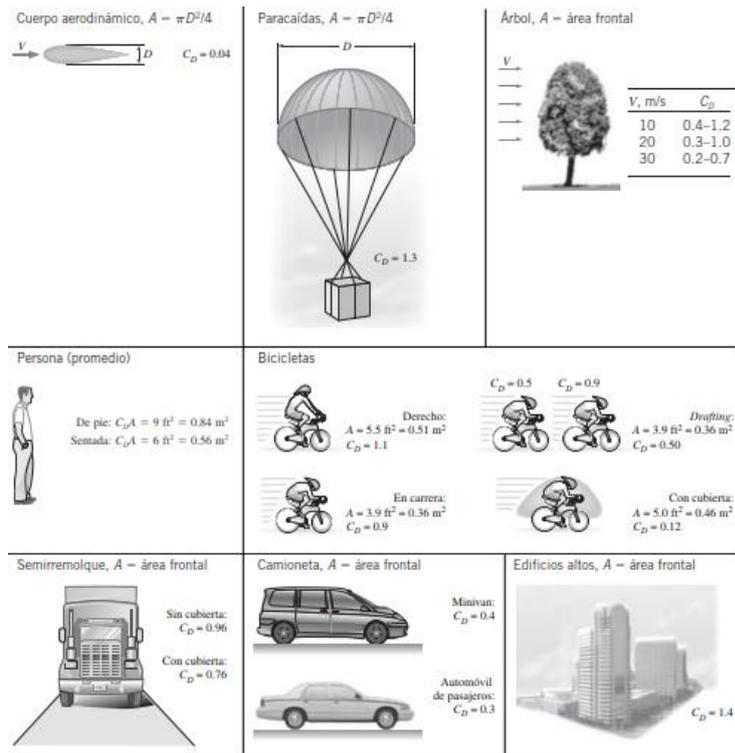


Figura 14. Indicadores del coeficiente de arrastre para un  $Re$  turbulento. Nota: tomado de "Yunus Cengel 1<sup>ra</sup> Edición Mecánica de Fluidos"

### 2.2.3.8 Potencia de Arrastre

Aquella potencia que el motor debe generar para vencer la oposición que el aire presenta al momento del movimiento.

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_f * V^3$$

Ecuación 8. Potencia de arrastre

Donde:

- $P_{arras}$ : Potencia de arrastre [W]
- $\rho$ : Densidad [kg/m<sup>3</sup>]
- $A_f$ : Área frontal del vehículo [m<sup>2</sup>]
- $V$ : Velocidad relativa del fluido [m/s]
- $C_d$ : Coeficiente de arrastre

### 2.2.3.9 Coeficiente de Sustentación

Este coeficiente va en función a la fuerza de sustentación ( $F_{sus}$ ), este es un valor adimensional ya que responde a cuando un dispositivo o elemento se mueve en dirección de un fluido de forma perpendicular a la dirección del movimiento.

$$C_s = \frac{F_{sus}}{\frac{\rho}{2} * V^2 * A_f}$$

*Ecuación 9. Coeficiente de sustentación*

Donde:

- $F_{sus}$ : Fuerza de sustentación [N]
- $\rho$ : Densidad del fluido [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
- $V$ : Velocidad relativa del fluido [m/s]
- $A_f$ : Área frontal del vehículo [ $\text{m}^2$ ]

### 2.2.3.10 Eficiencia Aerodinámica

También conocida como fineza aerodinámica, valor adimensional, ya que este valor está en función a los coeficientes de arrastre y de sustentación, mientras sea mayor el diseño aerodinámico será más eficiente.

$$f = \frac{C_s}{C_d}$$

*Ecuación 10. Eficiencia Aerodinámica*

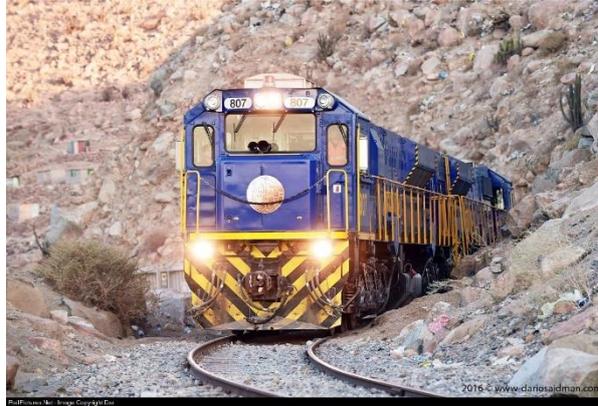
Donde:

- $C_s$ : Coeficiente de sustentación
- $C_d$ : Coeficiente de arrastre

### 2.2.4 Problemas de resistencia aerodinámicas en la locomotora GT42AC

Debido a su peso y adicionalmente el peso de la carga vuelven este fenómeno uno de los más relevantes en la eficiencia de la locomotora

GT42AC, además de las vías férreas por las que circula la locomotora (figura 1) y (figura 5).



*Figura 15. Locomotora de carga GT42AC*

### **2.2.5 Dinámica de fluidos computacional**

Área de conocimiento que está enfocado a la simulación numérica del flujo de los fluidos, transferencia de calor y fenómenos relacionados a la combustión, reacciones químicas y demás. Este se da a partir de la unión de dos disciplinas la mecánica de fluidos y los cálculos numéricos. (ESSS, 2020)

### **2.3 Definición de términos básicos**

**Consumo de combustible:** Dependiente de la energía mecánica y térmica que se use, este rendimiento se verá reflejado en la discusión de lo que se tiene inicialmente de combustible.

**ANSYS:** Efectúa, brinda soluciones y presta soporte a la ingeniería mediante el software de simulación, con el fin de predecir cómo es que el diseño funcionara y reaccionara bajo un entorno real.

**Solid Works:** Software de diseño asistido por computadora, su función es el modelado mecánico en 2D y 3D.

**CFD:** Dinámica de fluidos computacional.

**Aerodinámica:** Movimiento del aire alrededor de los objetos, se analiza cómo es que interactúa un objeto que está en movimiento y el medio por el cual lo realiza.

**Resistencia aerodinámica:** Es la oposición que afecta un cuerpo al moverse en sentido opuesto al del aire, también llamado desplazamiento a través de dicha velocidad. Esta resistencia es motivada por las capas fluidas impactando con el vehículo. (RESISTENCIA AERODINAMICA - Definición - Significado, 2020)

**Deflectores:** Componentes o elementos utilizados para una mejor eficiencia del equipo al que serán destinados, también ayuda con el performance del mismo.

**Coefficiente de arrastre:** Cantidad adimensional utilizada para medir la resistencia de un objeto, en una trayectoria fluida ya sea en contra del aire o del agua.

**Coefficiente de sustentación:** El coeficiente de arrastre es una medida adimensional que relaciona la fuerza de arrastre con el área de enfrentamiento del objeto en movimiento.

**Potencia de arrastre:** Aquella potencia que el motor debe generar para vencer la oposición que el aire presenta al momento del movimiento.

**TIG:** (Tungsten Inert Gas), tipo de soldadura que su material de aporte es de manera continuo y el recubrimiento es el que mejora la calidad del cordón final.

**INOX:** (Acero Inoxidable), acero constituido por una aleación, además de sus propiedades optimas contra el clima y el calor es óptimo su uso por su durabilidad.

**Bogie:** También conocido como boje es una composición de dos (o a veces tres o más, según el modelo de la locomotora) pares de ruedas, colocados sobre ejes próximos, en paralelos y solidarios entre sí, estos son utilizados en ambos extremos de vehículos de gran longitud destinados a circular sobre las vías férreas.

**Rieles:** También conocida como pista, vía por donde se desplazan los trenes estas deben ser continuamente inspeccionadas, depende que los trenes mantengan una estabilidad y se mantengan en un su curso seguro.

**Durmientes:** Divisor de los rieles además de permitir que se encuentren a una distancia y separación requerida por los trenes para un correcto funcionamiento y desplazamiento.

**Areneros:** Sistema de inyección de arena para la partida de la locomotora genera una capa de resistencia rueda-riel para una partida más efectiva.

## CAPÍTULO III

### METODOLOGÍA

#### 3.1 Tipo de Investigación

Tecnológica

Según (Dean, 2017) nos dice que la investigación tecnológica genera una cantidad de operaciones que vincula a la forma natural (ciencias de la ingeniería) con la innovación tecnológica, esto nos dice que podemos fomentar a la innovación utilizando este instrumento como una base del proyecto que se está realizando. Lo que se busca utilizando la investigación tecnológica es brindar el conocimiento y lo más relevante del resultado final esto incluye tanto al producto cognitivo, técnicas tecnológicas, maquinarias, patentes, teorías, etc.

El presente trabajo tiene como finalidad el diseño de artefactos (deflectores) capaces de disminuir la resistencia aerodinámica de la locomotora GT42AC. Siendo este un gran avance para la industria férrea, además de brindar una mayor eficiencia a sus equipos se logra la reducción en el consumo de combustible.

#### 3.2 Alcance de la investigación

Aplicada

(Lozada, 2014) nos dice que, este tipo de investigación busca generar conocimiento de una manera directa a los problemas o sector que se este estudiando. Se requiere de los hallazgos tecnológicos de la investigación básica, guardo la relación que se debe obtener de la teoría y el producto final. Se debe seguir la estructura de procesos de conocimientos (figura 9) para una correcta investigación.



Figura 16. Proceso de investigación aplicada para mejorar el conocimiento. Nota: tomado de la revista científica Dialnet “Investigación aplicada, definición, propiedad Intelectual e Industria”

La investigación tendrá un alcance a nivel aplicado, ya que se busca establecer cómo el desarrollo de los deflectores impacta en el mejoramiento de la eficiencia de la locomotora GT42AC. Además de saber cómo esto ayudara a la reformación económica de la empresa Perú Rail, cuanto al ahorro de combustible y la mejora de sus locomotoras.

### 3.2 Metodología aplicada para el desarrollo de la solución

La Metodología VDI 2222 creada por la asociación de Ingenieros Alemanes (Verein Deutscher Ingenieure), esta es generada en cuatro etapas: planificación, concepción, proyecto, desarrollo, (Gutiérrez, 2009). Donde:

**Planificación:** Se inicia con un estudio y análisis de mercado, por consiguiente, se realiza la evaluación de recursos propios (capital), se genera una información interna y como es que se efectuara el impacto ambiental, obteniendo de esto la (Evaluación Técnico-Económica: requerimientos técnicos, económicos, gastos de desarrollo, costos de fabricación, tiempos y plazos). (Gutiérrez, 2009).

**Concepción:** Se aclara el problema que se está trabajando, elaborando una lista de requerimientos (fijos, mínimos y puntuales), la abstracción de estructuras de funciones la división de las mismas y la combinación de los principios de solución. (Gutiérrez, 2009).

Proyecto: Como una pre-finalización de optimiza la concepción se evalúa la fíca técnica-económica, se analiza las propiedades técnicas del Producto, además de determinar su forma y se concluye el proyecto de forma textual.

Desarrollo: basado en la forma se desarrollan las formas que piezas serán requeridas la documentación que sea necesaria, su creación del prototipo, las pruebas y para concluir con el tema textual y de prototipado la verificación de costos. (Gutiérrez, 2009).

La Metodología VDI 2221 es la variación de la VDI 2222 ya que esta se basa en el entendimiento y analizar al problema a profundidad, para el rediseño o la mejora de productos ya creados. (Gutiérrez, 2009). Cuanta con 7 etapas:

- Especificaciones: Para un buen comienzo de mejora se debe de clarificar y definir las tareas que se realizaran. (Gutiérrez, 2009).
- Estructura de funciones: Se tiene que definir las funciones y las estructuras que se realizaran. (Gutiérrez, 2009).
- Búsqueda de soluciones: Analizar las mejores soluciones y combinaciones que pueden existir. (Gutiérrez, 2009).
- Estructura de modelo: Decidir los módulos que son capaces de realizarse. (Gutiérrez, 2009).
- Arreglos: Este esta dividido en dos partes los arreglos preliminares los cuales está destinado a los módulos claves y los arreglos definitivos que se encarga de completar el arreglo general. (Gutiérrez, 2009).
- Documentación: Se prepara las instrucciones de operación y producción. (Gutiérrez, 2009).
- Realización: Se realiza el producto. (Gutiérrez, 2009).

La investigación se ha definido como “Investigación Tecnológica” apoyándonos de la metodología VDI 2222 y VDI 2221, dado que se diseñarán dispositivos para la disminución de la resistencia aerodinámica de la locomotora GT42AC.

## CAPÍTULO IV

### ANÁLISIS Y DISEÑO DE LA SOLUCIÓN

#### 4.1 Estado del arte

En el presente capítulo se revisarán conceptos importantes relacionados a la investigación buscando con esto permitir un mejor acercamiento a la tecnología actual y al conocimiento actual de la ciencia de las locomotoras GT42AC.

#### 4.1.1 Diagnóstico situacional

##### 4.1.1.1 Temperatura anual por estaciones ferroviarias

##### 4.1.1.1.1 Temperatura en la estación de Arequipa

Clima Arequipa

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día	16 °C	15 °C	16 °C	17 °C	18 °C	18 °C	17 °C	17 °C				
Noche	10 °C	10 °C	11 °C	10 °C	9 °C	7 °C	7 °C	7 °C	8 °C	9 °C	10 °C	10 °C
Precipitación	63 mm	65 mm	33 mm	16 mm	2 mm	1 mm	2 mm	1 mm	2 mm	6 mm	6 mm	22 mm
Días de lluvia	16	17	13	9	2	2	3	1	3	4	3	9
Días secos	15	11	18	21	29	28	28	30	27	27	27	22
Horas de sol por día	10	8	9	9	8	8	7	8	10	10	11	11
Fuerza del viento (Bft)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Índice UV	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4

Figura 17. Análisis climatológico de la ciudad de Arequipa. Nota. Tomado de: <https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375/>

### 4.1.1.1.2 Temperatura en la estación de Matarani

#### Clima Matarani

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día	25 °C	26 °C	25 °C	24 °C	23 °C	22 °C	21 °C	21 °C	21 °C	22 °C	22 °C	23 °C
Noche	20 °C	22 °C	21 °C	20 °C	18 °C	17 °C	16 °C	15 °C	16 °C	16 °C	17 °C	19 °C
Agua	22 °C	23 °C	24 °C	22 °C	20 °C	20 °C	19 °C	17 °C	17 °C	18 °C	20 °C	21 °C
Precipitación	3 mm	4 mm	3 mm	1 mm	0 mm	1 mm						
Días de lluvia	3	5	6	3	1	0	1	0	1	0	0	1
Días secos	28	23	25	27	30	30	30	31	29	31	30	30
Horas de sol por día	10	9	9	9	7	7	8	10	11	12	12	12
Fuerza del viento (Bft)	2	2	2	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Índice UV	6	6	6	6	5	5	5	5	5	5	6	6

Figura 18. Análisis climatológico de la ciudad de Matarani. Nota. Tomado de: <https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375/>

### 4.1.1.1.3 Temperatura en la estación de Pillones

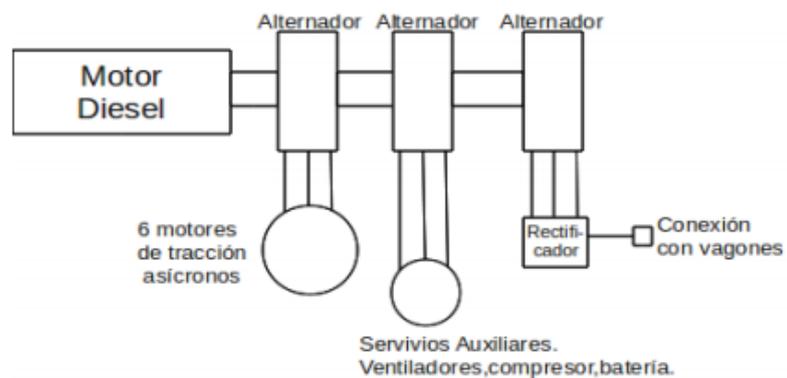
#### Clima Pillones

	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
Día	15 °C	14 °C	15 °C	16 °C	17 °C	17 °C	16 °C	16 °C				
Noche	9 °C	9 °C	9 °C	9 °C	7 °C	6 °C	6 °C	6 °C	7 °C	8 °C	8 °C	9 °C
Precipitación	75 mm	85 mm	57 mm	34 mm	5 mm	3 mm	5 mm	3 mm	6 mm	12 mm	9 mm	35 mm
Días de lluvia	21	23	21	15	4	3	4	2	4	5	4	13
Días secos	10	5	10	15	27	27	27	29	26	26	26	18
Horas de sol por día	10	9	10	9	8	7	7	8	10	10	11	11
Fuerza del viento (Bft)	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Índice UV	4	4	4	4	4	3	4	4	4	4	4	4

Figura 19. Análisis climatológico de la ciudad de Pillones. Nota. Tomado de: <https://www.cuandovisitar.pe/peru/matarani-2978375/>

#### 4.1.1.2 Locomotoras Diesel – Eléctrica

En el año 1935 General Electric y Ingersoll Rand se unieron para desarrollar un nuevo tipo de locomotora, como resultado de dicho esfuerzo nace la primera locomotora tipo Diesel eléctrica, este diseño consistió de una locomotora equipada con un motor diésel de 300 HP unido a un alternador el cual convierte la energía mecánica del motor en energía eléctrica la cual acciona 06 motores eléctricos distribuidos en dos bogies , los motores eléctricos van sujetos a los bogies y a su vez conectados mediante un juego de ruedas dentadas a las ruedas de la locomotora.



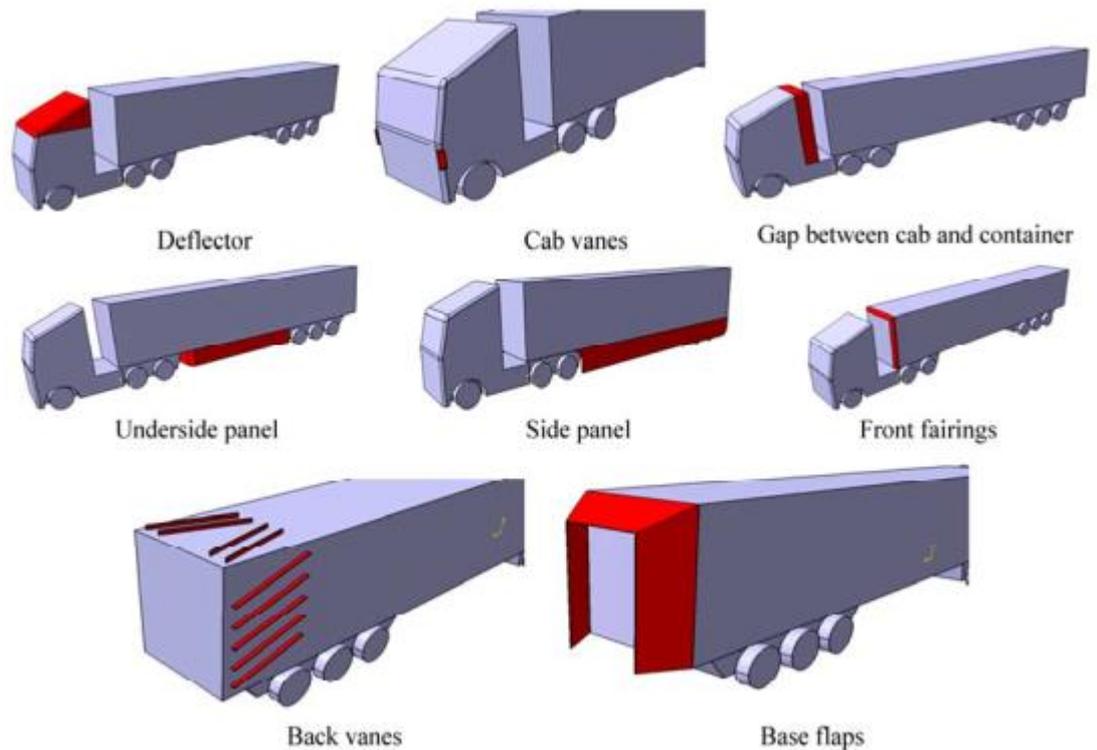
*Figura 20 Diagrama de funcionamiento del sistema de una locomotora diesel eléctrica. Nota: Tomado de la investigación análisis de funcionamiento del grupo motor-alternador mg 138a-f análisis de averías y propuesta de soluciones de Miguel Martínez García-Denche*

Junto con el nacimiento de las locomotoras diésel eléctrica se vio el nacimiento de las investigaciones en aerodinámica de locomotoras dado que este tipo de locomotora superaba en prestaciones a las locomotoras a vapor. Para estos años se diseñaron locomotoras como la M10000 equipada con un motor diésel de 600HP y estructura de aluminio, dicha locomotora podía viajar hasta 144km/h, años más adelante Burlington logra su

primer viaje entre Denver y Chicago a 120km/h y pudiendo llegar a una velocidad máxima de 180 km/h.

#### 4.1.1.3 Deflectores en vehículos pesados

En la actualidad se utilizan deflectores en los vehículos pesados con la finalidad de reducir el coeficiente de arrastre, este valor nos ayuda a cuantificar cuan aerodinámico es un diseño.



*Figura 21 Partes complementarias para la reducción del coeficiente de arrastre en camiones. Nota : Tomado de la investigación Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis*

Los deflectores ayudan disminuir el coeficiente de arrastre dirigiendo la trayectoria del aire de manera favorable, en el caso de los camiones los deflectores más usuales son los superiores de cabina, debido a que diferencia de altitud entre la cabina y remolque (cámara) y los paneles laterales genera un impacto directo del aire contra la carrocería y es necesario optimizar.

#### 4.1.1.4 Aerodinámica en vehículos pesados

La aerodinámica en los vehículos pesados no siempre es abordada como un tema de estudio, esto mayormente se debe a que, siendo vehículos grandes, robustos y que pueden cargar grandes pesos se asume que su aerodinámica no afectará de manera significativa su desempeño, sin embargo como se aprecia en la figura 17, la parte (a) el impacto del aire contra la cabina resulta en un segundo impacto contra la cámara, en el caso de la parte (b) como producto del deflector colocado en la parte superior de la cabina el flujo es desviado sobre la cámara.

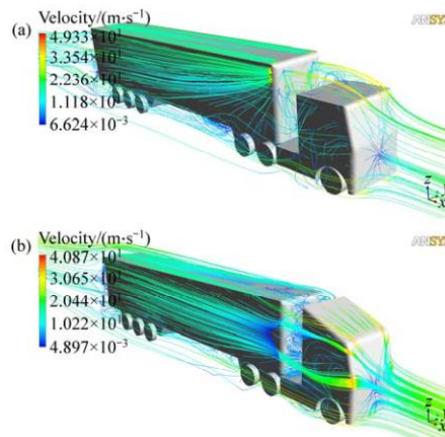
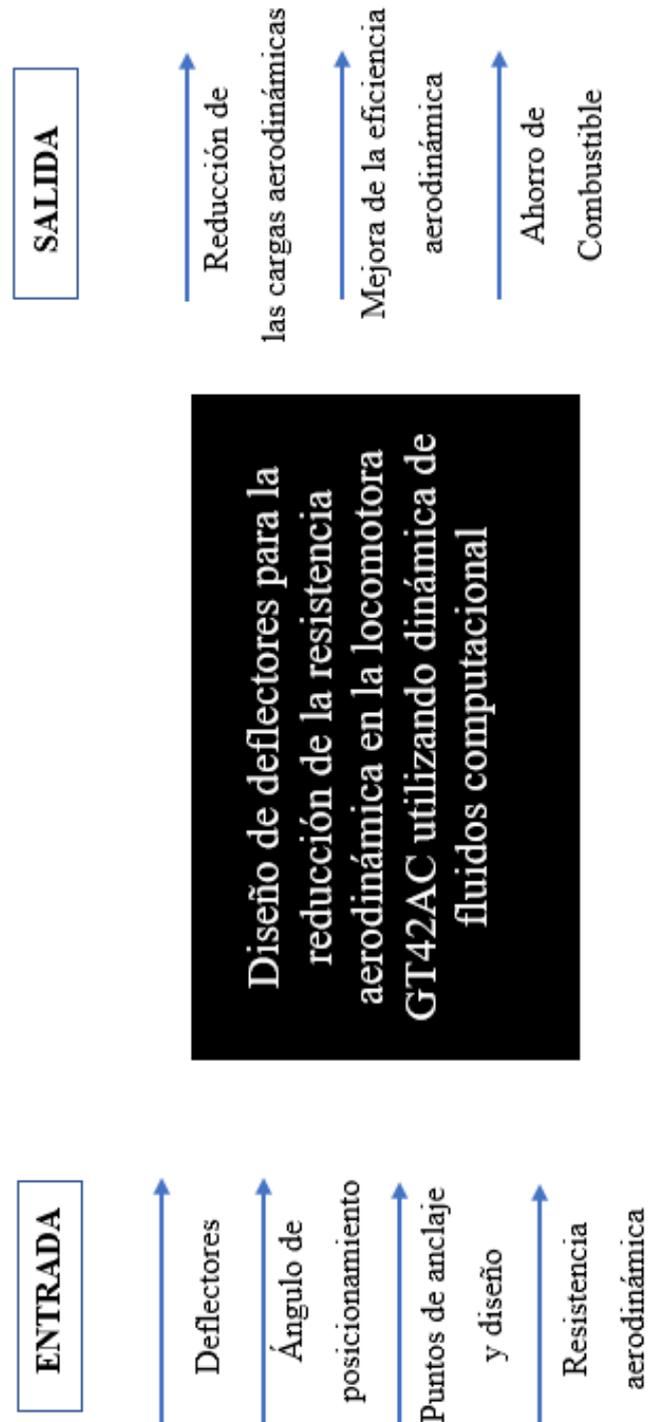


Figura 22 Simulación aerodinámica de camión. Nota: Tomado de la investigación *Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD análisis*

## 4.2 Diagramas de estructura de funciones

### 4.2.1 Caja Negra



## 4.2.2 Diagrama de funciones

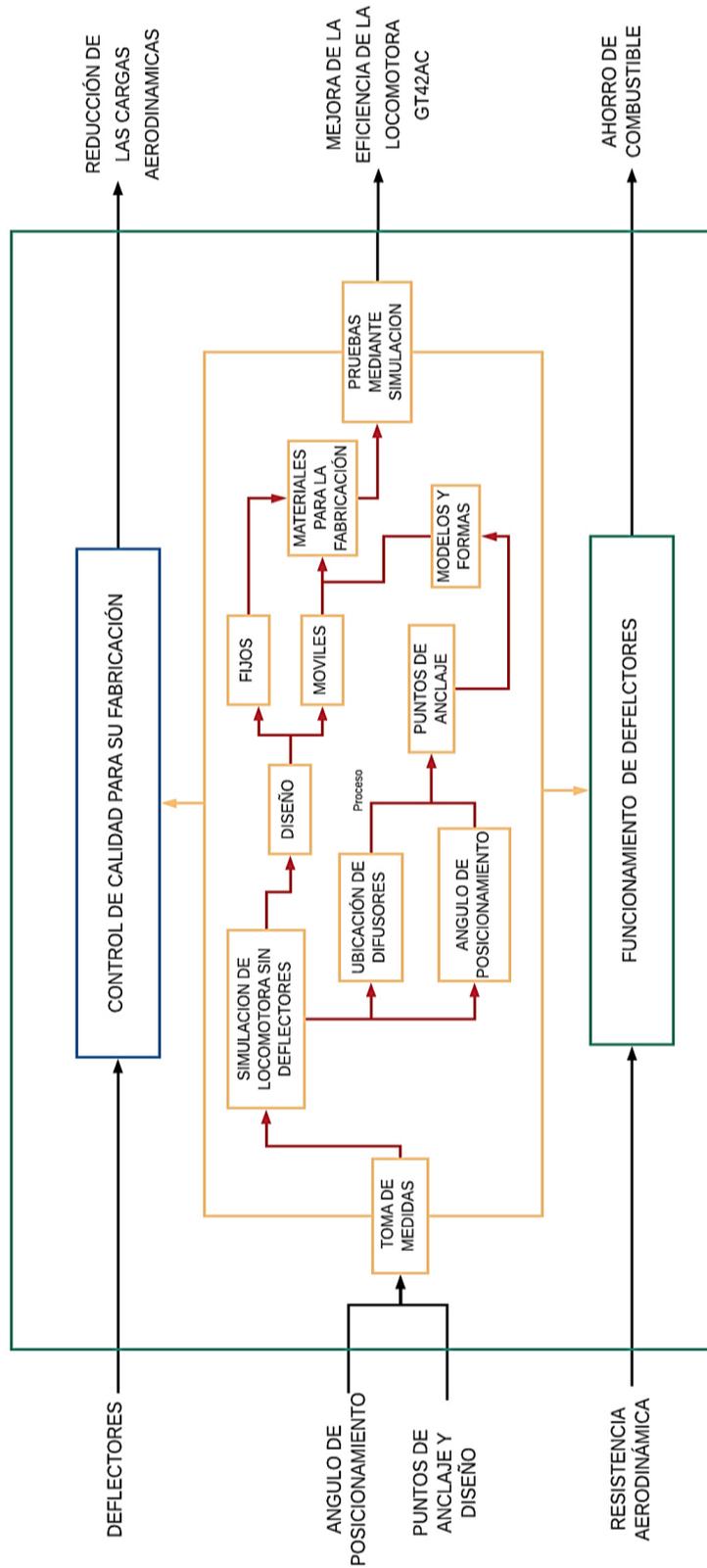


Figura 23 Diagrama de funciones

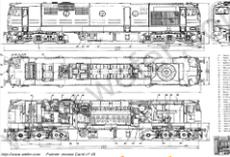
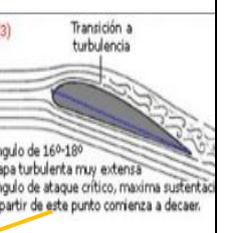
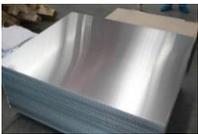
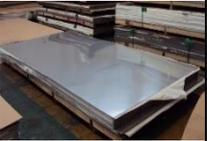
### 4.3 Listas de exigencias

<b>LISTA DE EXIGENCIAS</b>			
<b>PROYECTO</b>	Diseño de deflectores para la reducción de la resistencia aerodinámica en la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional		Fecha: 23/10/2020
			Revisado: Q.C.R.B
Cliente: PERÚ RAIL			Elaborado: D.Z.J.A & CH.D.Y. S
FECHA		DESCRIPCIÓN	RESPONSABLE(S):
	E	FUNCIÓN PRINCIPAL: Reducir el coeficiente de arrastre, disminuir el consumo de combustible, generar una mayor velocidad mejorando la eficiencia de la locomotora GT42AC.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	MATERIALES: Los difusores deben ser de (aluminio o fibra de carbono ya que no se quiere aumentar el peso de la locomotora, sino que ataca exclusivamente a las cargas aéreas.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	GEOMETRÍA: Los difusores deberán ser instalados a un ángulo específico, además de que no intervengan con la visualización y el funcionamiento de la locomotora.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E/D	ERGONOMÍA: La estructura deberá ser correctamente diseñada con normas ISO, señalizando puntos de anclaje y posicionamiento correcto, además de un color que vaya con la locomotora.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S

	E	ENERGÍA: La energía brindada por la locomotora GT42AC es de 3250 HP buscando que esta energía sea aprovechada al máximo con la instalación de los difusores.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	SEÑALES: Se deberá rotular una forma de posicionamiento para que los operadores y ayudantes sepan cómo se ha de colocar los difusores además de cómo será su anclaje y los seguros.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	SEGURIDAD: Los puntos de anclaje deben ser reforzados para evitar algún desprendimiento mediante la aplicación de los difusores, estos serán reforzados con seguros de acero.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	CONTROL: Revisión periódica de la estructura de los difusores, norma SAE, ISO, además de pruebas de ultrasonido (ensayos no destructivos).	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	MONTAJE: Unión empernada (tuerca-volandas y tornillo para una sujeción estable y rígida, además de los seguros de acero para una mayor estabilidad y aseguramiento de la pieza.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	USO: Mejora de la eficiencia de la locomotora GT42AC, y disminución del consumo de combustible.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	MANTENIMIENTO: Limpieza y revisión al finalizar cada viaje (Arequipa - pillones - arequipa -matarani - arequipa), y semestral un mantenimiento general.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S

	E	COSTOS: Estimamos una inversión de 12000 S/. soles juntando el costo de equipos herramientas y mano de obra.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S
	E	FUERZAS: La dirección de las fuerzas será de manera frontal con los difusores estos brindaran una disminución de las cargas aerodinámicas.	D.Z.J.A & CH.D.Y. S

## 4.5 Matriz Morfológica

FUNCIONES	ALTERNATIVAS Y/O SOLUCIONES			
<p>Obtención de dimensiones de la locomotora</p>				
<p>Ubicación de los difusores</p>				
<p>Angulo de posicionamiento de los difusores</p>				
<p>Deflectores móviles o fijos</p>	 <p>Móviles</p>	 <p>Fijos</p>		
<p>Material de fabricación</p>	 <p>Aluminio</p>	 <p>Fibra de Carbono</p>	 <p>Acero Inoxidable</p>	

Tipo de anclaje o sujeción		 Soldadura TIG		
Pruebas de simulación				
	CONCEPTO DE SOLUCION N°1	CONCEPTO DE SOLUCION N°2	CONCEPTO DE SOLUCION N°3	CONCEPTO DE SOLUCION N°4

TABLA 4 LEYENDA PARA LOS CONCEPTOS DE SOLUCIÓN.

Concepto de solución	Identificación de rutas
• C.S. N°1	
• C.S. N°2	
• C.S. N°3	
• C.S. N°4	

## 4.5.1 Descripción de los conceptos de solución

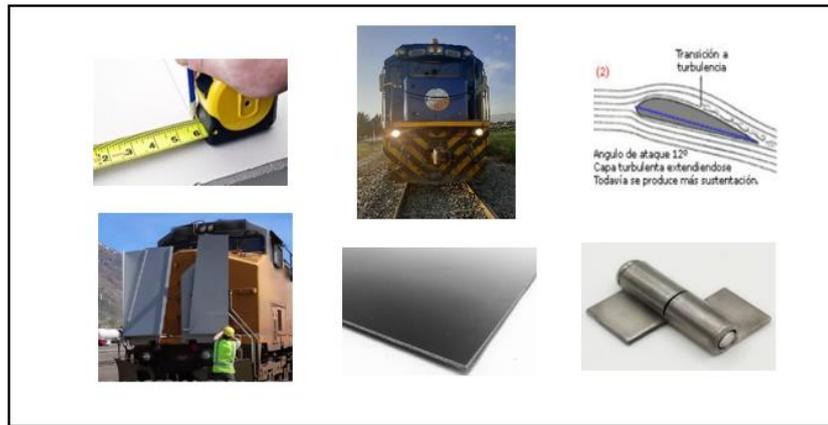
### 4.5.1.1 Concepto de solución N°1



*Figura 24 Concepto de solución n°1*

El concepto de solución N°1 está en función a la toma de medidas de forma manual ya que se brindó la autorización respectiva de poder realizar las mediciones correspondientes además de una simulación previa y poder saber dónde se requieren los deflectores, también gracias a un ensayo de túnel de viento podemos seleccionar el ángulo de posicionamiento requerido  $> 20^\circ$  para que cumpla con lo requerido, como innovación se plantea un diseño plegable y de fácil accionamiento por los operarios, como material a seleccionar se tomó en cuenta las propiedades del aluminio y su fácil deformación para la fabricación de los mismos, este será ensamblado mediante soldadura TIG, ya que este es el método más efectivo para poder soldar el aluminio. Para finalizar las pruebas de simulación con los deflectores ya instalados será mediante el programa SOLIDWORK.

#### 4.5.1.2 Concepto de solución N°2



*Figura 25 Concepto de solución N°2*

En el concepto de solución N°2 se realizan medidas manuales directas a la locomotora GT42AC de manera física, mediante la simulación previa se puede obtener los puntos mayormente golpeados por las cargas aerodinámicas y saber dónde se requieren los deflectores, además que por el tipo de material y su peso es recomendable el ángulo de  $12^\circ$  ya que este proporciona una turbulencia mínima y aceptable, se busca una movilidad de los difusores para poder usarlo a medida que sea necesario, el material que se acomoda a lo requerido es la fibra de carbono por sus propiedades, además de su peso total, su anclaje y posicionamiento deberá ser mediante tuercas, volandas y tornillos para una fijación segura. La simulación final con todos los deflectores será realizada mediante el programa ANSYS.

### 4.5.1.3 Concepto de solución N°3



*Figura 26 Concepto de solución N°3*

El concepto de solución N°3, es iniciado mediante el uso de planos ya que se tiene la facilidad de poder obtener medidas equivalentes con las herramientas de medición de los programas de diseño, se simula previamente la locomotora para poder ubicar los puntos donde las fuerzas aerodinámicas atacan con mayor magnitud, para el diseño mediante el uso de una prueba por ala de avión se determina que el ángulo a usar para los deflectores será de 8° proporcional al tamaño, los deflectores serán fijos por su forma y su ángulo al que atacaran las cargas aerodinámicas, el material a usar será la fibra de carbono ya que sus propiedades y su peso son aptos para su uso, el anclaje y su ubicación será dada por la composición de tuerca, tornillo y volandas, para culminar las simulaciones se realizarán por el programa ANSYS.

#### 4.5.1.4 Concepto de solución N°4



*Figura 27 Concepto de solución N°4*

El concepto de solución N°4 da inicio con la recopilación de medidas mediante los planos de la locomotora además de poder obtener todos los datos requeridos para saber cómo es que se comporta la locomotora GT42AC, mediante una primera simulación es que se analiza donde se necesita situar los deflectores, con la simulación del ala de avión en túnel de viendo se aprecia como se da el comportamiento de situar los deflectores a un ángulo entre  $16^\circ$  y  $18^\circ$ , además que estos serán fijos sin movimiento alguno, el material esta dado por el acero inoxidable ya que sus propiedades son aceptables para crear un diseño, el posicionamiento y la su fijación estará dada por soldadura tipo TIG ya que solo este proceso permite que el material sea adherido y fijado, como último se procede a realizar la simulación mediante el programa SOLID WORKS.

## 4.6 Evaluación Técnica

<b>DISEÑO MECANICO - EVALUACION DE PROYECTOS</b> <b>Valor técnico (Xi)</b>													<b>Evaluación de diseño de deflectores</b>	
<b>Proyecto: Diseño de deflectores para la reducción de la resistencia aerodinámica en la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional</b>														
<p>p: puntaje 0 a 4 según escala (VDI 2225)                      0= insuficiente, 1= aceptable +/-, 2=suficiente ,3=bien ,4=muy bien (correcto)                      g= peso ponderado que se da en función a la importancia de los criterios de evaluación.</p>														
Criterios de evaluación para diseño en fases de conceptos o proyectos														
Variantes de Concepto/Proyectos				solución S1		solución S2		solución S3		solución S4		solución ideal		
N°	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp		
1	Función principal	4	4	16	3	12	3	12	3	12	4	16		
2	Materiales	4	3	12	3	12	3	12	2	12	4	16		
3	Geometría	4	3	12	4	16	2	8	3	12	4	16		
4	Ergonomía	4	3	12	2	8	2	8	3	12	4	16		
5	Energía	3	3	9	2	6	2	6	3	9	4	12		
6	Señales	3	3	9	2	6	2	6	2	6	4	12		
7	Seguridad	4	3	12	3	12	2	8	2	8	4	16		
8	Control	3	2	6	2	6	3	9	3	9	4	12		
9	Montaje	3	2	6	3	9	3	9	3	9	4	12		
10	Uso	4	3	12	3	12	2	8	3	12	4	16		
11	Mantenimiento	4	2	8	2	8	3	12	2	8	4	16		
12	Costos	4	2	8	2	8	2	8	2	8	4	16		
13	Fuerzas	4	3	12	2	8	2	8	2	8	4	16		
14	Rigidez	4	3	12	3	12	2	8	2	8	4	16		
15	Influencia del medio ambiente	4	3	12	3	12	3	12	3	12	4	16		
puntaje máximo $\sum p$ ó $\sum gp$		56	42	158	39	147	51	134	38	145	54	224		
Valor Técnico Xi				0.71	0.66		0.60		0.64		1.00			

#### 4.7 Evaluación Económica

DISEÑO MECÁNICO – EVALUACIÓN DE PROYECTO												Área de diseño	
Valor económico Yi													
<b>PROYECTO: Proyecto: Diseño de deflectores para la reducción de la resistencia aerodinámica en la locomotora GT42AC utilizando dinámica de fluidos computacional</b>													
p: puntaje de 0 a 4 (escala de valores según VDI 2225) 0=insuficiente, 1=aceptable a las justas, 2=suficiente, 3=bien, 4=muy bien (ideal) g=es el peso ponderado y se da en función de la importancia de los criterios de evaluación													
<b>Criterios de evaluación para diseños en fase de conceptos o proyectos</b>													
Aspectos técnicos del proyecto			Solución 1		Solución 2		Solución 3		Solución 4		Solución Ideal		
Nº	Criterios de evaluación	g	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	p	gp	
1	Adquisición de piezas	10	3	30	2	20	2	20	2	20	4	40	
2	Disponibilidad de materiales	9	3	27	2	18	2	18	2	18	4	36	
3	Costos de fabricación	9	3	27	2	18	1	9	3	27	4	36	
4	Costos de montaje y ensamble	7	2	14	2	14	2	14	2	14	4	28	
5	Costo de transporte	8	3	24	3	24	3	24	2	16	4	32	
6	Costo de repuestos	6	3	18	1	6	2	12	2	12	4	24	
7	Costo de mantenimiento	8	2	16	1	8	1	8	1	8	4	32	
8	Costo de tecnología	5	3	15	2	10	2	10	3	15	4	20	
<b>Puntaje máximo</b>		62	22	171	15	118	17	115	17	1	32	248	
<b>Valor económico Yi</b>			0.69		0.48		0.46		0.52		1		

Tabla 5. Resumen de valor técnico y valor económico para las alternativas de solución

Descripción	V.T. Xi	V.E. Yi
Solución 1	0.71	0.69
Solución 2	0.66	0.48
Solución 3	0.6	0.46
Solución 4	0.64	0.52
Solución ideal	1	1

Con los datos de la evaluación técnica económica se realizó la tabla 5, donde se resumen de manera tabulada las soluciones, posteriormente se realiza una gráfica en la cual se ubican los puntos en un espacio de 0 a 1 tanto en ordenadas como abscisas con la finalidad de encontrar el valor más aproximado a la tendencia de solución ideal.

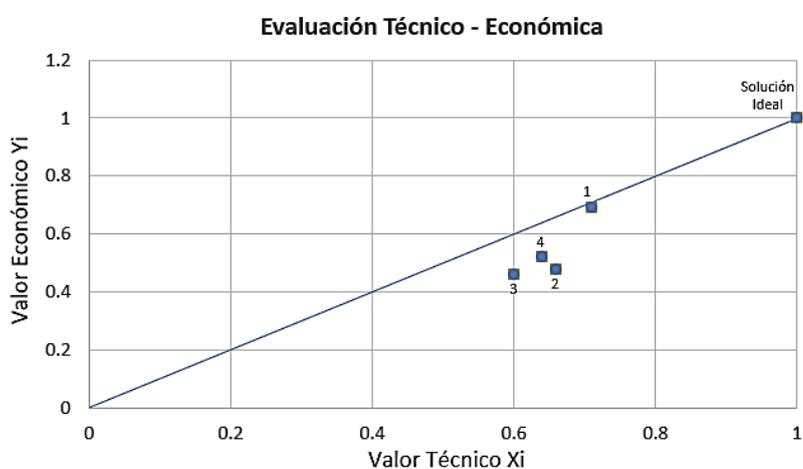


Figura 28 Gráfica de evaluación para la selección de alternativa de solución

Una vez realizada la gráfica se concluye que la secuencia y organización del concepto de solución N°1 es el más cercano a la solución ideal, es por esto que nos basamos en los pasos para poder diseñar dos posibles modelos frontales y uno superior.

#### 4.8 Modelado locomotora GT42AC

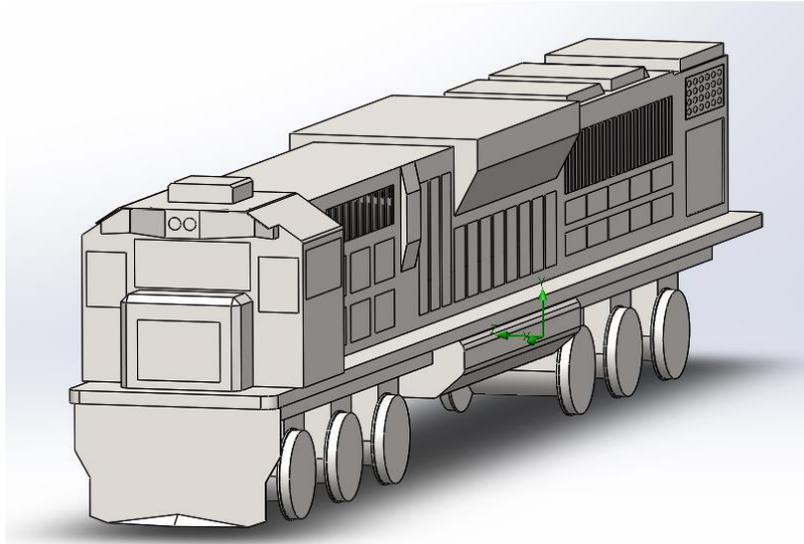


Figura 29. Modelado de la locomotora GT42AC (SolidWorks)- modelo original

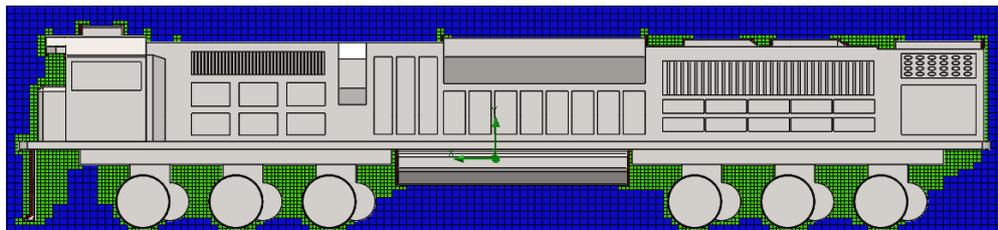


Figura 30. Malla del modelo original (simulación SolidWorks)

#### 4.9 Datos ambientales para simulaciones

Los siguientes parámetros ambientales servirán como datos de ingreso en las simulaciones por CFD.

Tabla 6. Parámetros Ambientales. Ruta de la locomotora GT24A.

	<b>T °C</b>	<b>m.s.n.m</b>	<b>P kPa</b>	<b>Humedad</b>
<b>AREQUIPA</b>	<b>16.5</b>	<b>2335</b>	<b>79.75</b>	<b>55%</b>
<b>MATARANI</b>	<b>24.8</b>	<b>100</b>	<b>100.4</b>	<b>88%</b>
<b>PILLONES</b>	<b>15.5</b>	<b>4600</b>	<b>58.82</b>	<b>65%</b>

Nota: parámetros ambientales según ubicación geográfica. Tomado de:

[https://satellites.pro/clima\\_de\\_Pillones](https://satellites.pro/clima_de_Pillones)

#### 4.10 Cálculo de Área

Para el cálculo del área frontal se debe emplear la (ecuación 1) donde se toma  $b$  como base total de la parte frontal de la locomotora y  $h$  la altura desde los ejes hasta la parte más elevada.

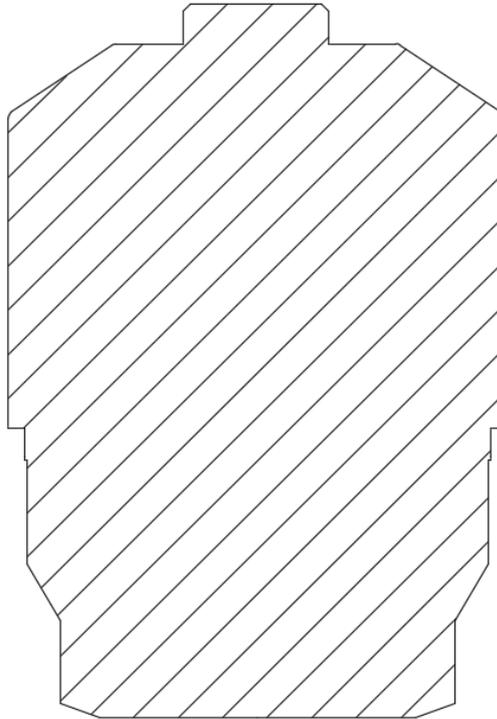


Figura 31. Sección proyectada del área frontal [de la locomotora GT42AC](#)

$$A_f = \sum b * h$$

$$A_f = 11.14 \text{ m}^2$$

Ecuación 11 Cálculo de área de sección frontal

*El cálculo del área se realizó de manera digital en software de CAD utilizando la silueta de la vista frontal, dadas las diferentes formas geométricas de los elementos resulta más factible utilizar software para esta finalidad.*

## 4.11 Cálculo de Densidad

Para obtener las densidades se utilizará la (ecuación 2) además de tener el dato de presión, temperatura y la constante R del aire. Para el cálculo la temperatura deberá ser evaluada en °K (°C+273).

### 4.11.1 Pillones

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{58.82}{0.2870 * 288.5}$$

$$\rho = 0.71 \text{ kg/m}^3$$

### 4.11.2 Arequipa

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{79.75}{0.2870 * 289.5}$$

$$\rho = 0.9598 \text{ kg/m}^3$$

### 4.11.3 Matarani

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{100.4}{0.2870 * 297.8}$$

$$\rho = 1.174 \text{ kg/m}^3$$

## 4.12 Cálculo de Viscosidad Cinemática

### 4.12.1 Pillones

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$$v = \frac{1.804 * 10^{-5}}{0.70990}$$

$$v = 2.5412 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

#### 4.12.2 Arequipa

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$$v = \frac{1.809 * 10^{-5}}{0.9592}$$

$$v = 1.886 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

#### 4.12.3 Matarani

$$v = \frac{\mu}{\rho}$$

$$v = \frac{1.848 * 10^{-5}}{1.174}$$

$$v = 1.574 * 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$$

### 4.13 Simulación de locomotora GT42AC

#### 4.13.1 Simulación a condiciones ambientales de Pillones

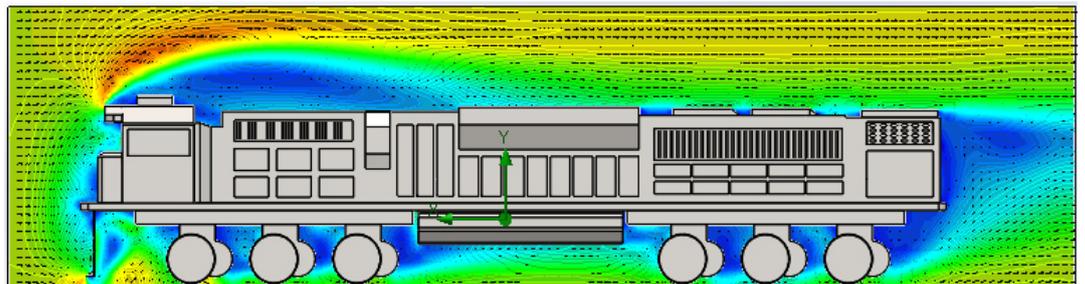


Figura 32. Simulación locomotora modelo original condiciones Pillones

Tabla 7. Resultados del modelo original. SOLIDWORKS. características Pillones

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	58819.95	58819.96	58819.95	58819.97	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	58867.18	58867.13	58866.92	58867.20	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-37.744	-37.682	-37.747	-37.528	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	39.685	39.644	39.526	39.690	100
GG Average Velocity (Y) 6	[km/h]	2.737	2.740	2.734	2.751	100
GG Force (Y) 7	[N]	255.167	253.323	248.378	256.217	100
GG Force 7	[N]	1306.143	1305.050	1302.283	1306.557	100
GG Force (X) 8	[N]	-1280.898	-1280.098	-1281.551	-1277.767	100

#### 4.13.2 Simulación a condiciones ambientales de Arequipa

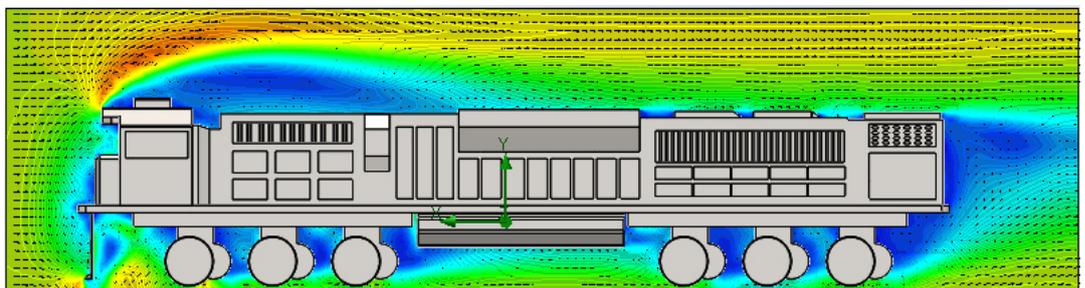


Figura 33. Simulación locomotora modelo original condiciones Arequipa

Tabla 8. Resultados del modelo original. SOLIDWORKS. características Arequipa.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	79749.94	79749.95	79749.94	79749.96	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	79813.95	79813.85	79813.57	79813.95	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-37.731	-37.667	-37.731	-37.511	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	39.672	39.626	39.503	39.672	100
GG Average Velocity (Y) 6	[km/h]	2.743	2.741	2.735	2.751	100
GG Force (Y) 7	[N]	343.669	342.892	338.961	346.969	100
GG Force 7	[N]	1769.351	1766.860	1762.613	1769.351	100
GG Force (X) 8	[N]	-1735.507	-1733.128	-1735.507	-1729.305	100

#### 4.13.3 Simulación a condiciones ambientales de Matarani

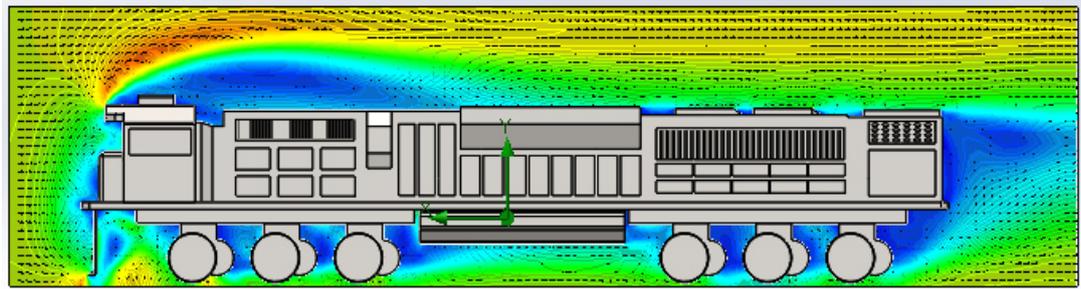


Figura 34. Simulación locomotora modelo original condiciones Matarani

Tabla 9. Resultados del modelo original. SOLIDWORKS. características Matarani.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	100399.93	100399.94	100399.93	100399.96	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	100477.68	100477.56	100477.26	100477.71	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-37.713	-37.646	-37.713	-37.494	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	39.665	39.617	39.503	39.666	100
GG Average Velocity (Y) 6	[km/h]	2.740	2.743	2.736	2.765	100
GG Force (Y) 7	[N]	420.387	418.318	411.865	423.734	100
GG Force 7	[N]	2160.741	2154.881	2147.870	2160.997	100
GG Force (X) 8	[N]	-2119.263	-2113.679	-2119.263	-2107.083	100

#### 4.14 Cálculos Teóricos

Los siguientes datos fueron obtenidos de las simulaciones realizadas en SOLIDWORKS, además de saber los datos exactos de acuerdo con el comportamiento del fluido a diferentes densidades en función a la presión atmosférica y la temperatura promedio anual de tres puntos del trayecto de servicio de la locomotora.

Tabla 10. Datos obtenidos mediante simulación CFD. (Modelo Original)

	PILLONES	AREQUIPA	MATARANI
$F_D$	1280.1 N	1733.13 N	2113.68 N
$F_{sus}$	253.323 N	342.00 N	418.318 N
$\rho$	0.70990 kg/m <sup>3</sup>	0.9598 kg/m <sup>3</sup>	1.174 kg/m <sup>3</sup>
$V$	12.5 m/s	12.5 m/s	12.5 m/s
$\mu$	1.804*10 <sup>-5</sup>	1.809*10 <sup>-5</sup>	1.848*10 <sup>-5</sup>

#### 4.14.1 Cálculo teórico de Coeficiente de arrastre

Para la obtención de los coeficientes de arrastre se utilizará la (ecuación 7) además de los datos obtenidos por la simulación CFD.

##### 4.14.1.1 Pillones

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_f}$$

$$C_d = \frac{1280.1}{\frac{1}{2} * 0.71 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 2.072$$

##### 4.14.1.2 Arequipa

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_f}$$

$$C_d = \frac{1733.13}{\frac{1}{2} * 0.9598 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 2.075$$

##### 4.14.1.3 Matarani

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A_f}$$

$$C_d = \frac{2119.28}{\frac{1}{2} * 1.174 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 2.074$$

#### 4.14.2 Cálculo teórico de Coeficiente de sustentación

Coeficiente de sustentación: para obtener los resultados de los coeficientes de sustentación se utilizará la (ecuación 9). Reemplazando los valores de

las simulaciones de cada ciudad. (varían las fuerzas de sustentación y la densidad).

#### 4.14.2.1 Pillones

$$C_s = \frac{F_{sus}}{\frac{\rho}{2} * V^2 * A_f}$$

$$C_s = \frac{253.323}{\frac{0.71}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.41$$

#### 4.14.2.2 Arequipa

$$C_s = \frac{F_{sus}}{\frac{\rho}{2} * V^2 * A_f}$$

$$C_s = \frac{342}{\frac{0.9598}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.41$$

#### 4.14.2.3 Matarani

$$C_s = \frac{F_{sus}}{\frac{\rho}{2} * V^2 * A_f}$$

$$C_s = \frac{418.318}{\frac{1.174}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.41$$

#### 4.14.3 Cálculo teórico de Eficiencia Aerodinámica

Eficiencia aerodinámica: usamos la (ecuación 10) ya que dependemos de los coeficientes de arrastre y sustentación para determinar la eficiencia.

#### 4.14.3.1 Pillones

$$f = \frac{0.41}{2.072}$$

$$f = 0.20$$

#### 4.14.3.2 Arequipa

$$f = \frac{0.41}{2.070}$$

$$f = 0.20$$

#### 4.14.3.3 Matarani

$$f = \frac{0.41}{2.07}$$

$$f = 0.20$$

### 4.14.4 Cálculo del Número de Reynolds

Para identificar que flujo es el que impacta directamente con la parte frontal de la locomotora se requiere hallar el número de Reynolds, para esto es necesario hallar la viscosidad cinemática, se deben emplear las (ecuaciones 5 y 4). Además del uso de la velocidad de 12.5 m/s y la longitud total de la locomotora de 21.66 m.

#### 4.14.4.1 Pillones

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

$$Re = \frac{12.5 * 20.3}{2.5412 * 10^{-5}}$$

$$Re = 10101512.74 \text{ (flujo turbulento)}$$

#### 4.14.4.2 Arequipa

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

$$Re = \frac{12.5 * 20.3}{1.886 * 10^{-5}}$$

$$Re = 13454400.85 \text{ (flujo turbulento)}$$

#### 4.14.4.3 Matarani

$$Re = \frac{V * L}{\nu}$$

$$Re = \frac{12.5 * 20.3}{1.574 * 10^{-5}}$$

$$Re = 16121346.89 \text{ (flujo turbulento)}$$

Los valores obtenidos reflejan que el comportamiento del fluido es demasiado descontrolado (turbulento), uno de los factores es la gran longitud de la locomotora esto hace que el valor obtenido sea muy elevado.

Tabla 11. valores de numero de Reynolds y eficiencia aerodinámica.

	Número de Reynolds	Eficiencia Aerodinámica
<b>PILLONES</b>	<b>10101512.74</b>	<b>0.20 ó 20%</b>
<b>AREQUIPA</b>	<b>13454400.85</b>	<b>0.20 ó 20%</b>
<b>MATARANI</b>	<b>16121346.89</b>	<b>0.20 ó 20%</b>

#### 4.14.5 Calculo de la Potencia de Arrastre Aerodinámico

Como último dato requerido se halla la potencia de arrastre con la (ecuación 8), ya que este dato nos sirve para saber cuánta es la potencia que requiere el motor para vencer la fuerza de arrastre además plantear si es o no eficiente.

##### 4.14.5.1 Potencia de arrastre en Pillones

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_f * V^3$$

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 0.71 * 2.072 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 16.004 \text{ kW}$$

#### 4.15.5.2 Potencia de arrastre en Arequipa

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_f * V^3$$

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 0.9592 * 2.075 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 21.66 \text{ kW}$$

#### 4.15.5.3 Potencia de arrastre en Matarani

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * \rho * C_d * A_f * V^3$$

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 1.174 * 2.074 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 26.424 \text{ kW}$$

### 4.9 Diseño de Deflectores de Estudio

Los deflectores (tipo 1), (tipo 2) y para la parte superior están en base al estudio realizado al modelo original de la locomotora GT42AC y la propuesta de solución 1 que es la más óptima para su implementación, interpretando como es que el fluido (aire) afecta de manera elevada la aerodinámica ya que esta se ve en función de la fuerza de arrastre, fuerza de sustentación, coeficiente de arrastre, coeficiente de sustentación, densidades, área de la vista frontal y por ultimo su velocidad máxima. Determinando todo el comportamiento con la eficiencia aerodinámica y la potencia de arrastre.

#### 4.9.1 Deflector frontal 01

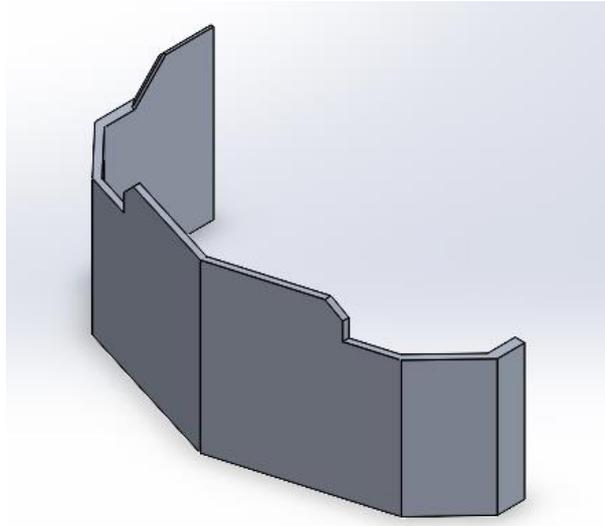


Figura 35. Alternativa de solución 1 – deflector zona frontal [ Tipo 1]

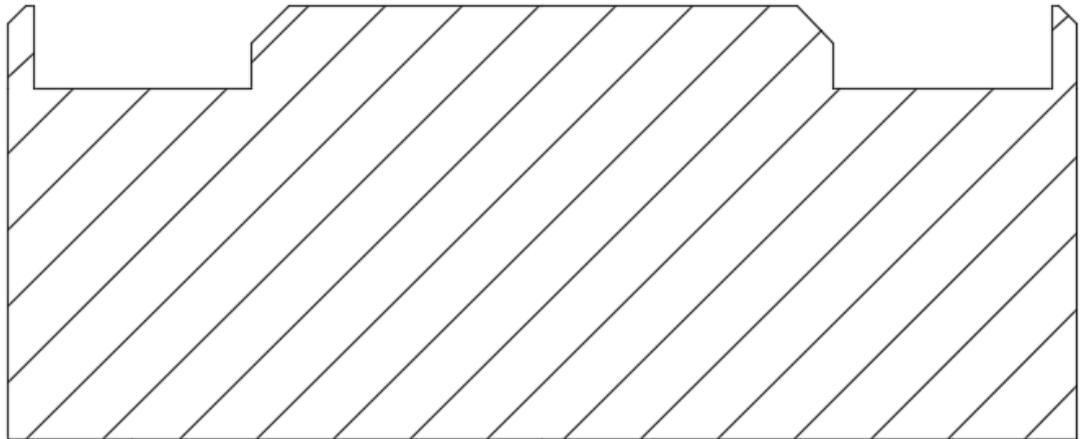
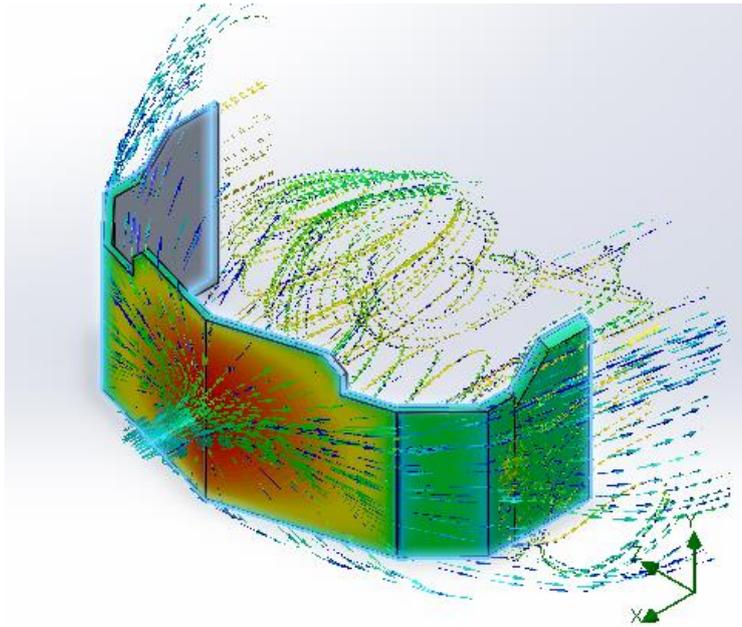


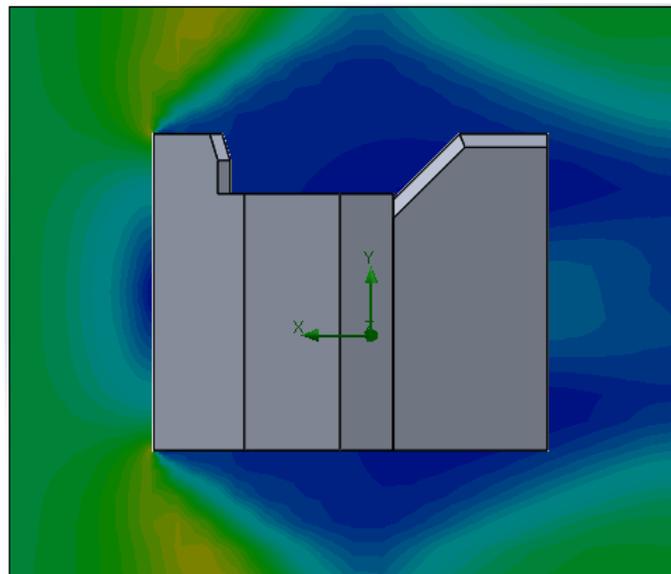
Figura 36. Área de la vista frontal, deflector [Tipo 1]

$$A_f = \sum b * h$$

$$A_f = 3.25 \text{ m}^2$$



*Figura 37. Simulación (deflector 1 parte frontal) vista Isométrica. En función a la presión y velocidad.*



*Figura 38. Simulación (deflector 1 parte frontal) vista lateral. En función a la velocidad*

#### **4.9.1.1 Tablas de resultados Solid Works**

##### **4.9.1.1.1 Pillones**

Tabla 12. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Pillones

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	58828.71	58829.08	58828.70	58829.61	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	58870.04	58870.19	58869.84	58870.70	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	33.578	33.377	33.024	33.586	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-23.200	-23.069	-23.480	-22.594	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	0.291	0.217	0.168	0.291	100
GG Force 6	[N]	306.468	306.134	302.526	308.056	100
GG Force (X) 7	[N]	-306.399	-306.098	-308.054	-302.428	100
GG Force (Y) 8	[N]	-0.089	-0.189	-0.515	0.383	100

#### 4.9.1.1.2 Arequipa

Tabla 13. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Arequipa

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	79763.09	79762.13	79761.37	79763.09	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	79817.70	79817.72	79817.17	79818.23	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	32.963	33.419	32.963	33.676	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-22.548	-23.040	-23.520	-22.548	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	0.167	0.217	0.162	0.316	100
GG Force 6	[N]	413.027	414.403	410.091	417.832	100
GG Force (X) 7	[N]	-412.908	-414.355	-417.812	-410.030	100
GG Force (Y) 8	[N]	-0.254	-0.356	-0.820	0.078	100

#### 4.9.1.1.3 Matarani

Tabla 14. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Matarani

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	100415.65	100414.80	100413.80	100415.74	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	100482.91	100482.92	100482.51	100483.77	79
GG Average Velocity 3	[km/h]	33.106	33.453	32.999	33.868	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-22.749	-23.059	-23.644	-22.582	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	0.266	0.212	0.154	0.307	100
GG Force 6	[N]	505.293	507.713	502.254	512.913	100
GG Force (X) 7	[N]	-505.271	-507.665	-512.887	-502.155	100
GG Force (Y) 8	[N]	-0.461	-0.510	-0.858	0.140	100

Tabla 15. Tabla de resultados 1er difusor (SolidWorks).

	<b>PILLONES</b>	<b>AREQUIPA</b>	<b>MATARANI</b>
$F_D$	<b>306.10 N</b>	<b>414.36 N</b>	<b>507.67 N</b>
$\rho$	<b>0.70990 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>0.9598 kg/m<sup>3</sup></b>	<b>1.174 kg/m<sup>3</sup></b>
$V$	<b>12.5 m/s</b>	<b>12.5 m/s</b>	<b>12.5 m/s</b>
$A_f$	<b>3.25 m<sup>2</sup></b>	<b>3.25 m<sup>2</sup></b>	<b>3.25 m<sup>2</sup></b>

#### 4.9.1.2 Calculo del coeficiente de arrastre

##### 4.9.1.2.1 Pillones

$$C_d = \frac{306.10}{\frac{1}{2} * 0.71 * 12.5^2 * 3.25}$$

$$C_d = 1.7$$

##### 4.9.1.2.2 Arequipa

$$C_d = \frac{414.36}{\frac{1}{2} * 0.9598 * 12.5^2 * 3.25}$$

$$C_d = 1.7$$

##### 4.9.1.2.3 Matarani

$$C_d = \frac{507.665}{\frac{1}{2} * 1.174 * 12.5^2 * 3.25}$$

$$C_d = 1.7$$

#### 4.9.2 Deflector frontal 02

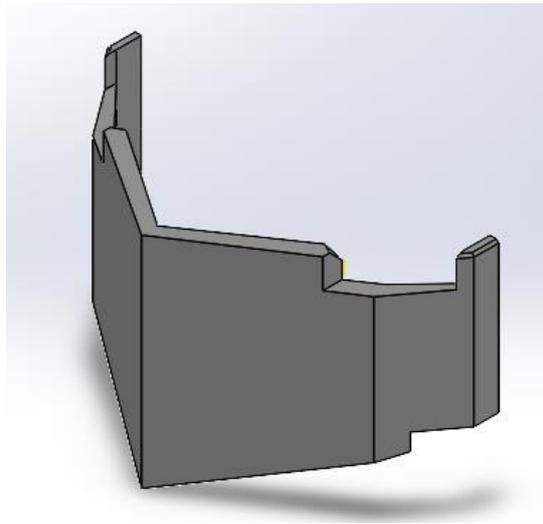


Figura 39. Alternativa de solución 2 – deflector zona frontal [ Tipo 2]

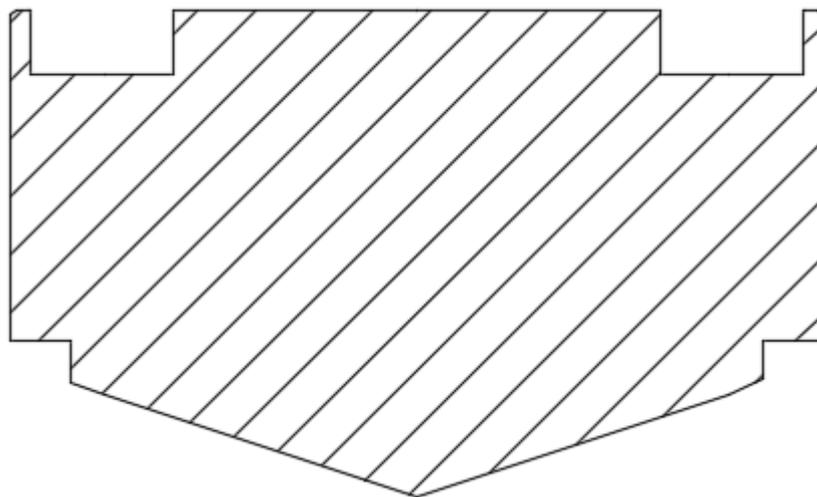


Figura 40. Área de la vista frontal, deflector [Tipo 2]

$$A_f = \sum b * h$$

$$A_f = 4.22 \text{ m}^2$$

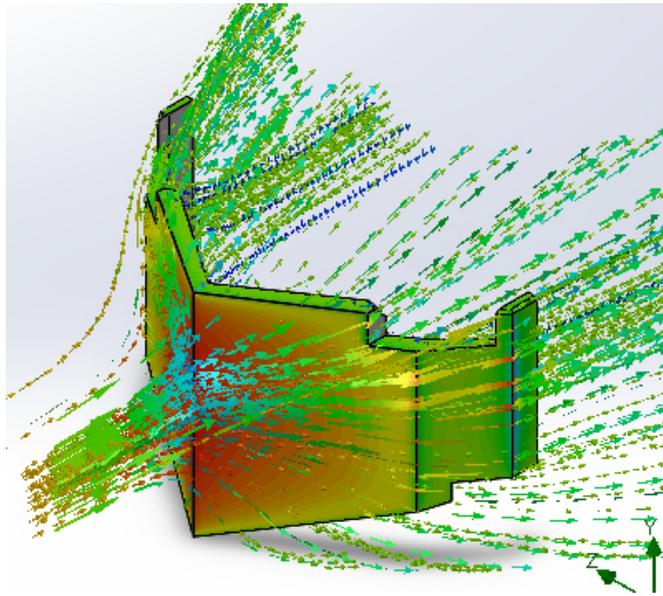


Figura 41. Simulación (deflector 2 parte frontal) vista Isométrica. En función a la presión y velocidad.

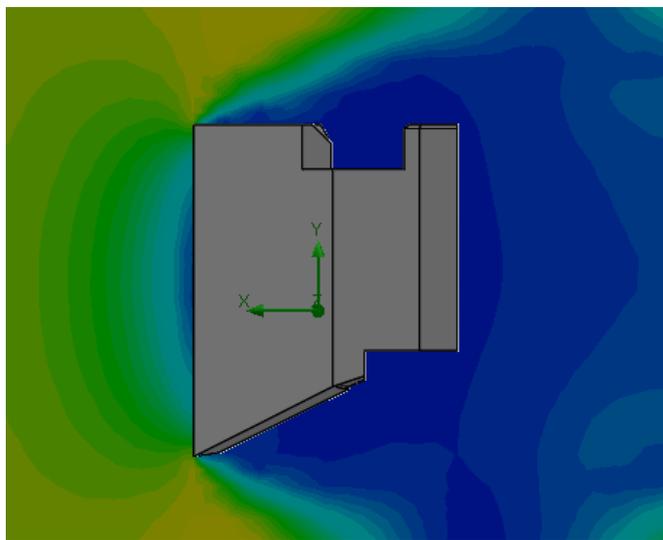


Figura 42. Simulación (deflector 2 parte frontal) vista lateral. En función a la velocidad

## 4.9.2.1 Tablas de resultados Solid Works

### 4.9.2.1.1 Pillones

Tabla 16. Tabla de resultados deflector 2 Solid Word. Pillones

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	58825.68	58825.67	58825.66	58825.68	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	58869.01	58869.01	58869.01	58869.02	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	36.196	36.217	36.196	36.252	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-32.588	-32.584	-32.588	-32.581	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	0.144	0.146	0.143	0.153	100
GG Force 6	[N]	158.448	158.453	158.423	158.480	100
GG Force (X) 7	[N]	-158.447	-158.452	-158.479	-158.422	100
GG Force (Y) 8	[N]	0.502	0.505	0.499	0.511	100

### 4.9.2.1.2 Arequipa

Tabla 17. Tabla de resultados deflector 2 Solid Word. Arequipa

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	79757.67	79757.65	79757.62	79757.67	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	79816.22	79816.23	79816.22	79816.26	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	36.213	36.247	36.212	36.305	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-32.589	-32.584	-32.591	-32.575	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	0.142	0.147	0.142	0.152	100
GG Force 6	[N]	214.082	214.009	213.924	214.083	100
GG Force (X) 7	[N]	-214.081	-214.008	-214.082	-213.923	100
GG Force (Y) 8	[N]	0.697	0.683	0.644	0.706	100

### 4.9.2.1.3 Matarani

Tabla 18. Tabla de resultados deflector 1 Solid Word. Matarani

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	100409.43	100409.40	100409.34	100409.43	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	100481.06	100481.07	100481.06	100481.09	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	36.207	36.243	36.207	36.303	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-32.570	-32.567	-32.576	-32.558	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	0.141	0.146	0.140	0.149	100
GG Force 6	[N]	263.010	262.885	262.791	263.010	100
GG Force (X) 7	[N]	-263.007	-262.883	-263.007	-262.789	100
GG Force (Y) 8	[N]	0.789	0.782	0.734	0.808	100

Tabla 19. Tabla de resultados 2do difusor (SolidWorks).

	<b>PILLONES</b>	<b>AREQUIPA</b>	<b>MATARANI</b>
$F_D$	<b>158.45 N</b>	<b>214.01 N</b>	<b>262.88 N</b>
$\rho$	<b>0.70990 kg/m3</b>	<b>0.9598 kg/m3</b>	<b>1.174 kg/m3</b>
$V$	<b>12.5 m/s</b>	<b>12.5 m/s</b>	<b>12.5 m/s</b>
$A_f$	<b>4.22 m2</b>	<b>4.22 m2</b>	<b>4.22 m2</b>

#### 4.9.2.2 Calculo del coeficiente de arrastre de arrastre

##### 4.9.2.2.1 Pillones

$$C_d = \frac{158.45}{\frac{1}{2} * 0.71 * 12.5^2 * 4.22}$$

$$C_d = 0.67$$

##### 4.9.2.2.2 Arequipa

$$C_d = \frac{214.01}{\frac{1}{2} * 0.9598 * 12.5^2 * 4.22}$$

$$C_d = 0.68$$

##### 4.9.2.2.3 Matarani

$$C_d = \frac{262.88}{\frac{1}{2} * 1.174 * 12.5^2 * 4.22}$$

$$C_d = 0.68$$

### 4.9.3 Deflector superior de cabina

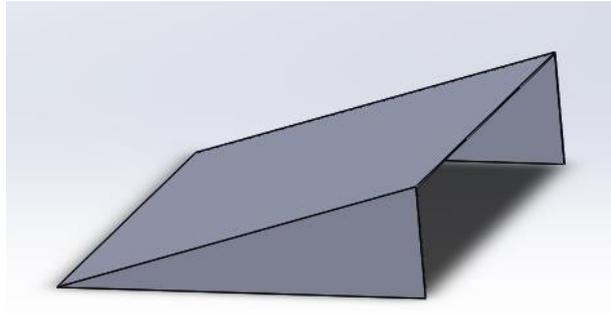


Figura 43. Alternativa de solución – deflector zona superior cabina

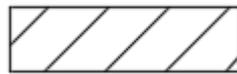


Figura 44. Área de la vista frontal, deflector superior cabina

$$A_f = \sum b * h$$

$$A_f = 0.21 \text{ m}^2$$

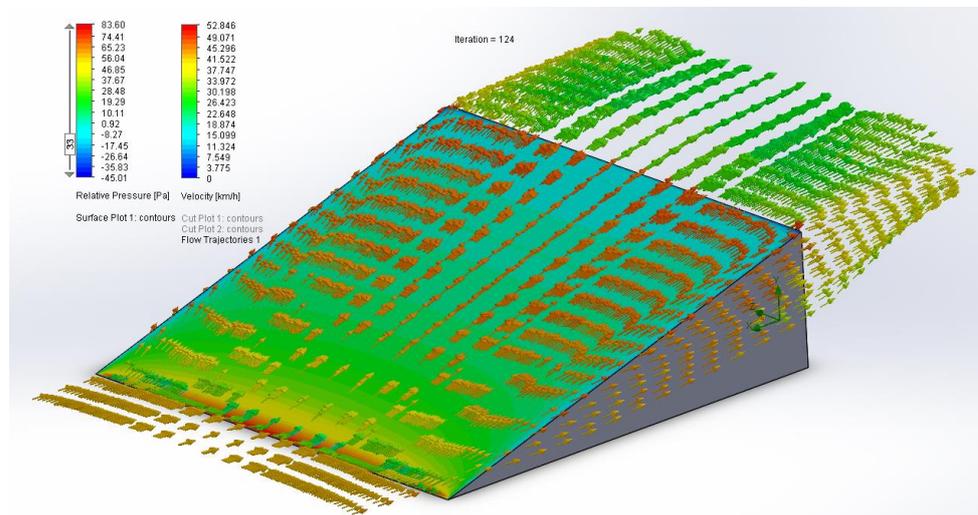


Figura 45. Simulación (deflector parte superior cabina) vista Isométrica.  
En función a la presión y velocidad.

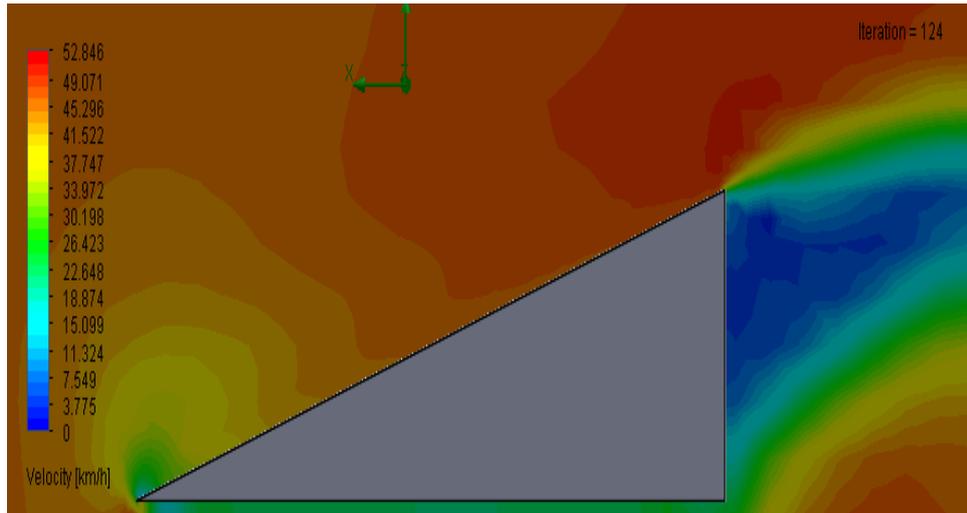


Figura 46. Simulación (deflector parte superior cabina) vista lateral. En función a la velocidad

### 4.9.3.1 Tablas de resultados Solid Works

#### 4.9.3.1.1 Pillones

Tabla 20. Tabla de resultados deflector superior de la cabina Solid Word.

Pillones

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	58820.53	58820.54	58820.53	58820.55	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	58871.70	58871.70	58871.67	58871.70	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	42.131	42.128	42.100	42.134	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-41.008	-41.008	-41.013	-40.983	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	4.599	4.589	4.556	4.599	100
GG Force 6	[N]	7.734	7.730	7.702	7.736	100
GG Force (X) 7	[N]	-5.117	-5.112	-5.121	-5.068	100
GG Force (Y) 8	[N]	-5.800	-5.798	-5.800	-5.795	100

### 4.9.3.1.2 Arequipa

Tabla 21. Tabla de resultados deflector superior de la cabina Solid Word.

#### Arequipa

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	79750.72	79750.72	79750.72	79750.74	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	79819.88	79819.88	79819.84	79819.89	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	42.144	42.141	42.111	42.147	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-41.020	-41.019	-41.025	-40.993	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	4.602	4.592	4.559	4.602	100
GG Force 6	[N]	10.450	10.445	10.403	10.453	100
GG Force (X) 7	[N]	-6.899	-6.892	-6.903	-6.828	100
GG Force (Y) 8	[N]	-7.850	-7.848	-7.850	-7.846	100

### 4.9.3.1.3 Matarani

Tabla 22. Tabla de resultados deflector superior de la cabina Solid Word.

#### Matarani

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	100400.87	100400.88	100400.87	100400.91	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	100485.54	100485.54	100485.49	100485.55	100
GG Average Velocity 3	[km/h]	42.151	42.149	42.121	42.156	100
GG Average Velocity (X) 4	[km/h]	-41.027	-41.026	-41.031	-41.003	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	4.603	4.594	4.562	4.603	100
GG Force 6	[N]	12.785	12.780	12.731	12.790	100
GG Force (X) 7	[N]	-8.431	-8.426	-8.438	-8.353	100
GG Force (Y) 8	[N]	-9.612	-9.609	-9.616	-9.606	100

Tabla 23. Tabla de resultados deflector superior de la cabina.

	PILLONES	AREQUIPA	MATARANI
$F_D$	5.11 N	6.89 N	8.43 N
$\rho$	0.70990 kg/m <sup>3</sup>	0.9598 kg/m <sup>3</sup>	1.174 kg/m <sup>3</sup>
$V$	12.5 m/s	12.5 m/s	12.5 m/s
$A_f$	0.21 m <sup>2</sup>	0.21 m <sup>2</sup>	0.21 m <sup>2</sup>

### 4.9.3.1 Calculo del coeficiente de arrastre de arrastre

#### 4.9.3.2.1 Pillones

$$C_d = \frac{5.11}{\frac{1}{2} * 0.71 * 12.5^2 * 0.21}$$

$$C_d = 0.439$$

#### 4.9.3.2.2 Arequipa

$$C_d = \frac{6.89}{\frac{1}{2} * 0.9598 * 12.5^2 * 0.21}$$

$$C_d = 0.438$$

#### 4.9.3.2.3 Matarani

$$C_d = \frac{8.43}{\frac{1}{2} * 1.174 * 12.5^2 * 0.21}$$

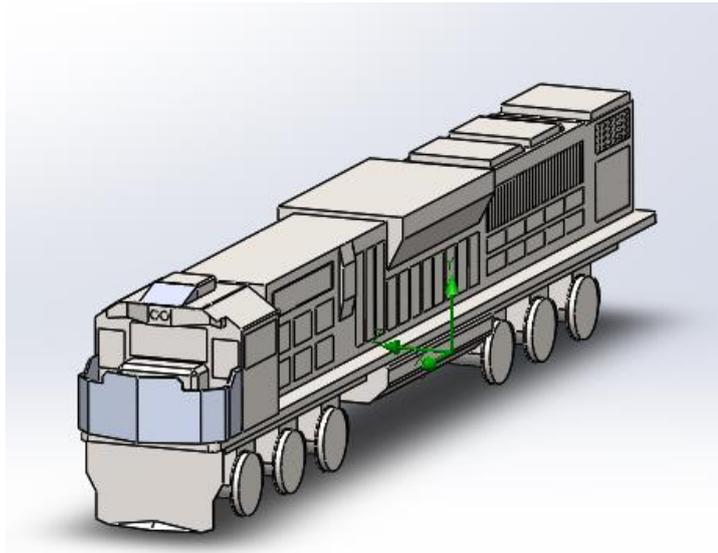
$$C_d = 0.437$$

# CAPÍTULO V

## SIMULACIÓN

### 5.1 Simulación para primera alternativa de solución

#### 5.1.1 Modelado locomotora GT42AC



#### 5.1.2 Cálculo de Área

Área frontal: para el cálculo del área frontal se debe emplear la (ecuación 1) donde se toma  $b$  como base total de la parte frontal de la locomotora y  $h$  la altura desde los ejes hasta la parte más elevada.

$$A_f = \sum b * h$$

$$A_f = 11.14 \text{ m}^2$$

#### 5.1.3 Cálculo de Densidad

##### 5.1.3.1 Pillones

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{58.82}{0.2870 * 288.5}$$

$$\rho = 0.71 \text{ kg/m}^3$$

### 5.1.3.2 Arequipa

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{79.75}{0.2870 * 289.5}$$

$$\rho = 0.9598 \text{ kg/m}^3$$

### 5.1.3.3 Matarani

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{100.4}{0.2870 * 297.8}$$

$$\rho = 1.174 \text{ kg/m}^3$$

## 5.1.4 Simulación de locomotora GT42AC (1ra propuesta)

### 5.1.4.1 Simulación a condiciones ambientales de Pillones

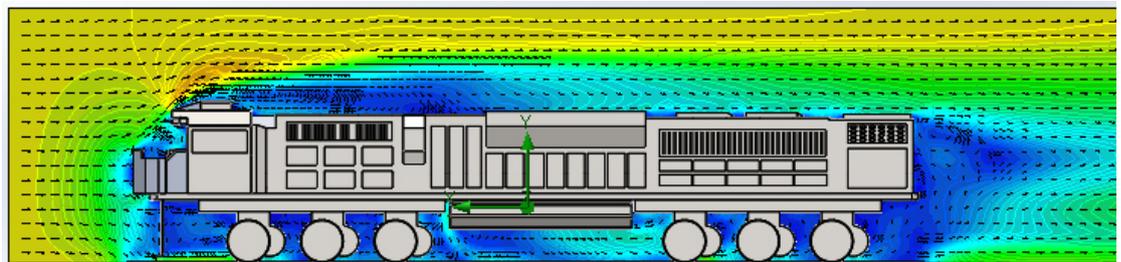


Tabla 24. Resultados del ensamble propuesta de solución 1. SOLIDWORKS  
características Pillones

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	58820.25	58820.23	58820.20	58820.26	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	58865.41	58865.32	58865.00	58865.66	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-38.308	-38.228	-38.386	-38.080	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	39.157	39.130	38.985	39.264	100
GG Force 6	[N]	729.278	726.051	719.125	735.928	100
GG Force (X) 7	[N]	-689.919	-693.269	-700.774	-684.164	100
GG Force (Y) 8	[N]	236.343	214.612	181.813	251.528	100
GG Average Velocity (Y) 10	[km/h]	1.808	1.834	1.726	1.934	100

### 5.1.4.2 Simulación a condiciones ambientales de Arequipa

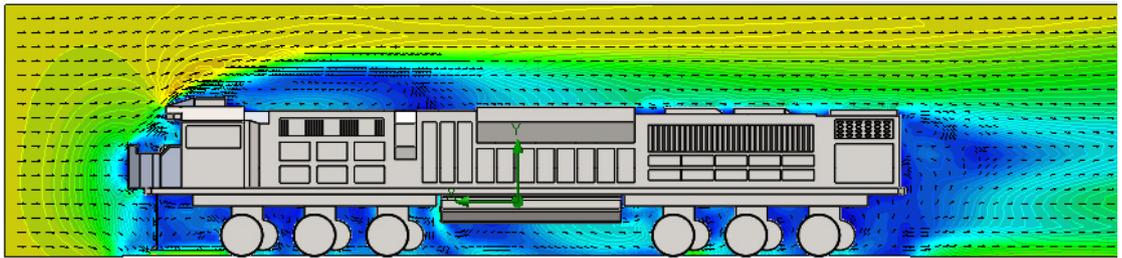


Tabla 25. Resultados del ensamble propuesta de solución 1. SOLIDWORKS características Arequipa.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	79750.31	79750.31	79750.28	79750.34	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	79811.38	79811.55	79811.10	79811.97	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-38.264	-38.290	-38.462	-38.136	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	39.138	39.182	39.037	39.340	100
GG Force 6	[N]	984.076	982.222	972.296	990.330	100
GG Force (X) 7	[N]	-936.762	-938.610	-952.544	-930.491	100
GG Force (Y) 8	[N]	301.461	288.136	251.178	333.003	100
GG Average Velocity (Y) 10	[km/h]	1.867	1.835	1.736	1.927	100

### 5.1.4.3 Simulación a condiciones ambientales de Matarani



Tabla 26. Resultados del ensamble propuesta de solución 1. SOLIDWORKS características Matarani.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	100400.24	100400.23	100400.21	100400.26	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	100482.31	100482.23	100482.00	100482.50	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-41.131	-41.002	-41.131	-40.916	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	41.674	41.592	41.517	41.674	100
GG Force 6	[N]	1238.714	1245.381	1238.376	1256.683	100
GG Force (X) 7	[N]	-1178.340	-1185.108	-1200.041	-1176.356	100
GG Force (Y) 8	[N]	381.999	381.903	340.327	419.117	100
GG Average Velocity (Y) 10	[km/h]	1.406	1.446	1.405	1.497	100

### 5.1.5 Cálculos Teóricos

Los siguientes datos fueron obtenidos de las simulaciones realizadas en SOLIDWORKS, además de saber los datos exactos de acuerdo con el comportamiento del fluido a diferentes densidades en función a la presión atmosférica y la temperatura promedio anual de tres puntos del trayecto de servicio de la locomotora. Estos resultados ya se ven modificados por el modelo de deflector de la primera propuesta de solución.

*Tabla 27. Datos obtenidos mediante simulación CFD.*

	PILLONES	AREQUIPA	MATARANI
$F_D$	693.27 N	938.591 N	1185.108 N
$F_{sus}$	214.61 N	288.747 N	381.903 N
$\rho$	0.71 kg/m <sup>3</sup>	0.9598 kg/m <sup>3</sup>	1.174 kg/m <sup>3</sup>
$V$	12.5 m/s	12.5 m/s	12.5 m/s
$\mu$	1.804*10 <sup>-5</sup>	1.809*10 <sup>-5</sup>	1.848*10 <sup>-5</sup>

#### 5.1.5.1 Cálculo teórico de Coeficiente de arrastre (primer modelo)

Coeficiente de arrastre: para hallar el coeficiente de arrate se usa la (ecuación 7) donde se emplean los datos obtenidos por análisis CFD.

##### 5.1.5.1.1 Pillones

$$C_d = \frac{693.27}{\frac{1}{2} * 0.71 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 1.12$$

##### 5.1.5.1.2 Arequipa

$$C_d = \frac{938.591}{\frac{1}{2} * 0.9598 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 1.12$$

### 5.1.5.1.3 Matarani

$$C_d = \frac{1185.108}{\frac{1}{2} * 1.174 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 1.16$$

### 5.1.5.2 Cálculo teórico de Coeficiente de sustentación

Coeficiente de sustentación: para obtener los resultados de los coeficientes de sustentación se utilizará la (ecuación 9). Reemplazando los valores de las simulaciones de cada ciudad. (varían las fuerzas de sustentación y la densidad).

#### 5.1.5.2.1 Pillones

$$C_s = \frac{214.61}{\frac{0.71}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.35$$

#### 5.1.5.2.2 Arequipa

$$C_s = \frac{288.747}{\frac{0.9598}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.35$$

#### 5.1.5.2.3 Matarani

$$C_s = \frac{381.903}{\frac{1.174}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.37$$

### 5.1.5.3 Cálculo teórico de Eficiencia Aerodinámica

Eficiencia aerodinámica: usamos la (ecuación 10) ya que dependemos de los coeficientes de arrastre y sustentación para determinar la eficiencia.

#### 5.1.5.3.1 Pillones

$$f = \frac{0.35}{1.12}$$

$$f = 0.31$$

#### 5.1.5.3.2 Arequipa

$$f = \frac{0.345}{1.12}$$

$$f = 0.31$$

#### 5.1.5.3.3 Matarani

$$f = \frac{0.37}{1.16}$$

$$f = 0.32$$

#### 5.1.5.4 Cálculo de la Potencia de Arrastre Aerodinámico (1er modelo de solución)

Como último dato requerido se halla la potencia de arrastre con la (ecuación 8), ya que este dato nos sirve para saber cuánta es la potencia que requiere el motor para vencer la fuerza de arrastre además plantear si es o no eficiente.

##### 5.1.5.4.1 Potencia de arrastre Pillones (1re modelo)

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 0.71 * 1.12 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 8.67 \text{ kW}$$

#### 5.1.5.4.2 Potencia de arrastre Arequipa (1re modelo)

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 0.9598 * 1.12 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 11.73 \text{ kW}$$

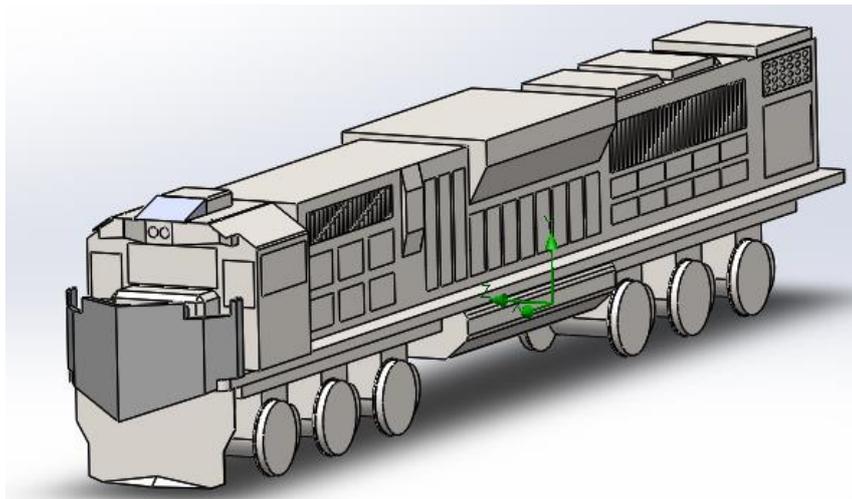
#### 5.1.5.4.3 Potencia de arrastre en Matarani (1re modelo)

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 1.174 * 1.16 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 14.81 \text{ kW}$$

### 5.2 Simulación para segunda alternativa de solución

#### 5.2.1 Modelado locomotora GT42AC



#### 5.2.2 Cálculo de Área

Área frontal: para el cálculo del área frontal se debe emplear la (ecuación 1) donde se toma  $b$  como base total de la parte frontal de la locomotora y  $h$  la altura desde los ejes hasta la parte más elevada.

$$A_f = \sum b * h$$

$$A_f = 11.14 \text{ m}^2$$

Coefficiente de arrastre: para hallar el coeficiente de arrate se usa la (ecuación 7) donde se emplean los datos obtenidos por análisis CFD.

## 5.2.3 Cálculo de Densidad

### 5.2.3.1 Pillones

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{58.82}{0.2870 * 288.5}$$

$$\rho = 0.71 \text{ kg/m}^3$$

### 5.2.3.2 Arequipa

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{79.75}{0.2870 * 289.5}$$

$$\rho = 0.9598 \text{ kg/m}^3$$

### 5.2.3.3 Matarani

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

$$\rho = \frac{100.4}{0.2870 * 297.8}$$

$$\rho = 1.174 \text{ kg/m}^3$$

## 5.2.4 Simulación de locomotora GT42AC

### 5.2.4.1 Simulación a condiciones ambientales de Pillones



Tabla 28. Resultados del ensamble propuesta de solución 2. SOLIDWORKS características Pillones.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	58820.05	58820.04	58820.04	58820.05	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	58869.51	58869.48	58869.39	58869.51	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-41.425	-41.402	-41.425	-41.335	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	41.893	41.874	41.819	41.893	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	1.239	1.246	1.239	1.258	100
GG Force 6	[N]	794.127	791.294	786.822	794.572	100
GG Force (X) 7	[N]	-741.683	-739.005	-742.053	-734.357	100
GG Force (Y) 8	[N]	283.692	282.673	279.790	284.741	100

### 5.2.4.2 Simulación a condiciones ambientales de Arequipa

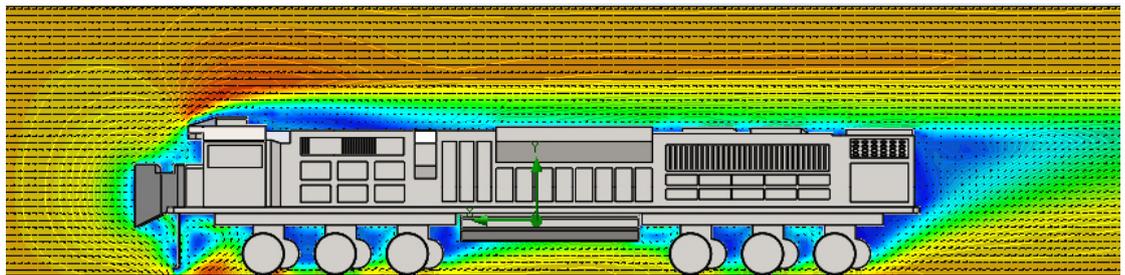


Tabla 29. Resultados del ensamble propuesta de solución 2. SOLIDWORKS características Arequipa.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	79750.07	79750.07	79750.06	79750.07	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	79817.16	79817.12	79816.98	79817.17	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-41.439	-41.419	-41.440	-41.348	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	41.906	41.888	41.822	41.907	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	1.237	1.241	1.237	1.246	100
GG Force 6	[N]	1071.282	1070.193	1066.814	1072.253	100
GG Force (X) 7	[N]	-1000.342	-998.658	-1001.026	-994.667	100
GG Force (Y) 8	[N]	383.108	384.411	381.502	387.500	100

### 5.2.4.3 Simulación a condiciones ambientales de Matarani

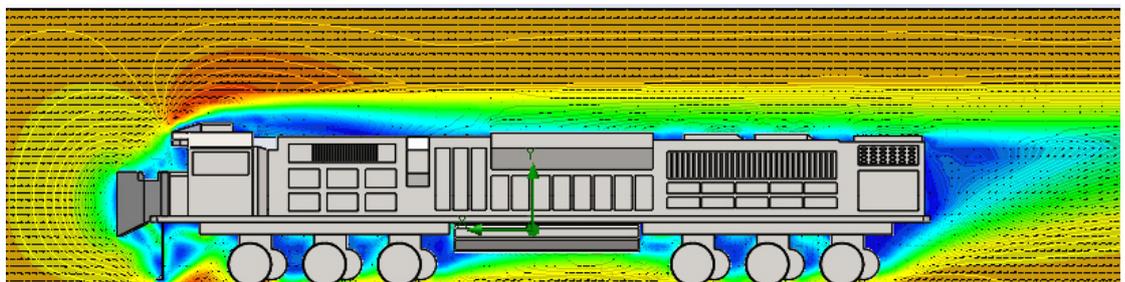


Tabla 30. Resultados del ensamble propuesta de solución 2. SOLIDWORKS características Matarani.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]
GG Average Static Pressure 1	[Pa]	100400.08	100400.08	100400.07	100400.08	100
GG Average Total Pressure 2	[Pa]	100481.67	100481.62	100481.41	100481.68	100
GG Average Velocity (X) 3	[km/h]	-41.457	-41.437	-41.458	-41.367	100
GG Average Velocity 5	[km/h]	41.924	41.906	41.839	41.925	100
GG Average Velocity (Y) 5	[km/h]	1.236	1.237	1.236	1.243	100
GG Force 6	[N]	1300.658	1304.983	1299.572	1311.361	100
GG Force (X) 7	[N]	-1214.419	-1217.734	-1223.372	-1213.288	100
GG Force (Y) 8	[N]	465.489	468.800	463.836	474.384	100

### 5.2.5 Cálculos Teóricos

Los siguientes datos fueron obtenidos de las simulaciones realizadas en SOLIDWORKS, además de saber los datos exactos de acuerdo con el comportamiento del fluido a diferentes densidades en función a la presión atmosférica y la temperatura promedio anual de tres puntos del trayecto de servicio de la locomotora.

*Tabla 31. Datos obtenidos mediante simulación CFD.*

	PILLONES	AREQUIPA	MATARANI
$F_D$	739.01 N	998.658 N	1217.73 N
$F_{sus}$	282.67 N	384.411 N	463.8 N
$\rho$	0.71 kg/m <sup>3</sup>	0.9598 kg/m <sup>3</sup>	1.174 kg/m <sup>3</sup>
$V$	12.5 m/s	12.5 m/s	12.5 m/s
$\mu$	1.804*10 <sup>-5</sup>	1.809*10 <sup>-5</sup>	1.848*10 <sup>-5</sup>

#### 5.2.5.1 Cálculo teórico de Coeficiente de arrastre (segunda solución)

Coeficiente de arrastre: para hallar el coeficiente de arrate se usa la (ecuación 7) donde se emplean los datos obtenidos por análisis CFD.

#### 5.2.5.1.1 Pillones

$$C_d = \frac{739.01}{\frac{1}{2} * 0.71 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 1.2$$

#### 5.2.5.1.2 Arequipa

$$C_d = \frac{998.658}{\frac{1}{2} * 0.9598 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 1.2$$

#### 5.2.5.1.3 Matarani

$$C_d = \frac{1217.73}{\frac{1}{2} * 1.174 * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_d = 1.2$$

#### 5.2.5.2 Cálculo teórico de Coeficiente de sustentación (segunda solución)

Coeficiente de sustentación: para obtener los resultados de los coeficientes de sustentación se utilizará la (ecuación 9). Reemplazando los valores de las simulaciones de cada ciudad. (varían las fuerzas de sustentación y la densidad).

#### 5.2.5.2.1 Pillones

$$C_s = \frac{282.67}{\frac{0.71}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.46$$

#### 5.2.5.2.2 Arequipa

$$C_s = \frac{384.411}{\frac{0.9598}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.46$$

#### 5.2.5.2.3 Matarani

$$C_s = \frac{468.8}{\frac{1.174}{2} * 12.5^2 * 11.14}$$

$$C_s = 0.46$$

#### 5.2.5.3 Cálculo teórico de Eficiencia Aerodinámica (segundo modelo)

Eficiencia aerodinámica: usamos la (ecuación 10) ya que dependemos de los coeficientes de arrastre y sustentación para determinar la eficiencia.

##### 5.2.5.3.1 Pillones

$$f = \frac{0.46}{1.2}$$

$$f = 0.38$$

##### 5.2.5.3.2 Arequipa

$$f = \frac{0.46}{1.2}$$

$$f = 0.38$$

##### 5.2.5.3.3 Matarani

$$f = \frac{0.46}{1.19}$$

$$f = 0.39$$

### 5.2.5.4 Cálculo de la Potencia de Arrastre Aerodinámico (1re modelo de solución)

Como último dato requerido se halla la potencia de arrastre con la (ecuación 8), ya que este dato nos sirve para saber cuánta es la potencia que requiere el motor para vencer la fuerza de arrastre además plantear si es o no eficiente.

#### 5.2.5.4.1 Potencia de arrastre en Pillones (2do modelo)

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 0.71 * 1.2 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 9.24 \text{ kW}$$

#### 5.1.6.4.2 Potencia de arrastre en Arequipa (2do modelo)

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 0.9598 * 1.2 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 12.48 \text{ kW}$$

#### 5.1.6.4.3 Potencia de arrastre en Matarani (2do modelo)

$$P_{arras} = \frac{1}{2} * 1.174 * 1.2 * 11.14 * 12.5^3$$

$$P_{arras} = 15.18 \text{ kW}$$

## 5.3 Tabla de balance de resultados por estaciones

### 5.3.1 Tabla Pillones

Tabla 32. Balance de resultados de la estación Pillones (modelo original)  
(solucion1) (solución2)

	Sin deflectores	1ra solución	2da solución
$C_d$	2.072	1.12	1.20
$C_s$	0.41	0.35	0.46
$f$	0.2	0.31	0.38
$P_{arras}$	16 kW	8.67 kW	9.24 kW

### 5.3.2 Tabla Arequipa

Tabla 33. Tabla 34. Balance de resultados de la estación Arequipa (modelo original) (solucion1) (solución2)

	Sin deflectores	1ra solución	2da solución
$C_d$	2.075	1.12	1.20
$C_s$	0.41	0.35	0.46
$f$	0.20	0.31	0.38
$P_{arras}$	21.66 kW	11.73 kW	12.48 kW

### 5.3.2 Tabla Matarani

Tabla 35. Tabla 36. Balance de resultados de la estación Matarani (modelo original) (solucion1) (solución2)

	Sin deflectores	1ra solución	2da solución
$C_d$	2.07	1.16	1.19
$C_s$	0.41	0.37	0.46
$f$	0.2	0.32	0.39
$P_{arras}$	26.49 kW	14.81 kW	15.18 kW

### 5.3.3 Análisis de resultados

#### 5.3.3.1 Locomotora Sin Deflector

Tabla 37. Valores promedios de la ruta en general. (modelo original)

Ruta de la locomotora GT42AC	
$C_d(prom)$	2.07
$f(prom)$	0.2
$P_{arras}(prom)$	18.83 kW

#### 5.3.3.2 Locomotora Modelo 1

Tabla 38. Valores promedios de la ruta en general. (modelo 1)

Ruta de la locomotora GT42AC	
$C_d(prom)$	1.14
$f(prom)$	0.31

<b><math>P_{arras}</math> (prom)</b>	<b>10.20 kW</b>
<b>Mejoramiento</b>	<b>46%</b>

### 5.3.3.3 Locomotora Modelo 2

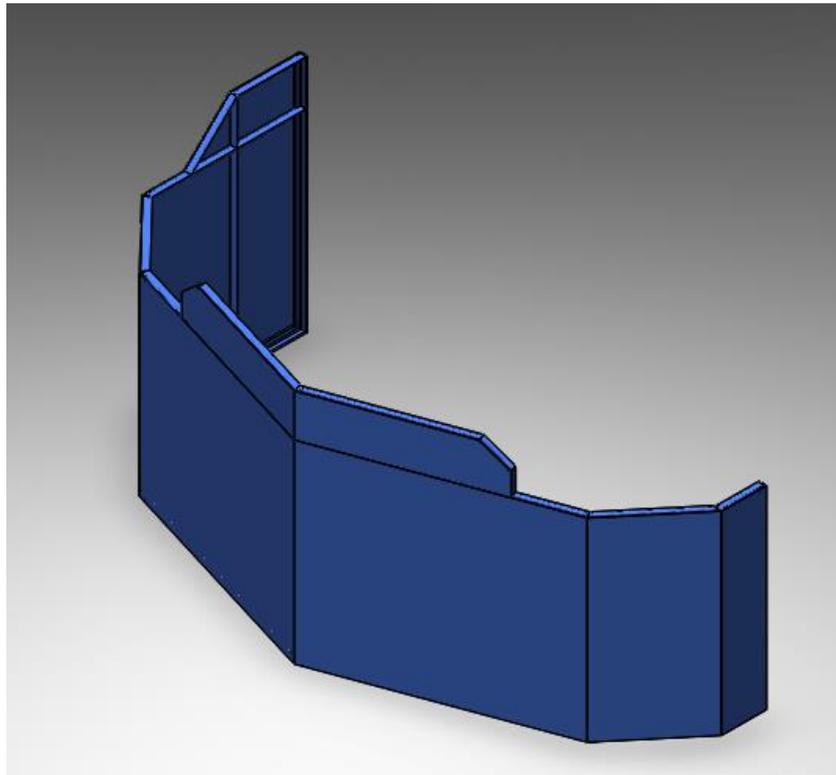
Tabla 39. Valores promedios de la ruta en general. (modelo 2)

<b>Ruta de la locomotora GT42AC</b>	
<b><math>C_d</math>(prom)</b>	<b>1.19</b>
<b><math>f</math> (prom)</b>	<b>0.38</b>
<b><math>P_{arras}</math> (prom)</b>	<b>10.86 kW</b>
<b>Mejoramiento</b>	<b>42%</b>

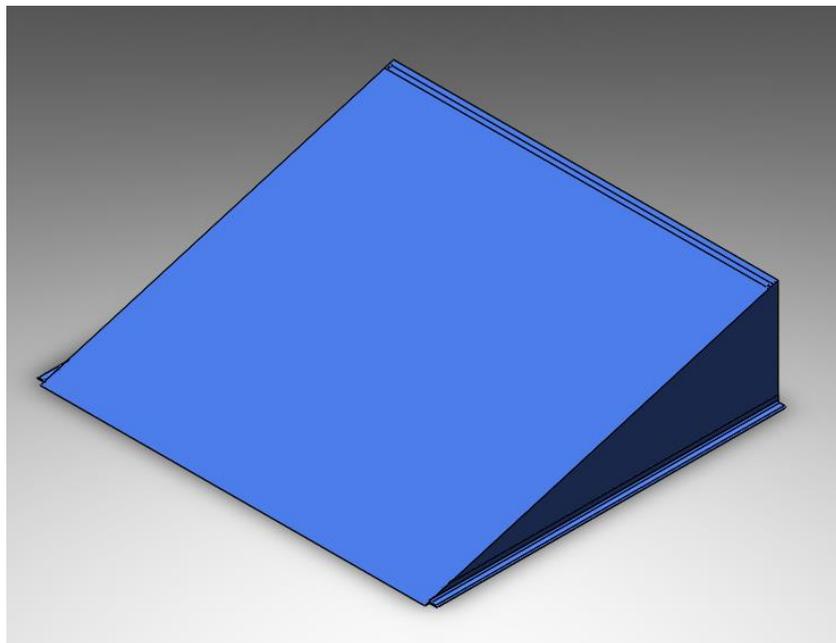
Una vez obtenido los resultados del desempeño de los deflectores se llega a la elección del modelo 1 ya que su mejora brinda un 46% mientras que el segundo modelo solo un 42%, la locomotora GT42AC (modelo original) muestra un promedio de coeficiente de arrastre de 2.07 siendo este comparado con una placa plana, su eficiencia aerodinámica promedio medida en 0.2 esto nos indica su poca eficiente de la estructura frontal de la máquina, su potencia de arrastre está dada por 18.83 kW que el motor deberá generar para romper las cargas aerodinámicas.

Siendo ya colocado el deflector delantero seleccionado y el deflector de la parte superior de la cabina, los valores obtenidos reflejan la efectividad del trabajo de investigación ya que su coeficiente de arrastre promedio es de 1.14 relacionado a un sólido triangular el cual presenta un comportamiento más aerodinámico, su eficiencia aerodinámica es de 0.31 siendo una reestructura con mayor eficiencia aerodinámica y por último la potencia que el motor deberá de ejercer para romper las fuerzas aerodinámicas es de 10.20 kW reduciendo 8.63 kW de potencia mejorando su eficiencia general del motor y reduciendo los niveles del consumo de combustible.

### 5.3.5 Material a utilizar



*Figura 47 Modelo de deflector frontal seleccionado*



*Figura 48 Modelo de deflector superior seleccionado*

|

Una vez obtenida la solución del modelo a usar que ayuda a la mejora de la eficiencia aerodinámica el material para su fabricación será el aluminio serie (3003 y 6061) ya que su aleación al silicio y magnesio para la serie 6061 (Mg<sub>2</sub>Si) y su aleación de manganeso para la serie 3000 (Al<sub>6</sub>Mn) nos brindan resistencia mecánica adecuada, buena maleabilidad, resistencia a la corrosión, soldabilidad y resistencia a la brisa del mar.

### 5.3.5.1 Aluminio serie 3003 (estructura, perfil L35x35x3)

Su aleación de aluminio y manganeso forjado brindan un material resistente, con buena trabajabilidad, soldabilidad y resistencia a la corrosión. Su uso es usualmente en tanques de combustible, equipos químicos, alabes de ventiladores, camas de camiones, etc. Se recomienda un trabajo en frío para aumentar la resistencia. (ALUMINIO AERONÁUTICO, 2020). Las propiedades del aluminio serie 3003 son:

*Tabla 40. Propiedades físicas del aluminio serie 3003.*

Típicas propiedades físicas del aluminio 3003	Métrico	Imperial
Densidad	2.73 g/cm <sup>3</sup>	0.0939 lb/in <sup>3</sup>
Punto de fusión	644°C	1190°F

*Tabla 41. Composición química del aluminio serie 3003.*

Composición química del aluminio 3003	Contenido %
Al	98.6
Mn	1.2
Cu	0.12

*Tabla 42. Propiedades mecánicas del aluminio serie 3003.*

Típicas propiedades mecánicas del aluminio 3003	Métrico	Imperial
Fuerza tensil	130 MPa	18855 psi
Límite elástico	125 MPa	18130 psi
Resistencia al corte	83 MPa	12039 psi
Resistencia a la fatiga	55 MPa	7977 psi
Módulo elástico	70-80 GPa	10153-11603 ksi
Coefficiente de Poisson	0.33	0.33
Elongación	10%	10%
Dureza	35	35

*Tabla 43. Propiedades térmicas del aluminio serie 3003.*

Propiedades térmicas del aluminio 3003		T (°C)	Tratamiento
Coefficiente de expansión térmica	23.2 (10-6/°C)	20-100	-
Conductividad térmica	162 W/mK	25	H12

### 5.3.5.2 Aluminio serie 6061 (planchas de aluminio 3mm)

Su resistencia media alta, además de presentar buena resistencia a la corrosión y óptima soldabilidad, lo vuelven un material óptimo para los deflectores, componentes aeroespaciales y aviación, vagones de ferrocarril, transporte, accesorios marinos, etc. Su composición está dada por 8 elementos (zinc, cobre y titanio) el silicio uno de los más importantes y en mayor porcentaje de uso. Al pasar por diferentes tratamientos térmicos como recocido, de solución y precipitación mejoran la trabajabilidad del metal estabilizando las propiedades mejorando sus capacidades mecánicas

y endurecer la superficie. (ALUMINIO AERONÁUTICO, 2020). Las propiedades del aluminio serie 6061 son:

*Tabla 44. Propiedades físicas del aluminio serie 6061.*

Típicas propiedades físicas del aluminio 6061	Métrico
Densidad	2.7 g/cm <sup>3</sup>
Punto de fusión	580°C
Módulo de elasticidad	70-80 GPa
Coefficiente de Poisson	0.33

*Tabla 45. Disponibilidad para Procesos térmicos aluminio serie 6061.*

Temple	Ult. Fuerza tensil (MPa)	0.2% Prueba de estrés (MPa)	Dureza Brinell (500kg carga, 10mm bola)	Elongación 50mm dia (%)
O	110-152	65-110	30-33	14-16
T1	180	95-96		16
T4	179 min	110 min		
T6	260-310	240-276	95-97	13-Sep

*Tabla 46. Composición química del aluminio serie 6061.*

Componente	Contenido (wt.%)
Aluminio	Balance
Magnesio	0.8-1.2
Silicio	0.4 - 0.8
Hierro	Max. 0.7
Cobre	0.15-0.40
Zinc	Max. 0,25
Titanio	Max. 0,15
Manganeso	Max. 0,15
Cromo	0.04-0.35
Otros	0.05

Tabla 47. Propiedades térmicas del aluminio serie 6061

Típicas propiedades térmicas del aluminio 6061	Métrico
Coefficiente de expansión térmica (20-100 °C)	23.5x10 <sup>-6</sup> m/m.°C
Conductividad térmica	173 W/m. K

Tabla 48. Propiedades eléctricas del aluminio serie 6061.

Típicas propiedades eléctricas del aluminio 6061	Métrico
Resistividad eléctrica	3.7 - 4.0 x10 <sup>-6</sup> Ω.cm

### 5.3.6 Tipo de Anclaje

El anclaje deberá ser por soldadura TIG (Tungsten Inert Gas). ya que la ventaja de la soldadura TIG son sus cordones resistentes, dúctiles y menos sensibles a la corrosión por el gas de protección. Esta soldadura es utilizada para metales ferrosos y no ferrosos. El aluminio es un material que presenta propiedades únicas que lo diferencian de otros metales gracias a esto la soldadura por técnica TIG es la más recomendable. (¿Qué tener en cuenta al soldar aluminio con TIG?, 2020). El correcto material de aporte a utilizar debería de ser:

Tabla 49. Tabla de selección para el material de aporte.

METAL DE APORTACIÓN RECOMENDADO PARA LAS DIFERENTES ALEACIONES DE ALUMINIO		
Material Base	Metal de aportación recomendado <sup>1</sup>	
	Para resistencia máxima en estado bruto de soldadura	Para alargamiento máximo
EC	1100	EC 1260
1100	1100, 4043	1100, 4043
2219	2319	(2)
3003	5183, 5356	1100, 4043
3004	5554, 5356	5183, 4043
5005	5183, 4043, 5356	5183, 4043
5051	5356	5183, 4043
5052	5356, 5183	5183, 4043, 5356
5083	5183, 5356	5183, 5356
5086	5183, 5356	5183, 5356
5050	5356, 5183	5183, 5356, 5654
5052	5554, 5356	5356
5083	5356, 5554	5554, 5356
5086	5556	5183, 5356
6061	4043, 5183	5356 <sup>3</sup>
6063	4043, 5183	5356 <sup>3</sup>
7005	5356, 5183	5183, 5356
7039	5356, 5183	5183, 5356

Notas:

1. Recomendaciones para chapa en estado "0"
2. Ductilidad de la soldadura de estos metales se ve apreciablemente afectada por el metal de aportación. El alargamiento de estos metales base es generalmente inferior que el resto.
3. Para uniones soldadas 6061 y 6063 que requieren la máxima conductividad eléctrica, utilizar 4043 como metal de aportación. Sin embargo, si se necesita tanto resistencia como conductividad, utilice metal de aportación 5356 y aumente el refuerzo de la soldadura para compensar la baja conductividad del 5356.

### 5.3.7 Producto Comercial

Tabla 50. Costo de Diseño

<b>COSTO DE DISEÑO</b>					
N°	Ítem	Cantidad	Precio Unidad (S/.)	Tiempo N°semana	Precio (S/.)
1	Ingeniero Junior	2	500.00	8	S/. 8000.00
2	Prototipo	1	224.00	3	S/. 672.00
				Subtotal	S/. 8672.00

Tabla 51. Costos de elementos comerciales.

<b>COSTOS DE ELEMENTOS COMERCIALES</b>					
ID	Ítem	Cantidad	Unidad	Precio Unitario (S/.)	Precio (S/.)
1	Aluminio serie 6061 planchas (1200*2400*3 mm)	1.5	Und	450.00	S/. 675.00
2	Aluminio serie 3003 perfil (L35x35x3) x 6m	19.5	ml	79.64	S/. 318.56
3	Material de aporte soldadura TIG aluminio 5183-5356 x1m	6	Und	1.20	S/. 7.20
4	Material de aporte soldadura TIG aluminio 4043-5183 x1m	20	Und	1.80	S/. 36.00
				Subtotal	S/. 1036.76

Tabla 52. Costos de fabricación de elementos diseños.

<b>COSTOS DE FABRACION DE ELEMENNTOS DISEÑADOS</b>						
N°	Elemento	Proceso de Manufactura	Material	Observaciones	Cant.	Precio (S/.)
1	Difusor Frontal	Soldadura	Aluminio serie 3003 &6061	Soldadura TIG Electrodo (5183-5356) -(4043-5183)	1	S/. 780.00
2	Difusor superior cabina	Soldadura	Aluminio serie 3003 &6061	Soldadura TIG Electrodo (5183-5356) -(4043-5183)	1	S/. 260.00
				Subtotal		S/. 1040.00

Tabla 53. Resumen de costos.

<b>RESUMEN DE COSTOS</b>		
N°	Denominación	Precio Parcial (S/.)
1	Costos de Diseño	S/. 8672.00
2	Costo de Elementos Comerciales	S/. 1036.76
3	Costos de Fabricación de Elementos Diseños	S/. 1040.00
Costo Total		S/. 10748.76

## CONCLUSIONES

Se propone el diseño de dos deflectores uno frontal y uno para la parte superior de la cabina debido a que son las ubicaciones donde se ve la necesidad de corregir su aerodinámica luego de la simulación por dinámica de fluidos computacional.

El material para utilizar en la fabricación de ambos difusores es el aluminio serie 6000 ya que sus propiedades de resistencia mecánica adecuada, resistencia a la corrosión, soldabilidad y resistencia a la brisa del mar son factibles para la ruta que realiza la locomotora GT42AC, además el tipo de sujeción a la estructura de la locomotora será mediante soldadura (TIG) debido al tipo de material seleccionado.

Gracias a la simulación CFD para los deflectores y nuestra matriz morfológica se consideró el uso de ángulos entre  $18^\circ$  y  $20^\circ$  respecto a la cara de enfrentamiento por su capacidad al enfrentar el fluido, permitiendo una mejora de la eficiencia aerodinámica. Además de obtener los resultados esperados se logró determinar cómo se debe realizar la estructura de fabricación.

Una vez definido el comportamiento del modelo original de la locomotora GT42AC en sus trayectos Pillones-Arequipa-Matarani se obtiene un promedio de 2.07 de coeficiente de arrastre, 0.2 de eficiencia aerodinámica y una potencia de arrastre de 18.38 kW, implementado el concepto de (solución 1) la mejora es de un 46% brindándonos un coeficiente de arrastre de 1.14, una eficiencia aerodinámica de 0.31 y una potencia de arrastre de 10.20 kW que el motor tendrá que generar para vencer las cargas aerodinámicas.

## TRABAJOS FUTUROS

Como en cualquier trabajo de tesis encontramos líneas de investigación que no son consideradas ya que el objetivo general es el que nos condiciona a no tomarlas en cuenta, al quedar abiertas es posible continuar realizando trabajos de investigación.

Presentamos las siguientes propuestas para trabajos futuros que puedan complementar al presente trabajo ya que por exceder el alcance no se pudo ver a detalle y plantear una solución. Las propuestas son:

- Investigar el coeficiente de arrastre en el desplazamiento de la locomotora a distintas velocidades, generando una aproximación más real a como poder regular el modelo del deflector ya establecido.
- Realizar el estudio del coeficiente de arrastre para todo el convoy, para de esta forma saber cómo es que afectan los vagones a la potencia que necesita la locomotora para vencer las cargas aerodinámicas.
- Calcular la cantidad de ahorro de combustible que se genera implementando los difusores en la locomotora GT42AC.
- Realizar un estudio de implementación de difusores para tren de pasajeros evaluando sus coeficientes de arrastre y sustentación además de la eficiencia aerodinámica que requiere para una mejora óptima.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AYALA, J. MARTÍNEZ, D, y VALBUENA, J. Diseño de un dispositivo reductor de la resistencia aerodinámica en un bus intermunicipal. Revista de Ingeniería Aeronáutica [en línea]. 2017, 115. [fecha de consulta 18 de mayo de 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11371/2239>

BELTRAN, C. GARRIDO, J. Análisis estructural y optimización aerodinámica de la carrocería de un bus interprovincial modelos GR de la empresa Olímpica Quito. Tesis (Titulo de Ingeniería Mecánica Automotriz). Ecuador: Universidad De Las Fuerzas Armadas de Ecuador, 2017. 87-127 pp. [fecha de consulta: 15 de mayo del 2020]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/13427>

BELTRAMO, E. Simulación dinámica estructural de un automóvil de competición. Tesis (Titulo de Ingeniero Mecánico). Argentina: Universidad Nacional de Córdoba, 2015. 130 pp. [fecha de consulta: 06 de mayo del 2020]. Disponible en: <http://hdl.handle.net/11086/1810>

ESTUPIÑAN, F. y O. POLONIA. Las locomotoras del desarrollo: Minas, energía e innovación. Revista de Ingeniería [en línea]. 2011, (34), 44-48 [fecha de consulta 28 de abril de 2020]. ISSN: 0121-4993. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=121022656007>

KHOSRAVI, M [Et al.] Aerodynamic drag reduction of heavy vehicles using append devices by CFD analysis. Revista [en línea] China: Journal of Central South University 22(12) diciembre 2015. 4645-4652 pp. [fecha de consulta: 21 de mayo del 2020]. Disponible en: [http://www.zndxzk.com.cn/down/2015/12\\_znen/17-p4645-e150013.pdf](http://www.zndxzk.com.cn/down/2015/12_znen/17-p4645-e150013.pdf)

LIZCANO, P. Análisis comparativo de las variables infraestructura, volumen de carga y tecnología entre el sistema de transporte férreo de carga en Colombia y

Estados Unidos. *Revistas de Ingeniería* [en línea]. 2018, 9-11 [fecha de consulta 10 de mayo de 2020]. Disponible en : <http://hdl.handle.net/20.500.12494/10221>

LÓPEZ, P. Estudio de los efectos derivados del viento lateral en la circulación de trenes de alta velocidad. Tesis (Título de Ingenierías Tecnológicas Industriales). España: Universidad Politécnica de Madrid, 2017. 105 pp. [fecha de consulta: 03 de mayo del 2020]. Disponible en: <http://oa.upm.es/45244/>

PANIORA, L. Diseño y construcción de modelos de operaciones ferroviarias mediante simulaciones. Tesis (Título de Ingeniero Industrial). Lima: Universidad Nacional Federico Villarreal, 2019. 79 pp. [fecha de consulta: 23 de abril de 2020]. Disponible en: <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/3014>

SACCO, C., y GIUGGIOLONI, F. Análisis de cargas aerodinámicas en un auto de competición. *Revista De La Facultad De Ciencias Exactas, Físicas y Naturales* [en línea]. 2019, 6(1), 125. [fecha de consulta 13 de mayo de 2020 ]. Disponible en: <https://revistas.unc.edu.ar/index.php/FCEFYN/article/view/24403>

ZULFAA, E y FILIPPONE,A. Fuel savings on heavy vehicle via aerodynamic drag reduction. *Revista* [en línea]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Volumen 15, tema 5, Julio 2010. 275-284 pp. [fecha de consulta: 22 de mayo del 2020]. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920910000301?via%3Dihub>

Diccionario.motorgiga.com. 2020. RESISTENCIA AERODINAMICA - Definición - Significado. [online] Disponible en: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/resistencia-aerodinamica-definicion-significado/gmx-niv15-con195384.htm> [Acceso 9 septiembre 2020].

Taranilla Santos, J., 2019. *Estudio De La Resistencia Normal Al Avance De Trenes De Mercancías*. [online] Bibing.us.es. Disponible en: <http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/3718/fichero/Parte+I%252FCapitulo+3.pdf> [Acceso 2 octubre, 2020].

Gutiérrez, J., 2009. APLICABILIDAD DE LAS METODOLOGÍAS DE DISEÑO DE PRODUCTO EN EL DESARROLLO Y CREACIÓN DE

PÁGINAS WEB Y DISEÑOS GRÁFICOS. [online] Repository.eafit.edu.co. Disponible en: [https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/302/JulianCamilo\\_GutiérrezR.\\_2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repository.eafit.edu.co/bitstream/handle/10784/302/JulianCamilo_GutiérrezR._2009.pdf?sequence=1&isAllowed=y) [acceso 3 octubre 2020].

ESSS, E., 2020. *Dinámica De Fluidos Computacional O CFD: Entiende Que Es*. [online] ESSS. Disponible en: <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/> [Acceso 4 octubre, 2020].

Lozada, J., 2014. Investigación Aplicada: Definición, Propiedad Intelectual E Industria. [online] Dialnet. Disponible en: <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6163749#:~:text=La%20investigaci%C3%B3n%20aplicada%20busca%20la,la%20teor%C3%ADa%20y%20e1%20producto> . [Acceso 20 octubre 2020].

Dean, R., 2017. La Investigación Tecnológica En Las Ciencias De La Ingeniería Y La Innovación Tecnológica. [online] Unrc.edu.ar. Disponible en: <https://www.unrc.edu.ar/publicar/23/dossidos.html#:~:text=Con%20investigaci%C3%B3n%20tecnol%C3%B3gica%20en%20las,%2C%20maquinarias%2C%20patentes%2C%20etc.> [Acceso 26 octubre 2020].

WEG. 2017. Motores De Tracción | Locomotoras | Tracción Eléctrica | Líneas Dedicadas | Trifásico - Alta Tensión | Motores Eléctricos | WEG - Productos. [online] Disponible en: [https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tensi%C3%B3n/L%C3%ADneas-Dedicadas/Tracci%C3%B3n-El%C3%A9ctrica/Locomotoras/Motores-de-Tracci%C3%B3n/p/MKT\\_WEN\\_TRACTION](https://www.weg.net/catalog/weg/BR/es/Motores-El%C3%A9ctricos/Trif%C3%A1sico---Alta-Tensi%C3%B3n/L%C3%ADneas-Dedicadas/Tracci%C3%B3n-El%C3%A9ctrica/Locomotoras/Motores-de-Tracci%C3%B3n/p/MKT_WEN_TRACTION). [Accesos 29 octubre 2020].

Historia del tren. 2020. Locomotoras Diésel | Locomotora Diésel - Eléctrica - Historia Del Tren. [online] Disponible en: <https://aferioja.es/invencion-tren/locomotoras-diesel/> [Acceso 30 octubre 2020].

Gonzales Llorca, J., 2016. [online] Riunet.upv.es. Disponible en: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/74264/TFG.pdf?sequence=3> [Acceso 30 octubre 2020].

User, S., 2017. SISTEMAS DE SUSPENSIÓN. [online] Sim-impex.com. Disponible en: <https://www.sim-impex.com/index.php/es/productos/industria-ferroviaria/material-rodante/231-sistemas-de-suspension>. [Acceso 1 noviembre 2020].

Iscarib.es. 2020. Industrealize Railway. [online] Disponible en: <https://www.iscarib.es/newarticles.aspx/countryid/14/newarticleid/2731> [Acceso 7 noviembre 2020].

Gutiérrez, j., Bautista, O., Gómez, A. and Ascoy, G., 2017. Reductores De Velocidad: Principales Aplicaciones Y Cómo Mejorar Su Funcionamiento. [online] Clr.es. Disponible en: <https://clr.es/blog/es/reductores-velocidad-funcionamiento/> [Acceso 8 noviembre 2020].

G. ARTÉS, DAVID, 2020, Aerodinámica del automóvil: principios básicos (vídeo). artículo [online]. 2020. [Acceso 10 noviembre 2020]. Disponible en: <https://www.diariomotor.com/que-es/mecanica/aerodinamica/>

Teknika4.com. 2020. ALUMINIO AERONÁUTICO. [online] Disponible en: <https://www.teknika4.com/es/aluminio-3003> [Acceso 3 diciembre 2020].

# ANEXOS

## Anexo 1. Frontis de la locomotora.



FRENO  
INDEPENDIENTE

AFLOJE  
RAPIDO

DEPOSITO  
PRINCIPAL

26 C (AUTOMATICO)

26 C (DIRECTO) 120

## Anexo 2. Prueba de carga de la locomotora GT42AC.



**ELECTRO MOTIVE**  
Formato de Mantenimiento

**GT42AC M03**

REVISION: 0  
REVISION DATE: 09/20/04  
ISSUED BY:  
APPROVED BY:  
Spanish

**UNIT:** \_\_\_\_\_

### PRUEBA DE CARGA

UNIT : \_\_\_\_\_  
FECHA : \_\_\_\_\_

▶ PARÁMETROS PRUEBA	DE CARGA (Eng Temp = 75°C)	Ref	Entrada	Salida	
<b>POSICION ACCELERADOR</b>					
X APCLb	(Presión carb	metor banco (izquierda -3" a -10")	8	8	8
WPEgLP	(Presión de A	ra entrada Motor, de 60 a 75 PSI)	70.5		
WPEgOP	(Presión de A	ra Salida MD, de 25 a 35 PSI)	34		
X FPEgPS	(Presión de c	ombustible, de 100 a 120 PSI)	105		
X APImRbP	(Presión de c	ombustible del múltiple admisión, de 10 a 40 PSI)	35		
ATImRbF	(Temperatura	de aceite en el múltiple de admisión)	53		
X OPTuRSP	(Presión de A	ra, de 65 a 75 PSI)	77.5		
EgOIT	(Temperatura	de aceite del MD, de 90 a 95 °C)	95		
X EngTmp	(Temperatura	del Motor Diesel, de 80 a 85 °C)	85		
RF1Spd	(Referencia de	velocidad ventilador refrigeración)	0.8		
EngShHP	(Potencia del	Motor, aprox 3200 HP)	3200		
TPU RPM	(Revoluciones	del Turbo, de 15000 a 22000)	21000		
ENG RPM	(Revoluciones	del MD, aprox 904 RPM)	904		
Engine R	(Ratio de comb	ustible, <0.87)	0.82		
LR % Max	(Regulador de	carga eléctrica, siempre 100%)	100%		
BAR PRESS	(Presión Baro	métrica, Aseguipa 23"Hg, Molendo 29"Hg)	23		
Timj01-12	(Tiempo respo	nsa inyector combustible, de 1.20 a 1.70ms)	1.3		
GRW A	(Comente de	controlador de pastillas Freno Dinámico)	160		
Grid1 A	(Comente de	pastillas Grid1)	485		
Grid2 A	(Comente de	pastillas Grid2)	485		
Grid1 y Grid2	Grid1 respect	o Grid2, Están dentro del 5% de tolerancia?	Ok		
KW Fdbk	(Potencia en l	ínea, aprox 2260 KW)	2200		
CA V	(Voltaje Altern	corriente Acompañante, aprox. 240 V)	240		
MG A	(Corriente cal	culada del Generador Principal, aprox 975 A)	975		
MG CTA	(Corriente nom	inal del Generador Principal, aprox 950A)	950		
MGFd A	(Corriente de	carga del Generador Principal, aprox 90A)	89		
MG V	(Voltaje del G	enerador Principal, aprox 2260V)	2260		

PRUEBA		CIRCUITO 1 CON LOCOMOTORA FRENADA (STALL TEST)	
Valores del EM2060 en pastilla FRIE			
OP Mode			Traction Effort (3200 kgf)
DCL V	(690 V)		TRBL1A (40 A)
MA A	(161 A)		
KW Ref	(120)		TS1 #1 RPM (0)
KW Fdbk	(180)		TS1 #2 RPM (0)
Ter 1 R	(1100)		TS1 #3 RPM (0)
Ter 1 F	(1100)		TS1 #4 RPM (0)
Ter 2 R	(1100)		TS1 #5 RPM (0)
Ter 2 F	(1100)		TS1 #6 RPM (0)
NIVELES DE VOLTAJE DE FUENTES DEL EM2060			
PSM 305	+5±0.25VDC		PSM 315 +15±0.4VDC
	+72±5VDC		-15±0.4VDC
PSM 312	+12±0.4VDC		+72±5VDC
	-12±0.4VDC		
	+72±5VDC		

Realizado por: \_\_\_\_\_

### Anexo 3. Lista de abreviaturas.

<b>Símbolo</b>	<b>Unidades</b>	<b>Descripción</b>
<b>P</b>	MPa	Presión
<b><math>\rho</math></b>	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del aire
<b>v</b>	m/s	Velocidad
<b>g</b>	m/s <sup>2</sup>	Aceleración gravitatoria
<b>h</b>	m	Altura
<b>D</b>	N	Resistencia Aerodinámica
<b>S</b>	m <sup>2</sup>	Área frontal del vehículo
<b>C<sub>x</sub></b>	-	Coefficiente de penetración
<b>R<sub>r</sub></b>	N	Resistencia a la rodadura
<b>M</b>	Masa	Kg
<b>f</b>	-	Coefficiente de rodadura
<b><math>\mu_r</math></b>	-	Coefficiente de fricción rueda-pavimento
<b>r<sub>r</sub></b>	m	Radio de la rueda
<b>F<sub>t</sub></b>	N	Resistencia al avance
<b>R<sub>a</sub></b>	N	Resistencia aerodinámica
<b>R<sub>tr</sub></b>	N	Resistencia debida a perdidas mecánicas
<b>P<sub>N</sub></b>	W	Potencia necesaria debido a las resistencias
<b>b<sub>e</sub></b>	Kg/KWh	Consumo específico
<b>B</b>	Kg/h	Consumo horario
<b>t</b>	s	tiempo
<b>d</b>	m	Distancia
<b>B<sub>d</sub></b>	l/100Km	Consumo
<b><math>\eta_{tr}</math></b>	-	Rendimiento
<b><math>\rho_b</math></b>	Kg/m <sup>3</sup>	Densidad del combustible
<b>G<sub>ef</sub></b>	g/Kwh	Consumo específico

**Anexo 4. Guía de la locomotora GT42AC.**

# ***Ferrocarril Transandino S.A.***



## ***Reglamento de Frenos de Aire y Conducción de Trenes***

*En vigencia  
30 de Junio 2006*

**Anexo 5. Guía de Inspección la locomotora GT42AC.**

**GT46AC  
GUÍA DE  
INSPECCIÓN DE LA  
VÍA DE SERVICIO**

**MOTOR 16-710G3C 4300 HP**

G00056SD

***ELECTRO*MOTIVE**

Electro-Motive Division  
Centro de capacitación de  
servicio al cliente  
LaGrange Illinois  
Septiembre de 2013

**Anexo 6. Manual del operador de la locomotora GT42AC.**

**MANUAL DEL OPERADOR  
DE LA LOCOMOTORA  
ELECTRO-MOTIVE  
GT42AC**

**Número de pedido: 20118600**

Primera edición, abril de 2015

**Una publicación de Electro-Motive Diesel, Inc.**

Electro-Motive Diesel, Inc.  
La Grange, Illinois 60525 EE.UU.  
Teléfono: 708-387-6000

**Anexo 7. Guía de operación y solución de problemas del sistema EMDEC (locomotora GT42AC).**

**Guía de operación  
y solución de  
problemas del sistema  
EMDEC**

Control del motor diesel  
de Electro-Motive

N00012SP

**ELECTRO-MOTIVE**

Versión 3 - Mayo 2005

## **Anexo. Planos**

## Anexo 8. Planos de difusor frontal

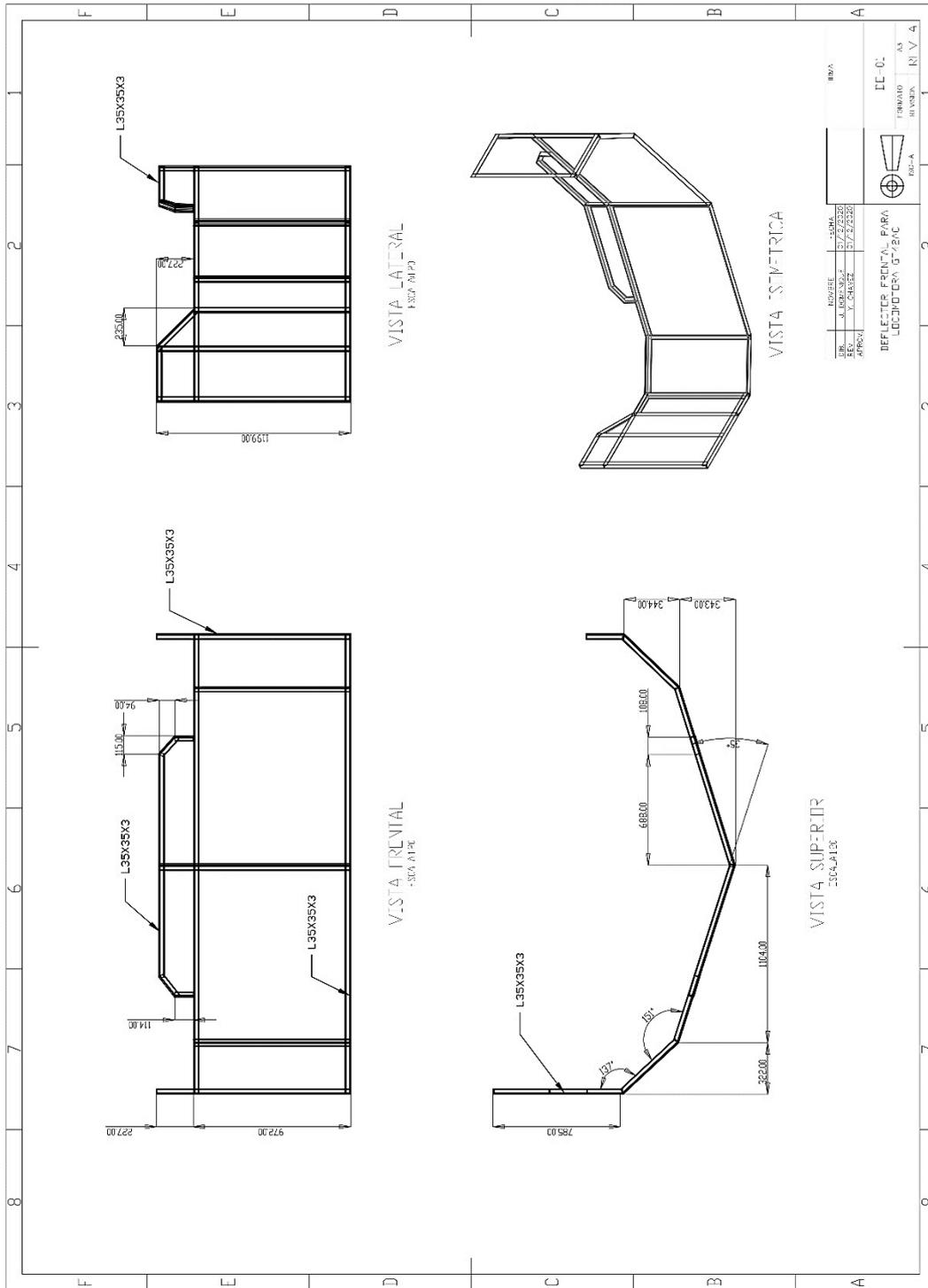


Figura 49 Planos de fabricación para deflector frontal

## Anexo 9. Planos del difusor superior de la cabina

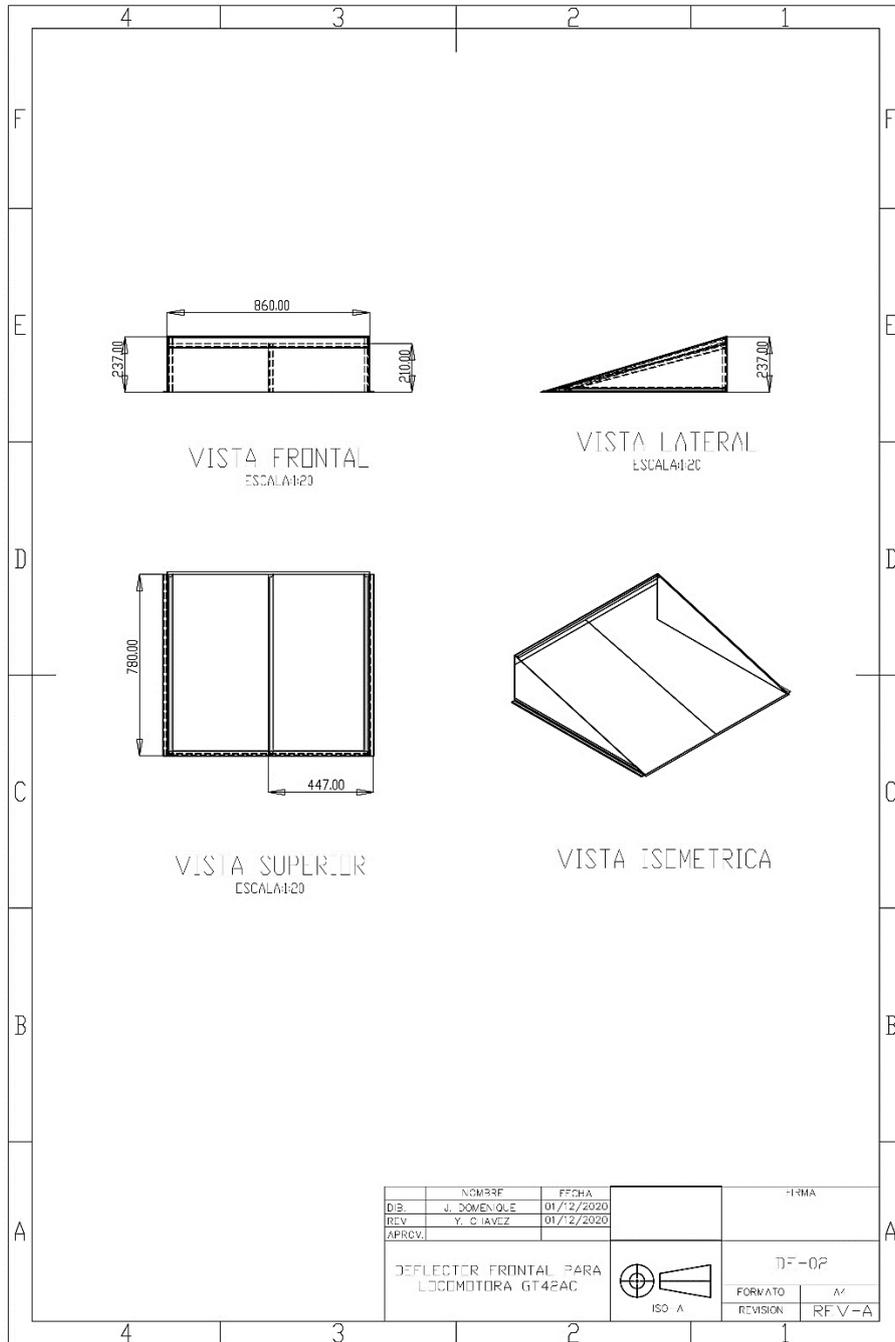


Figura 50 Plano de fabricación deflector superior