

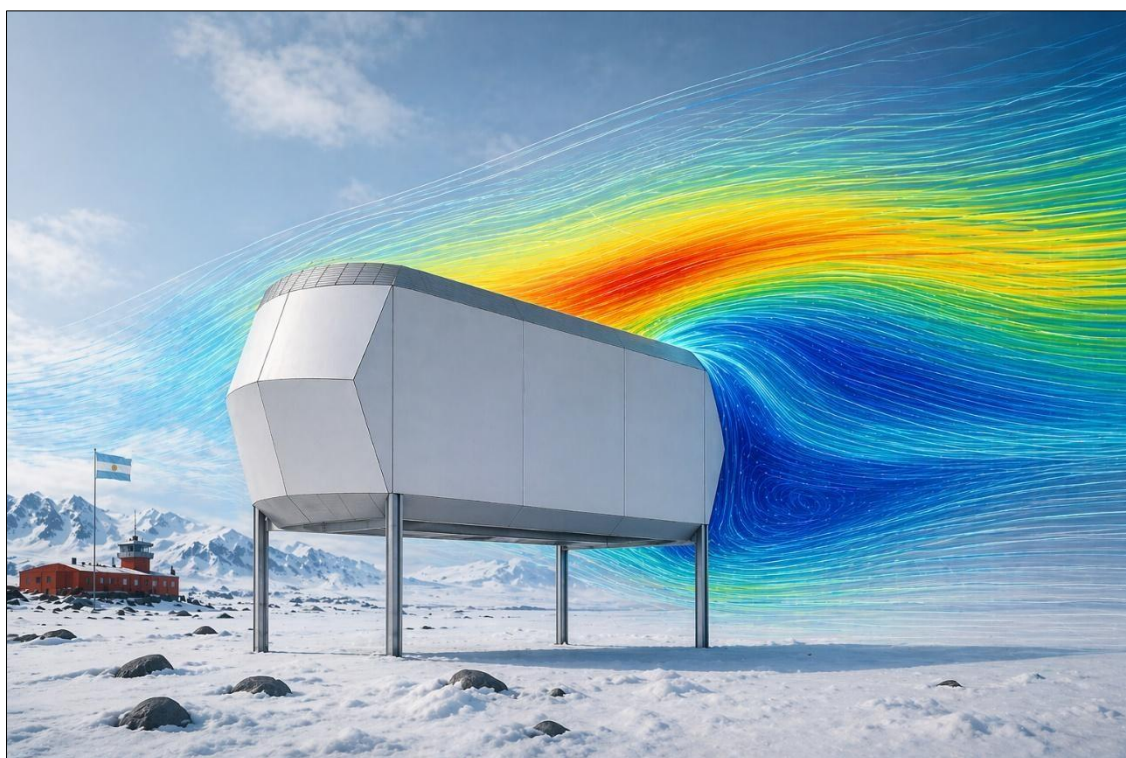
Facultad de Ingeniería y Tecnología Informática

Tesina de grado de Ingeniería Civil



Propuesta geométrica y evaluación aerodinámica de un módulo habitacional para la Antártida Argentina.

Análisis mediante simulación numérica CFD orientado a reducir la predisposición a la acumulación de nieve.



Autor: Nogueira, Ignacio Martín - ID: 000-17-5807

Tutor: Ing. Schwarz González, Rodolfo.

Contenido

1. Introducción	6
1.1 Problema, contexto y relevancia del estudio	6
1.2 Planteamiento de la investigación	6
1.2.1 Pregunta de investigación	6
1.2.2 Hipótesis de trabajo	6
1.2.3 Objetivo general	6
1.2.4 Objetivos específicos	7
1.3 Alcance y delimitación del estudio	7
1.4 Organización del trabajo	7
2. Marco teórico	9
2.1 Transporte eólico de nieve y formación de acumulaciones	10
2.2 Interacción del viento con obstáculos: separación, recirculación y estela	11
2.3 Velocidad próxima al suelo, esfuerzo cortante y deposición	12
2.4 Relación entre geometría edilicia y predisposición aerodinámica	13
3. Estado del arte y antecedentes	15
3.1 Estudios previos sobre nieve y viento en entornos antárticos	15
3.2 Antecedentes de diseño aerodinámico en bases polares	16
3.3 Uso de contenedores y módulos prefabricados en logística antártica	19
3.4 Vacancia identificada	20
4. Contexto de aplicación	21
4.1 La Base Marambio como caso de referencia	21
4.2 Condiciones climáticas relevantes para el diseño	22
4.3 Condicionantes operativos y logísticos	24
4.4 Requerimientos funcionales derivados para el módulo	25
5. Criterios de diseño y definición de variantes	26

5.1 Estrategia iterativa de desarrollo geométrico.....	26
5.2 Elección del contenedor ISO 20' como referencia de partida	27
5.3 Secuencia iterativa de variantes geométricas	29
5.3.1 V0 – Condición base apoyada	30
5.3.2 V1 – Elevación del módulo sobre patas	32
5.3.3 V2 – Carenado frontal, continuidad lateral y cola direccional	33
5.3.4 V2B – Ajuste local del borde superior trasero.....	39
5.3.5 V3 – Configuración final con carenado simétrico.....	40
6. Metodología de evaluación	42
6.1 Enfoque metodológico general.....	42
6.2 Configuración CFD.....	43
6.3 Casos analizados.....	47
6.4 Variables e indicadores de desempeño:	48
6.5 Criterios de evaluación.....	50
6.6 Limitaciones metodológicas	54
7. Resultados y discusión aerodinámica de la propuesta	55
7.1 Lectura integrada de los campos de flujo	55
7.1.1 Desarrollo longitudinal de la estela	55
7.1.2 Organización transversal de la estela	58
7.1.3 Huella próxima al suelo.....	58
7.1.4 Energía cinética turbulenta como lectura complementaria	60
7.1.5 Síntesis cualitativa	60
7.2 Lectura numérica de los indicadores indirectos aerodinámicos	61
7.2.1 Desempeño aerodinámico global.....	61
7.2.2 Calidad de la estela a sotavento	62
7.2.3 Barrido superficial y ventilación inferior	62

7.2.4 Síntesis de la lectura numérica	63
7.3 Síntesis de la evolución geométrica y justificación de la propuesta final	64
8. Prefactibilidad de la propuesta	68
8.1 Prefactibilidad constructiva.....	68
8.1.1 Sistema general y camino de cargas	68
8.1.2 Contenedor adoptado, apoyo y cargas interiores	71
8.1.3 Sistema resistente preliminar	73
8.1.4 Apoyos y fundaciones	77
8.1.5 Materialización y fijación de los carenados	79
8.1.6 Secuencia preliminar de ensamblaje.....	83
8.2 Estimación económica preliminar	87
8.2.1 Cómputo preliminar de materiales y componentes.....	88
8.2.2 Valoración de materiales y componentes	91
8.2.3 Estimación paramétrica de la fabricación	92
8.2.4 Síntesis económica	93
8.3 Estrategia logística preliminar para Base Marambio.....	94
8.3.1 Configuración modular para el transporte	95
8.3.2 Transporte aéreo propuesto mediante C-130 Hércules	96
8.3.3 Alternativas logísticas complementarias.....	99
8.3.4 Síntesis de prefactibilidad logística	101
9. Conclusiones	102
9.1 Resultado general de la investigación	102
9.2 Principales conclusiones del proceso de diseño.....	102
9.3 Alcance y prefactibilidad de la propuesta.....	103
9.4 Limitaciones y desarrollos futuros	103
10. Referencias	104

10.1 Referencias del Capítulo 2 – Marco teórico.....	104
10.2 Referencias del Capítulo 3 – Estado del arte y antecedentes.....	104
10.3 Referencias del Capítulo 4 – Contexto de aplicación	105
10.4 Referencias del Capítulo 5 – Criterios de diseño y definición de variantes	106
10.5 Referencias del Capítulo 6 – Metodología de evaluación	106
10.6 Referencias del Capítulo 8 – Prefactibilidad	106
10.6.1 Normativa y prefactibilidad constructiva	106
10.6.2 Estimación económica	106
10.6.3 Prefactibilidad logística	107
10.7 Créditos de figuras y material gráfico externo	107
11. Anexos	109
11.1 ANEXO A – Resultados CFD complementarios	109
11.1.1 Comparación principal de variantes	110
11.1.2 Evaluación específica con flujo inverso	117
11.1.3 Análisis de sensibilidad de V3	118
11.2 ANEXO B – Procedimiento de extracción y cálculo de los proxies aerodinámicos.	122
11.2.1 Secuencia de postproceso	122
11.2.2 Regiones de evaluación	122
11.2.3 Procesamiento de los datos	125
11.3 ANEXO C – Respaldo de cómputos de la estimación económica.....	126
11.3.1 Cómputo de superficie de carenados	126
11.3.2 Cómputo de arriostramientos	126

Resumen

La acumulación de nieve alrededor de construcciones constituye una dificultad operativa relevante en ambientes antárticos, donde la interacción entre viento, terreno y geometría edilicia puede generar zonas protegidas favorables a la deposición.

Esta tesina propone y evalúa una modificación geométrica para un módulo habitacional basado en un contenedor ISO de 20 pies, tomando a la Base Marambio como contexto de referencia. A partir de una configuración prismática inicial, se desarrollaron alternativas que incorporan elevación respecto del terreno y una envolvente exterior orientada a mejorar la interacción con el flujo incidente.

La evaluación se realizó mediante simulaciones numéricas CFD, comparando el comportamiento aerodinámico de las distintas configuraciones bajo condiciones homogéneas. Los resultados muestran que la transformación geométrica permite reducir la extensión de las zonas de recirculación a sotavento, mejorar la recuperación del flujo y mantener circulación de aire bajo el módulo.

De manera complementaria, se analizó la prefactibilidad constructiva, económica y logística de la configuración seleccionada, con el fin de identificar una posible estrategia de materialización y las verificaciones necesarias para su desarrollo posterior.

Se concluye que el diseño geométrico puede contribuir a disminuir la predisposición aerodinámica relativa a la acumulación de nieve, aunque su validación definitiva requeriría estudios específicos de transporte y deposición de partículas.

1. Introducción

Siempre me interesó comprender por qué las cosas funcionan de una determinada manera y cómo pueden modificarse para responder mejor a un problema. Ese interés por analizar, diseñar y buscar soluciones fue el punto de partida de esta tesina. El contexto antártico ofreció un escenario particularmente atractivo para desarrollar esa inquietud, ya que obliga a combinar forma, funcionamiento, construcción y logística dentro de condiciones poco habituales para la Ingeniería Civil.

1.1 Problema, contexto y relevancia del estudio

Las acumulaciones de nieve alrededor de las construcciones constituyen una dificultad relevante para la operación de infraestructura en ambientes antárticos. Su presencia puede interferir con accesos, instalaciones, tareas de mantenimiento y condiciones generales de uso de los módulos.

La interacción entre el viento, la superficie nevada y la geometría construida influye en la forma en que la nieve se redistribuye alrededor de una edificación. En este sentido, la configuración exterior de un módulo puede contribuir a generar o reducir condiciones aerodinámicas asociadas a la acumulación de nieve en su entorno inmediato.

A partir de esta problemática, la presente tesina estudia una propuesta geométrica para un módulo habitacional basado en un contenedor ISO de 20 pies. La Base Marambio se adopta como contexto de referencia para situar el estudio dentro de las condiciones generales de operación de la Antártida Argentina.

1.2 Planteamiento de la investigación

1.2.1 Pregunta de investigación

¿Puede una modificación geométrica de un módulo habitacional basado en un contenedor ISO de 20 pies reducir su predisposición aerodinámica a la acumulación de nieve a sotavento?

1.2.2 Hipótesis de trabajo

Se plantea que la elevación del módulo y el tratamiento geométrico de su envolvente exterior pueden mejorar la circulación del flujo alrededor y bajo la construcción, reduciendo de manera relativa las condiciones aerodinámicas asociadas a la acumulación de nieve a sotavento.

1.2.3 Objetivo general

Desarrollar y evaluar una propuesta geométrica para un módulo habitacional antártico basado en un contenedor ISO de 20 pies, mediante simulación CFD comparativa, para analizar su predisposición aerodinámica relativa a la acumulación de nieve.

1.2.4 Objetivos específicos

- Definir una secuencia de variantes geométricas a partir de una configuración prismática de referencia.
- Evaluar comparativamente el comportamiento aerodinámico de las variantes mediante simulación numérica CFD.
- Analizar la evolución del flujo mediante campos visuales e indicadores aerodinámicos indirectos.
- Identificar, dentro de los casos analizados, la configuración con comportamiento relativo más favorable frente al objetivo del estudio.
- Analizar preliminarmente la prefactibilidad constructiva, económica y logística de la configuración seleccionada, identificando las condiciones y verificaciones necesarias para una etapa posterior de ingeniería.

1.3 Alcance y delimitación del estudio

La tesina estudia un módulo habitacional individual basado en un contenedor ISO de 20 pies, evaluado como objeto aislado y desarrollado a partir de criterios geométricos, aerodinámicos y logísticos. No propone el diseño integral de una base antártica ni una solución constructiva definitiva para una implantación específica.

La Base Marambio se adopta como contexto de referencia. La evaluación se orienta a comparar el comportamiento aerodinámico relativo de distintas configuraciones geométricas mediante simulación CFD, sin reproducir la totalidad de las condiciones ambientales y operativas propias de la base.

El estudio no incluye la simulación explícita del transporte, erosión o deposición de nieve, ni la predicción de espesores acumulados. Tampoco comprende la validación experimental, la verificación estructural definitiva, el diseño detallado de fundaciones e instalaciones, ni la resolución completa de aspectos térmicos, funcionales y constructivos del módulo.

1.4 Organización del trabajo

El trabajo se organiza en nueve capítulos principales. Luego de esta introducción, el Capítulo 2 desarrolla el marco teórico necesario para comprender la relación entre transporte eólico de nieve, interacción viento–obstáculo, estela, esfuerzo cortante y geometría edilicia.

El Capítulo 3 presenta el estado del arte y los antecedentes vinculados con estudios de nieve y viento, diseño aerodinámico de bases polares y uso de sistemas modulares prefabricados.

El Capítulo 4 caracteriza el contexto de aplicación asociado a la Base Marambio, considerando aspectos territoriales, climáticos, logísticos y funcionales relevantes para el estudio.

El Capítulo 5 describe la estrategia de desarrollo geométrico y la secuencia de variantes analizadas.

El Capítulo 6 expone la metodología de evaluación, la configuración CFD, los casos estudiados, los indicadores adoptados y las limitaciones del modelo.

El Capítulo 7 presenta los resultados obtenidos y desarrolla la discusión comparativa de los campos de flujo y proxies aerodinámicos, con el fin de justificar la selección de la propuesta final.

El Capítulo 8 desarrolla una evaluación preliminar de prefactibilidad constructiva, económica y logística de la propuesta final, identificando una posible estrategia de materialización y las verificaciones necesarias para una etapa posterior de ingeniería.

Finalmente, el Capítulo 9 sintetiza las conclusiones del trabajo, responde la pregunta de investigación, examina la hipótesis planteada y propone líneas futuras de desarrollo.

2. Marco teórico

El objetivo de este marco es establecer por qué la forma exterior de una construcción puede modificar el campo de flujo y, en consecuencia, alterar condiciones aerodinámicas asociadas a una mayor o menor predisposición a la acumulación de nieve. La acumulación no se interpreta como consecuencia exclusiva de la precipitación, sino como resultado de la interacción entre nieve disponible, viento incidente, superficie del terreno y obstáculos construidos.

Tabla 2.1. Conceptos físicos que estructuran el marco teórico de la tesina.

Concepto físico	Definición sintética	Relevancia para la tesina
Transporte eólico de nieve	Movimiento de partículas de nieve por acción del viento.	Explica por qué la nieve puede desplazarse y acumularse alrededor de obstáculos.
Capacidad de transporte	Aptitud del flujo para mantener partículas en movimiento.	Relaciona la baja velocidad con regiones potencialmente favorables a la deposición.
Capa límite próxima al suelo	Región donde la velocidad del aire varía fuertemente con la altura por efecto de la superficie.	Justifica estudiar el flujo cercano al terreno, donde puede producirse erosión o deposición.
Esfuerzo cortante superficial	Acción tangencial del flujo sobre el suelo.	Permite relacionar el campo de velocidades con el barrido superficial.
Separación de flujo	Desprendimiento de la capa límite respecto de la superficie del obstáculo.	Explica por qué aristas vivas y cambios bruscos de geometría pueden generar estelas.
Recirculación	Región donde el flujo invierte localmente su sentido.	Se asocia a zonas protegidas, baja velocidad y posible deposición a sotavento.
Estela a sotavento	Región perturbada detrás del obstáculo.	Permite evaluar cómo la geometría modifica el campo de flujo posterior.
Recuperación de presión	Reconstitución del campo de presión detrás del obstáculo.	Ayuda a interpretar la severidad de la estela y la pérdida de cantidad de movimiento.
Turbulencia	Fluctuaciones del flujo asociadas a mezcla, disipación y estela.	Debe interpretarse como indicador complementario, no como criterio aislado.
Geometría edilicia	Forma, altura, aristas, orientación y continuidad del volumen construido.	Constituye la variable proyectual que puede modificar la predisposición aerodinámica.

A partir de estos conceptos, el capítulo se organiza en cuatro apartados: transporte eólico de nieve y formación de acumulaciones; interacción del viento con obstáculos; velocidad próxima al suelo, esfuerzo cortante y deposición; y relación entre geometría edilicia y predisposición aerodinámica.

2.1 Transporte eólico de nieve y formación de acumulaciones

La nieve puede ser removida, transportada y depositada por acción del viento. La acumulación no depende únicamente de la cantidad de nieve disponible, sino de la capacidad del flujo para transportar partículas y de las condiciones locales que favorecen su deposición.

Tabla 2.2: Transporte de nieve

Concepto	Función dentro del fenómeno
Erosión	Inicio del movimiento de partículas desde la superficie nevada.
Saltación	Transporte de partículas cerca del suelo con trayectorias cortas e impactos sucesivos.
Suspensión	Transporte de partículas finas incorporadas al flujo turbulento.
Deposición	Pérdida local de capacidad de transporte y asentamiento de partículas.
Acumulamiento (snowdrift)	Acumulación generada por redistribución de nieve transportada por viento.

En regiones frías expuestas a viento, la nieve depositada sobre la superficie puede ser removida y transportada. Este proceso se conoce como transporte eólico de nieve (o *blowing snow*). La literatura clásica distingue distintos modos de transporte, principalmente reptación superficial, saltación y suspensión. La saltación suele ser dominante en la capa más cercana al suelo, mientras que la suspensión adquiere mayor importancia cuando partículas más finas son incorporadas a alturas superiores por la turbulencia del flujo (Kind, 1981; Pomeroy y Gray, 1990; Tominaga, 2018).

La **saltación** es especialmente relevante porque conecta la erosión superficial con el transporte de nieve. Las partículas son levantadas por el flujo, impactan nuevamente contra la superficie y pueden desprender nuevos granos. Este proceso depende de la velocidad del viento, de la rugosidad del terreno, de la cohesión de la nieve, de su estado térmico y de la disponibilidad de partículas sueltas. Por lo tanto, la acumulación de nieve alrededor de una construcción no puede explicarse solamente por la precipitación, sino por la redistribución de nieve causada por el viento (Pomeroy y Gray, 1995; Tabler, 2003).

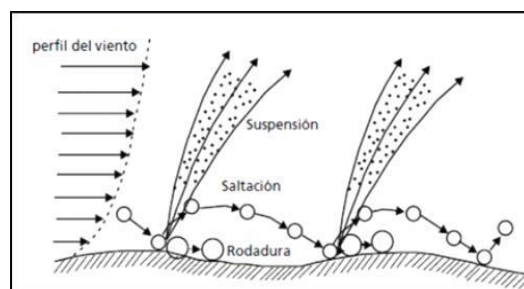


Figura 2.1: Medios de transporte de partículas

La formación de acumulaciones se produce cuando el flujo pierde capacidad de transporte. Esta pérdida puede estar asociada a disminución local de velocidad, zonas protegidas a sotavento, recirculaciones, cambios bruscos de dirección o reducción del esfuerzo cortante sobre la

superficie. En términos físicos, la deposición tiende a ocurrir donde el viento no conserva suficiente cantidad de movimiento para mantener las partículas en transporte.

2.2 Interacción del viento con obstáculos: separación, recirculación y estela

Cuando el viento incide sobre un obstáculo, el flujo se desvía, acelera, separa y recompone. La forma del obstáculo controla en gran medida la extensión e intensidad de la estela generada a sotavento.

Tabla 2.3: Interacción viento-obstáculo.

Concepto	Definición técnica	Relación con acumulación de nieve
Zona de estancamiento	Región frontal donde el flujo reduce su velocidad al impactar contra el obstáculo.	Puede modificar la distribución local de presión y desviar el flujo hacia bordes.
Separación de flujo	Desprendimiento de la capa límite por pérdida de cantidad de movimiento.	Genera regiones protegidas y estelas.
Gradiente adverso de presión	Aumento de presión en la dirección del flujo que dificulta que la capa límite permanezca adherida.	Favorece separación en geometrías abruptas.
Recirculación	Movimiento local reverso o cerrado dentro de la estela.	Puede asociarse a baja capacidad de transporte.
Estela	Región posterior perturbada por el obstáculo.	Puede generar zonas de baja velocidad a sotavento.

Cuando el viento encuentra un volumen construido, el flujo debe adaptarse a la presencia del obstáculo. En cuerpos romos, como volúmenes prismáticos o geometrías con aristas marcadas, el aire no suele seguir de manera continua todas las superficies. Como resultado, aparecen zonas de estancamiento a barlovento, aceleraciones locales en bordes, separación de flujo y una estela turbulenta a sotavento (Aynsley, Melbourne y Vickery, 1977; Lawson, 2001; Simiu y Scanlan, 1996).

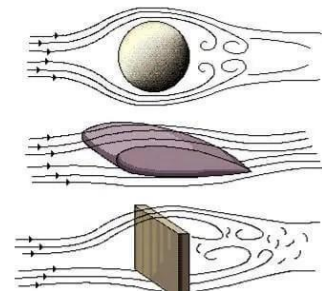


Figura 2.2: Dependencia de la recirculación a la forma.

La **separación de flujo** ocurre cuando la capa límite próxima a la superficie pierde suficiente cantidad de movimiento y no puede continuar adherida al contorno. Este fenómeno suele producirse ante gradientes adversos de presión, aristas vivas, cambios bruscos de geometría o remates abruptos. Una vez separado, el flujo genera una región posterior de menor velocidad media, mayor turbulencia y posible recirculación (Schlichting y Gersten, 2017).

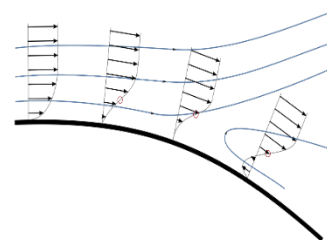


Figura 2.3: Perfil de velocidades con separación de flujo.

La estela a sotavento es relevante porque representa una región donde el flujo ha perdido parte de su cantidad de movimiento. Si esa estela es extensa, coherente y próxima al suelo, puede generar condiciones favorables a la deposición de nieve transportada. Por el contrario, una estela más corta, menos compacta o mejor ventilada puede reducir la extensión de zonas protegidas detrás del obstáculo.

La geometría del obstáculo puede modificar la manera en que el flujo se separa y se recupera. Por ello, la evaluación aerodinámica de una propuesta habitacional antártica no debería limitarse a la resistencia global al viento, sino considerar también la calidad de la estela generada a sotavento.

En este sentido, conceptos como separación, recirculación y estela constituyen el puente físico entre forma edilicia y predisposición a la acumulación. Una geometría no elimina por sí misma la nieve, pero puede modificar las regiones donde el flujo se debilita, se separa o queda protegido.

2.3 Velocidad próxima al suelo, esfuerzo cortante y deposición

La deposición y el barrido de nieve se relacionan directamente con el comportamiento del flujo cerca del suelo. Allí, la velocidad del aire, el esfuerzo cortante superficial y la capacidad de transporte del viento son variables determinantes.

Tabla 2.4: Velocidad próxima al suelo, esfuerzo cortante y deposición

Concepto	Significado	Importancia para el análisis
Capa límite próxima al suelo	Región donde la velocidad varía con la altura por efecto de la superficie.	Define el entorno donde se produce transporte, erosión o deposición.
Velocidad de fricción	Magnitud asociada al esfuerzo cortante turbulento sobre la superficie.	Se vincula con umbrales de inicio o mantenimiento del transporte.
Esfuerzo cortante superficial	Acción tangencial del aire sobre el suelo.	Permite interpretar la capacidad de barrido superficial.
Barrido superficial	Remoción o reducción de condiciones favorables a la deposición.	Puede contribuir a reducir zonas protegidas.
Zona de baja velocidad	Región con menor capacidad relativa de transporte.	Puede favorecer deposición si existe nieve disponible.

El viento cercano al suelo no presenta velocidad uniforme. Por efecto de la condición de no deslizamiento y de la rugosidad superficial, la velocidad del aire disminuye al aproximarse a la superficie y aumenta con la altura dentro de la capa límite. Esta variación genera un gradiente de velocidad que se vincula con el esfuerzo cortante ejercido por el flujo sobre el terreno (Schlichting y Gersten, 2017).

En términos simplificados, el esfuerzo cortante superficial puede relacionarse con la velocidad de fricción mediante la expresión: $\tau = \rho u_*^2$

Donde (τ) es el esfuerzo cortante superficial, (ρ) es la densidad del aire y (u_*) es la velocidad de fricción. Esta relación permite interpretar por qué la acción del flujo sobre la superficie es relevante para el transporte eólico de nieve. **Cuando el esfuerzo cortante supera ciertos umbrales, las partículas pueden ser movilizadas o mantenerse en movimiento**; cuando disminuye, aumenta la predisposición a la deposición (Pomeroy y Gray, 1990; Pomeroy y Gray, 1995).

Sin embargo, **el umbral de transporte no es fijo. Depende de la cohesión de la nieve, su densidad, temperatura, humedad, edad, compactación y presencia de costras superficiales**. Por ello, el esfuerzo cortante debe interpretarse como una variable aerodinámica asociada a la capacidad de barrido, no como una predicción directa de acumulación.

En una construcción implantada en terreno nevado, las zonas de baja velocidad próximas al suelo son especialmente críticas. Si el flujo queda bloqueado por el volumen construido o protegido dentro de una estela, disminuye su capacidad de transporte y puede favorecer la deposición. En cambio, si existe circulación activa cerca del suelo, aumenta la posibilidad de barrido superficial. Este concepto justifica estudiar la velocidad cercana al terreno y la interacción del flujo con el suelo. Para un módulo habitacional antártico, no alcanza con analizar el flujo en altura o alrededor del volumen principal; es necesario observar qué ocurre en el plano donde la nieve puede erosionarse, transportarse o depositarse.

2.4 Relación entre geometría edilicia y predisposición aerodinámica

La geometría edilicia no es neutra frente al viento. La forma, la altura sobre el suelo, las aristas, la orientación y la continuidad de las superficies modifican el campo de flujo y, con ello, la predisposición aerodinámica a la acumulación de nieve.

La elevación no debe interpretarse como una solución absoluta. Schaerer (1972) señala que elevar edificios puede ser una estrategia útil para reducir acumulaciones alrededor de construcciones en regiones frías, pero su desempeño depende de que el flujo pueda atravesar efectivamente la zona inferior. Si existen obstrucciones, apoyos muy cerrados o geometrías que inducen separación intensa, el beneficio puede reducirse.

El tratamiento de aristas y superficies también resulta relevante. Las aristas vivas y los cambios bruscos de sección favorecen la separación del flujo. Las transiciones geométricas más suaves pueden reducir la severidad del desprendimiento o desplazar la separación, dependiendo del régimen de flujo y de la dirección del viento.

Tabla 2.5: Geometría edilicia y predisposición aerodinámica

Rasgo geométrico	Efecto aerodinámico	Limitación
Elevar el volumen respecto del suelo	Permitir ventilación inferior y reducir bloqueo próximo al terreno.	No garantiza ausencia de acumulación.
Reducir aristas brutas	Disminuir la severidad de la separación local.	El efecto depende del conjunto geométrico, no solo de un borde.
Suavizar zonas de incidencia	Ordenar el primer contacto entre flujo y volumen.	No resuelve por sí solo la estela posterior.
Tratar zonas de salida	Favorecer una recuperación más gradual del flujo.	La cola puede ser sensible a cambios en la dirección del viento.
Evitar zonas protegidas	Reducir regiones de baja velocidad persistente.	La acumulación real depende también de nieve disponible y viento variable.
Favorecer barrido inferior	Mantener interacción flujo–suelo bajo el módulo.	Depende de apoyos, altura libre y continuidad del flujo.

En infraestructura antártica, también debe considerarse la variabilidad direccional del viento. Una geometría que mejora el comportamiento para una dirección específica puede ser menos favorable cuando el flujo incide desde otro ángulo o se invierte. Por ello, la robustez aerodinámica no depende únicamente del desempeño frente a una dirección ideal, sino de la capacidad de la forma para evitar comportamientos muy desfavorables ante cambios de incidencia.

La hipótesis de trabajo se apoya en esta relación: una modificación geométrica del módulo puede alterar el campo de velocidades, la separación del flujo, la extensión de la estela, el barrido próximo al suelo y la ventilación inferior. Estos cambios no permiten afirmar una eliminación garantizada de acumulaciones, pero sí permiten comparar configuraciones en términos de predisposición aerodinámica.

3. Estado del arte y antecedentes

3.1 Estudios previos sobre nieve y viento en entornos antárticos

La acumulación de nieve transportada por el viento alrededor de edificaciones constituye un problema relevante en climas fríos, especialmente cuando la forma construida modifica el campo de velocidades, genera separación del flujo, zonas de recirculación y variaciones del esfuerzo cortante próximo al suelo. En este sentido, la acumulación de nieve no depende sólo de la presencia de precipitación sólida, sino también de la interacción entre el viento, las partículas transportadas y la geometría edilicia.

Los antecedentes sobre acumulación de nieve alrededor de edificios pueden abordarse mediante tres enfoques principales: mediciones a escala real, ensayos físicos y **simulación numérica**.

Las mediciones de campo permiten registrar condiciones reales, pero presentan baja repetibilidad y escaso control de las condiciones de borde. Los ensayos en túnel de viento o agua ofrecen mayor control experimental, aunque introducen problemas de similitud al representar la nieve mediante materiales sustitutos. Frente a estas limitaciones, la simulación computacional de fluidos permite analizar el campo de flujo bajo condiciones controladas y comparar variantes geométricas de manera sistemática.

Tominaga et al. (2011) y Tominaga (2018) muestran que el uso de simulaciones numéricas para estudiar acumulaciones de nieve alrededor de edificios cuenta con una línea de desarrollo consolidada. Sin embargo, también advierten que el fenómeno es complejo y que la predicción cuantitativa de espesores reales de nieve requiere modelos específicos, calibración y validación.

Esta advertencia resulta central para delimitar el alcance de la presente tesina: el objetivo no es reproducir la acumulación real de nieve, sino evaluar comparativamente cómo distintas configuraciones geométricas modifican el flujo alrededor de un módulo habitacional.

Dentro de esta línea, el trabajo de Thiis (2000) resulta especialmente pertinente, ya que comparó simulaciones numéricas con mediciones a escala real de acumulaciones de nieve alrededor de edificios. Según la revisión de Tominaga et al. (2011), en ese estudio la profundidad de nieve no fue calculada directamente, sino que se relacionaron variables del flujo, como la velocidad de fricción, con zonas donde se esperaban acumulaciones. **Este antecedente respalda el uso de indicadores aerodinámicos indirectos para identificar condiciones más o menos favorables a la deposición de nieve.**

La decisión de no simular explícitamente el transporte de nieve también encuentra respaldo en estudios recientes. Kang et al. (2018) muestran que la simulación del transporte de nieve depende de parámetros físicos y computacionales sensibles, como la velocidad de caída de las partículas, el número de Schmidt turbulento, la velocidad umbral de fricción, la densidad de nieve,

la resolución de malla y el modelo de turbulencia. En una línea más avanzada, Chen y Yu (2022) desarrollan un solucionador numérico (*solver*) multietapa en OpenFOAM que incorpora transporte de nieve, erosión, deposición, actualización de la superficie y malla dinámica. **Estos trabajos evidencian que la predicción explícita del fenómeno exige un nivel de modelación que excede el propósito de una evaluación geométrica preliminar.**

En ambientes antárticos, el caso de la estación SANA E IV aporta una referencia aplicada. Beyers, Harms y Stander (2010) estudiaron mediante CFD la formación de acumulaciones de nieve en una estación elevada y aerodinámicamente perfilada.

En el contexto argentino, Novoa, Díaz y Rueda (2020) constituyen un antecedente relevante por desarrollar una modelación conjunta de viento y nieve sobre una estructura en la Antártida, tomando como referencia la Base Marambio y utilizando ANSYS Fluent. Si bien su objetivo difiere del presente trabajo, ya que estudia la acción combinada viento–nieve sobre estructuras y no la comparación aerodinámica de variantes geométricas, aporta una referencia directa al problema en el ámbito antártico argentino.

3.2 Antecedentes de diseño aerodinámico en bases polares

En la arquitectura antártica, la forma exterior no responde únicamente a criterios estructurales o funcionales. La relación con el terreno, la exposición al viento, la acumulación de nieve, la posibilidad de mantenimiento y la capacidad de montaje o relocalización forman parte de las decisiones de diseño. Por este motivo, distintas bases polares han incorporado estrategias como elevación sobre apoyos, separación respecto del suelo, envolventes aerodinámicas, modularidad, sistemas de izado y posibilidad de traslado.

SANA E IV, de Sudáfrica, constituye un antecedente relevante porque muestra tanto el valor como los límites de la elevación. La estación fue concebida como una estructura elevada y aerodinámicamente perfilada, ubicada sobre el afloramiento rocoso Vesleskarvet, en Queen



Figura 3.1: Estacion SANA E IV

Maud Land. Su estructura principal se eleva aproximadamente cuatro metros sobre el terreno mediante columnas, con la intención de permitir que el viento y la nieve transportada atravesasen la zona de implantación por encima y por debajo de los edificios. Esta decisión busca reducir el enterramiento y favorecer el barrido natural de nieve alrededor de la base.

Sin embargo, el caso también demuestra que elevar una construcción no garantiza por sí solo un buen desempeño frente a la acumulación. Beyers, Harms y Stander (2010) documentaron acumulaciones importantes a sotavento atribuidos a la geometría de los enlaces entre los bloques y a la reorganización del flujo en esas zonas. Como medida correctiva, se evaluaron

placas deflectoras mediante simulación numérica CFD y luego se aplicaron en campo, reduciendo la magnitud de las mismas. Para esta tesina, SANAE IV permite extraer una idea central: **la separación respecto del suelo es útil, pero el desempeño depende de la geometría completa del conjunto.**

Halley VI, desarrollada por el British Antarctic Survey, aporta un enfoque distinto. Su diseño no se centra únicamente en la forma aerodinámica, sino en una estrategia integral de modularidad, elevación y relocalización. La estación está compuesta por módulos altamente aislados, elevados sobre patas hidráulicas de acero, apoyados en esquís y diseñados para ser remolcados por vehículos oruga.



Figura 3.2: Estación Halley VI

Esta solución responde a dos condicionantes principales: la acumulación progresiva de nieve y el desplazamiento de la plataforma de hielo Brunt.

En este caso, la elevación forma parte de una estrategia operativa. Los módulos pueden mantenerse separados de la superficie nevada, izarse periódicamente y trasladarse para prolongar la vida útil de la estación. Además, la disposición de las plataformas es planteada en relación con el viento predominante, con el objetivo de reducir tareas de manejo de nieve. **Halley VI resulta relevante porque confirma que la elevación, la orientación, el izado y la movilidad son decisiones reales de diseño en infraestructura polar.**

Comandante Ferraz, de Brasil, introduce un antecedente especialmente pertinente dentro del contexto sudamericano. La estación combina estructura elevada, envolvente metálica continua y tratamiento formal frente a viento, nieve y desempeño térmico. A diferencia de otros casos donde la elevación responde principalmente al crecimiento de la superficie nevada, Ferraz incorpora una envolvente exterior como parte activa del diseño ambiental. Esta cáscara permite mejorar el comportamiento térmico, facilitar el barrido de nieve por acción del viento y reducir las fuerzas horizontales transmitidas a la estructura y a las fundaciones.



Figura 3.3: Estación Comandante Ferraz

Princess Elisabeth, de Bélgica, constituye un antecedente destacado por el modo en que integra forma compacta e implantación. La estación se ubica sobre la cresta rocosa Utsteinen, en Dronning Maud Land, y fue concebida como una construcción elevada sobre terreno inclinado, conectada a un garaje bajo nieve. Su diseño fue acompañado por estudios de ingeniería de viento orientados a evaluar presiones sobre la



Figura 3.4: Estación Princess Elisabeth

envolvente y manejo de acumulaciones, durante el proceso se analizaron distintas geometrías mediante ensayos en túnel de viento con técnica de erosión de arena.

Neumayer III, de Alemania, también debe considerarse un antecedente relevante de diseño frente a nieve y viento. La estación se ubica sobre la plataforma de hielo Ekström y combina una plataforma elevada, apoyada sobre columnas de acero, con un sistema de izado hidráulico que permite compensar la acumulación anual de nieve. El sector habitable y de trabajo se dispone sobre una plataforma elevada de aproximadamente 6 m, protegida por una envolvente aislada de forma aerodinámica, concebida para reducir la acción del viento, el frío extremo y los efectos locales de acumulación o erosión de nieve alrededor de la base.

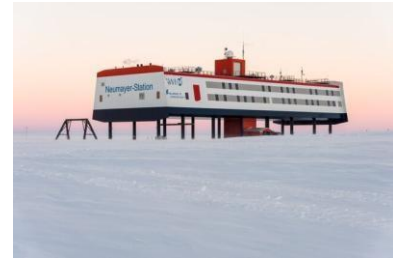


Figura 3.5: Estacion Neumayer III

Bharati, de India, constituye uno de los antecedentes más directos para esta investigación por su relación con el uso de contenedores. La estación fue construida a partir de 134 contenedores ISO de 40 pies, utilizados como estructura interna y sistema de organización espacial. Sin embargo, esos contenedores no quedaron expuestos como imagen final del edificio. Fueron recubiertos por una envolvente metálica aislada y aerodinámica, ensayada en túnel de viento y optimizada para reducir la formación de acumulaciones de nieve alrededor de la estación.

La lógica es cercana a la propuesta de esta tesina: **partir de una unidad modular transportable, pero modificar su relación con el flujo mediante elevación y carenado.**

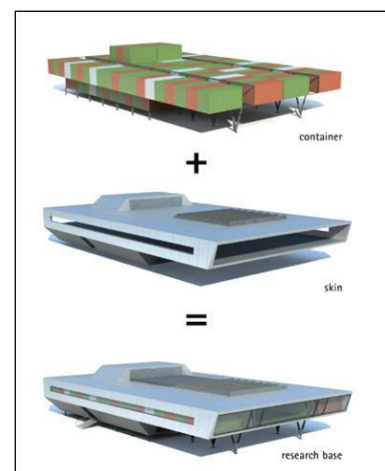


Figura 3.6: Estacion Bharati

Otros casos permiten completar el marco sin desplazar los antecedentes principales:

- **Kohnen**, de Alemania, utiliza una plataforma metálica elevada sobre pilares con módulos contenedor de 20 pies, y requiere operaciones periódicas de elevación frente a la acumulación de nieve.



Figura 3.7: Estacion Kohnen

- **Amundsen-Scott South Pole**, de Estados Unidos, funciona como referencia general de infraestructura polar permanente elevada y conectada.



Figura 3.8: Estacion Amundsen-Scott

3.3 Uso de contenedores y módulos prefabricados en logística antártica

La operación antártica impone condiciones logísticas que condicionan el diseño desde etapas tempranas. Los componentes deben transportarse a grandes distancias, descargarse en ventanas climáticas reducidas, montarse con personal limitado y mantenerse durante períodos prolongados en condiciones de aislamiento. En ese contexto, la modularidad y la prefabricación permiten reducir trabajos in situ, ordenar la cadena de suministro, facilitar reemplazos y disminuir tiempos de montaje. El contenedor ISO se inscribe dentro de esta lógica como unidad transportable, estandarizada y adaptable.

El catálogo de COMNAP permite verificar que distintas infraestructuras antárticas utilizan módulos transportables, laboratorios móviles, unidades contenedorizadas y sistemas prefabricados. En esta tesina, el contenedor ISO de 20 pies se adopta como base dimensional y constructiva reconocible, no como solución definitiva.

Bharati, es el antecedente más relevante para vincular contenedores y arquitectura antártica permanente. Como se mencionó, la estación utiliza 134 contenedores ISO de 40 pies como estructura interna y sistema de organización espacial. Este caso demuestra que el contenedor puede ser eficiente como unidad de transporte, montaje y organización interna.

Kohnen, aporta una referencia más próxima a la escala del contenedor de 20 pies. Su edificio central está compuesto por una plataforma metálica elevada de 32 m por 8 m, apoyada sobre 16 pilares, sobre la cual se disponen 11 módulos contenedor de 20 pies. Estos módulos alojan funciones como radio, comedor, cocina, sanitarios, dormitorios, depósito, taller y planta de energía.

El **Dirck Gerritsz Laboratory**, instalado en Rothera, muestra el uso del contenedor como unidad científica especializada. Está formado por cuatro laboratorios móviles de alta tecnología contruidos en contenedores ISO *high cube* de 20 pies y alojados en una estación de acople diseñada para recibirlos. Cada contenedor cumple una función específica: laboratorio seco, cultivo, laboratorio húmedo y laboratorio ultralimpio, con



Figura 3.9: Estacion Dirck Gerritsz Laboratory

condiciones interiores controladas (COMNAP, 2017). Aunque no se trata de un uso habitacional, confirma la versatilidad del contenedor como unidad técnica transportable, equipada y acoplable.

Scott Base, de Nueva Zelanda, aporta un ejemplo similar desde la flexibilidad operativa. Sus instalaciones científicas incluyen laboratorios portátiles en contenedores que pueden acoplarse al edificio principal, además de laboratorios húmedos menores (COMNAP, 2017). En este caso, el contenedor funciona como módulo complementario capaz de ampliar o especializar capacidades sin requerir una construcción convencional independiente.



Figura 3.10: Estacion Scott Base

3.4 Vacancia identificada

La revisión de antecedentes permite reconocer tres líneas de trabajo vinculadas con esta tesina:

- Los estudios CFD aplicados al acumulamiento de nieve
- Los antecedentes de diseño aerodinámico en bases polares
- El uso de contenedores o módulos prefabricados en logística antártica

Sin embargo, en los casos relevados no aparece un antecedente directo que reúna simultáneamente esas tres dimensiones en la escala específica de un módulo habitacional de escala reducida basado en un contenedor ISO de 20 pies.

Los antecedentes de arquitectura polar no constituyen antecedentes equivalentes a un módulo habitacional de pequeña escala.

Los casos vinculados con módulos prefabricados confirman la utilidad y versatilidad de los contenedores, pero no desarrollan una evaluación específica de la transformación de su forma prismática frente al viento.

Por lo tanto, la vacancia identificada no se encuentra en cada tema por separado, sino en su combinación específica: la aplicación de criterios aerodinámicos de diseño –con apoyo en la simulación numérica– a un módulo habitacional basado en contenedor ISO 20 pies.

La identificación de esta vacancia no implica afirmar que no existan procesos de evaluación geométrica en el diseño de infraestructura polar, sino que, dentro de los antecedentes relevados, no se encontró un caso equivalente al recorte adoptado en este trabajo.

4. Contexto de aplicación

El presente capítulo define el contexto de aplicación adoptado para la propuesta desarrollada en esta tesina. Su función no es evaluar todavía el desempeño aerodinámico del módulo ni justificar la selección final de una variante geométrica, sino establecer el marco territorial, climático, operativo y funcional dentro del cual la propuesta adquiere sentido.

La Base Marambio se adopta como caso de referencia por su relevancia dentro del sistema antártico argentino, por su exposición a condiciones ambientales severas y por su rol logístico en el despliegue de actividades científicas y operativas. Esta elección permite situar el estudio en un escenario real de aplicación, sin que ello implique desarrollar un proyecto ejecutivo específico para una implantación determinada.

A partir de este enfoque, el capítulo se organiza en cuatro apartados. En primer lugar, se presenta la Base Marambio como caso de referencia. Luego, se sintetizan las condiciones climáticas relevantes para el diseño, con especial atención al viento y a la posibilidad de transporte eólico de nieve. En tercer lugar, se describen los condicionantes operativos y logísticos propios del trabajo en campaña antártica. Finalmente, estos condicionantes se traducen en requerimientos funcionales derivados para el módulo.

4.1 La Base Marambio como caso de referencia

La Base Marambio se ubica en la isla Marambio, en el sector antártico argentino, y constituye una de las bases permanentes del país en la Antártida. Su selección como caso de referencia responde a su importancia operativa dentro del Programa Antártico Argentino y a su condición de enclave logístico expuesto a un ambiente caracterizado por viento, nieve, bajas temperaturas y restricciones de operación.

De acuerdo con la *Dirección Nacional del Antártico, dependiente del Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto*, la Base Marambio depende de la Fuerza Aérea Argentina y constituye la principal puerta de entrada de la logística argentina en la Antártida. Desde allí se despliega además un número significativo de campamentos científicos durante la Campaña Antártica de Verano.

Esta condición resulta relevante para la presente tesina porque vincula el caso de estudio con un entorno donde la habitabilidad, el transporte, el montaje, el mantenimiento y la exposición climática no pueden analizarse como aspectos independientes. En Marambio, cualquier solución edilicia debe entenderse dentro de una lógica de operación remota, con recursos limitados, ventanas de intervención acotadas y elevada dependencia de la planificación logística.

La elección de Marambio no implica que la propuesta desarrollada constituya un proyecto definitivo de implantación para esa base. En cambio, la base se utiliza como marco de referencia

para orientar criterios generales de diseño aplicables a un módulo habitacional antártico: transportabilidad, prefabricación, montaje rápido, mantenimiento posible en sitio, elevación respecto del terreno y reducción de condiciones aerodinámicas desfavorables asociadas a la acumulación de nieve.

En este sentido, Marambio permite situar la investigación en un escenario real y exigente, sin transformar el alcance del trabajo en un proyecto integral de infraestructura antártica. La tesina se mantiene enfocada en la evaluación geométrica y aerodinámica de un módulo individual, mientras que el contexto de la base permite establecer los condicionantes que justifican la necesidad de una solución modular, robusta y operativamente viable.

4.2 Condiciones climáticas relevantes para el diseño

Las condiciones climáticas de la Base Marambio resultan centrales para contextualizar el problema abordado en esta tesina. En particular, el viento constituye una variable relevante porque interviene tanto en las solicitudes sobre las construcciones como en la redistribución de nieve alrededor de obstáculos implantados en el terreno.

En este trabajo, la caracterización climática se enfoca en aquellos aspectos que tienen incidencia directa sobre el diseño general del módulo: exposición al viento, variabilidad direccional, presencia de nieve transportable y posibilidad de formación de zonas protegidas a sotavento. No se busca desarrollar una climatología completa de la base, sino identificar las condiciones ambientales que justifican la necesidad de una propuesta geométrica adaptada al contexto antártico.

El Servicio Meteorológico Nacional incluye a la Base Marambio dentro de sus registros meteorológicos de superficie. Para complementar la caracterización del sitio, se procesaron datos horarios de viento correspondientes al período 2016–2025, publicados por el SMN a través de Datos Argentina. La serie permite reconocer la distribución direccional del viento y la intensidad asociada a los distintos sectores.

Para la lectura direccional, se consideraron como válidos los registros codificados entre 1 y 36, interpretados en decenas de grados. Los valores 0 se trataron como calmas y los valores 99 como dirección variable, de acuerdo con la codificación meteorológica usual para registros de viento.

Tabla 4.1 Resumen del procesamiento de datos horarios de viento en Base Marambio, período 2016–2025.

Indicador	Resultado
Período procesado	01/01/2016 00:00 a 31/12/2025 23:00
Registros horarios totales	87.650
Registros con dirección válida	86.238
Registros calmos	1.090
Registros con dirección variable	322
Intensidad media	32,23 km/h = 8,95 m/s
Mediana	28 km/h = 7,78 m/s
Percentil 90	61 km/h = 16,94 m/s
Percentil 95	72 km/h = 20,00 m/s
Percentil 99	89 km/h = 24,72 m/s
Máxima intensidad media horaria	148 km/h = 41,11 m/s
Máxima ráfaga registrada	174 km/h = 48,33 m/s

Fuente: elaboración propia a partir de datos horarios del Servicio Meteorológico Nacional publicados en Datos Argentina.

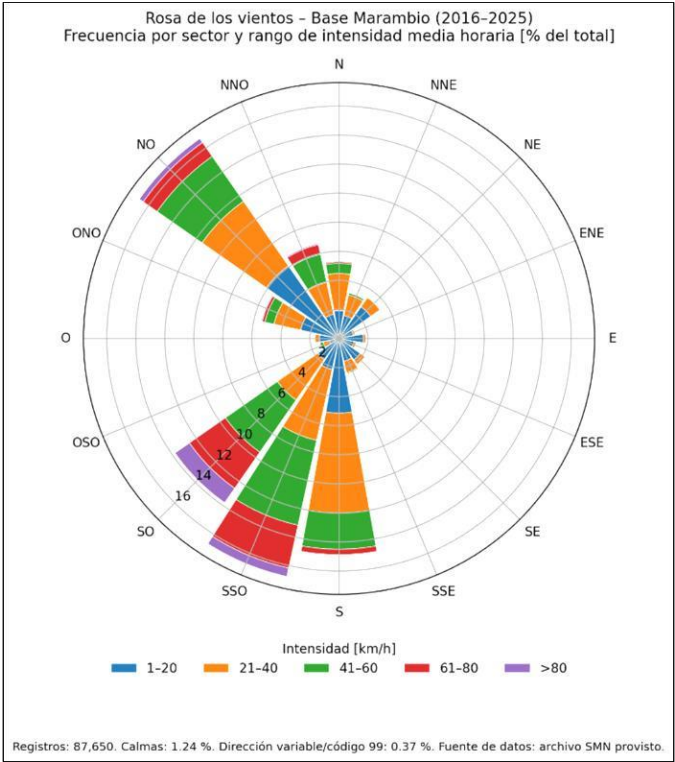


Figura 4.1: Rosa de los vientos de Base Marambio elaborada a partir de datos horarios del Servicio Meteorológico Nacional, período 2016–2025.

La rosa de los vientos permite reconocer una distribución direccional no uniforme. Los sectores con mayor frecuencia relativa fueron NO, SSO, S, SO y NNO. Entre ellos, los sectores SSO y SO no solo presentan una presencia frecuente, sino también intensidades medias superiores a la media general del período procesado.

Tabla 4.2 Sectores principales de viento en Base Marambio, período 2016–2025.

Sector	Frecuencia sobre direcciones válidas	Velocidad media
NO	17,05 %	32,18 km/h
SSO	17,04 %	44,24 km/h
S	15,13 %	28,34 km/h
SO	14,00 %	48,36 km/h
NNO	6,80 %	35,99 km/h

Fuente: elaboración propia a partir de datos horarios del Servicio Meteorológico Nacional publicados en Datos Argentina.

La lectura de estos datos permite extraer una conclusión relevante para el contexto de aplicación: el viento en Marambio presenta una exposición significativa y una variabilidad direccional que no debería ser ignorada en el diseño de un módulo habitacional expuesto. En consecuencia, la geometría exterior del módulo debe considerarse como parte del problema de diseño, ya que puede modificar la interacción entre el flujo, la construcción y el terreno próximo.

4.3 Condicionantes operativos y logísticos

Además de las condiciones climáticas, la Base Marambio presenta condicionantes operativos y logísticos que inciden directamente sobre cualquier propuesta constructiva. La infraestructura antártica no puede evaluarse con los mismos criterios que una construcción convencional en territorio continental, ya que el transporte, el montaje, el mantenimiento, la disponibilidad de recursos y la seguridad operativa condicionan el diseño desde etapas tempranas.

La logística antártica argentina depende de medios marítimos y aéreos que deben operar en un ambiente hostil y bajo múltiples restricciones. La Dirección Nacional del Antártico señala que los Hércules C-130 y el buque rompe hielos ARA Almirante Irizar, son fundamentales para el cruce entre el territorio argentino y la Antártida. Además se dispone de balsas de desembarco y helicópteros Sea King para el traslado a tierra firme de cargamentos.

Esta condición logística tiene implicancias directas para el diseño del módulo. En primer lugar, favorece soluciones prefabricadas, capaces de reducir el tiempo de trabajo en sitio. En segundo lugar, exige que los componentes sean transportables y manipulables dentro de las capacidades disponibles. En tercer lugar, obliga a prever tareas de montaje y mantenimiento con personal, herramientas y tiempos de intervención limitados.

La operación en **campaña verano** también condiciona las decisiones constructivas. De acuerdo con la Dirección Nacional del Antártico, durante los meses de verano, entre diciembre y marzo, grupos de investigación del Instituto Antártico Argentino desarrollan actividades en sitios relativamente distantes de las bases, muchos de ellos en el entorno de la isla James Ross y con apoyo desde Base Marambio. Esta referencia muestra que la operación antártica depende de ventanas temporales acotadas, planificación previa y asistencia logística coordinada. Por esto, adquieren valor las estrategias de prefabricación, repetibilidad, montaje seco, mantenimiento relativamente bajo, ya que las reparaciones deben esperar a la próxima campaña.

4.4 Requerimientos funcionales derivados para el módulo

A partir del contexto climático, operativo y logístico analizado, pueden identificarse requerimientos funcionales derivados para el módulo habitacional. Estos requerimientos no constituyen todavía una solución de diseño, sino una matriz de criterios que orienta las decisiones geométricas desarrolladas en el Capítulo 5.

Tabla 4.3 Condicionantes del contexto y requerimientos derivados para el módulo.

Condicionante del contexto	Requerimiento derivado para el módulo
Viento intenso y variable	Geometría menos dependiente de una única dirección favorable
Nieve transportable por viento	Reducción de zonas protegidas y ventilación inferior
Operación remota	Solución simple, accesible y mantenible
Ventana de campaña limitada	Prefabricación y montaje rápido
Logística compleja	Dimensiones compatibles con transporte y manipulación
Necesidad de continuidad operativa	Componentes inspeccionables, reparables y reemplazables
Posible replicabilidad	Sistema modular y repetible
Implantación sobre terreno nevado	Separación respecto del suelo y reducción del bloqueo inferior

La Base Marambio se adopta como caso de referencia porque reúne condiciones climáticas, logísticas y operativas especialmente pertinentes para el problema abordado en esta tesina. Su rol dentro del sistema antártico argentino, su exposición al viento y su función como nodo de apoyo a actividades científicas permiten contextualizar la necesidad de estudiar soluciones habitacionales transportables, prefabricables y adaptadas a un entorno severo.

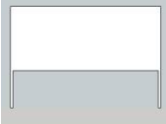
5. Criterios de diseño y definición de variantes

5.1 Estrategia iterativa de desarrollo geométrico

La propuesta geométrica desarrollada en esta tesina no fue definida como una forma cerrada desde el inicio. Por el contrario, se fue construyendo mediante una secuencia de transformaciones geométricas, orientadas a responder a condiciones desfavorables de flujo identificadas durante las etapas exploratorias del análisis.

Como resultado de dicho proceso, se definieron una familia de cinco configuraciones geométricas, denominadas:

Tabla 5.1: Primera asociación entre nomenclatura y geometría.

Nomenclatura	Vista lateral	Nota
V0		<i>Variante n°0: Módulo de referencia basado en Contendor ISO 20 pies</i>
V1		<i>Variante n°1</i>
V2		<i>Variante n°2</i>
V2B		<i>Variante n°2: versión B</i>
V3		<i>Variante n°3: versión final</i>

Estas configuraciones representan etapas sucesivas de desarrollo de un mismo módulo de referencia y permiten reconstruir la evolución desde una condición base prismática apoyada sobre el terreno hasta una envolvente exterior con tratamiento aerodinámico más desarrollado.



Figura 5.1: Esquema sumatoria de modificaciones

Las variantes no constituyen alternativas independientes generadas al azar ni propuestas finales equivalentes entre sí. Cada una incorpora, mantiene o revisa decisiones adoptadas en la etapa precedente.

La evolución del diseño siguió una lógica sencilla:

- i) Se identifica una condición desfavorable o una limitación en la variante superadora.
- ii) Se ensaya una modificación geométrica para responder a ella.
- iii) Se analiza la nueva configuración para definir el ajuste siguiente.

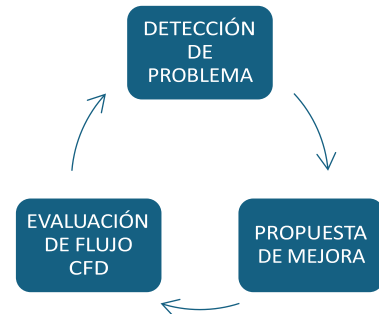


Figura 5.2: Esquema proceso iterativo de evolución geométrica.

El proceso combinó los criterios generales del diseño aerodinámico y la lectura de simulaciones exploratorias del flujo. De este modo, las transformaciones geométricas surgieron como operaciones vinculadas a la reducción de la predisposición relativa a la acumulación de nieve.

Debe aclararse que el efecto de cada pieza no puede aislarse de manera estricta. Las simulaciones comparan configuraciones completas, con modificaciones acumulativas entre variantes. Por esta razón, las hipótesis asociadas a los carenados, apoyos y remates posteriores deben interpretarse como parte del comportamiento del conjunto y no como resultados cuantitativos atribuibles de manera exclusiva a un único elemento.

Los campos de flujo incorporados en este capítulo se utilizan únicamente como insumos de diagnóstico que justifican la continuidad del proceso de diseño. El análisis comparativo integral de las simulaciones, la lectura de indicadores numéricos indirectos y la justificación cuantitativa de la propuesta final se desarrollan en el Capítulo 7.

5.2 Elección del contenedor ISO 20' como referencia de partida

El módulo se desarrolla a partir de un contenedor ISO 20 pies estándar 1CC de 8'6" de alto, Propósito General (*General Purpose*) / Carga Seca (*Dry Van*), con código 22G1. Adoptado como referencia dimensional, logística y constructiva.

La elección de esta unidad permite trabajar sobre una envolvente de escala reducida, reconocible y transportable, compatible con una lógica de prefabricación y con la necesidad de limitar las intervenciones realizadas en sitio.



Figura 5.3: Ilustración contenedor ISO 20

La utilización del contenedor como punto de partida no asume que su condición original constituya una respuesta adecuada frente al viento. Por el contrario, su geometría prismática de aristas marcadas representa una condición inicial útil para evaluar cómo determinadas transformaciones pueden modificar la interacción entre el módulo y el flujo incidente.

En este sentido, el contenedor ISO 20' se adopta como una referencia logística, dimensional y constructiva, no como una geometría aerodinámicamente favorable. La unidad permite plantear un módulo habitacional de escala acotada, potencialmente replicable, adaptable o agrupable, sin perder la posibilidad de transformar su envoltorio exterior.

La selección también responde a una lógica de operación remota. Una unidad modular de dimensiones contenidas puede vincularse con procesos de transporte, prefabricación, montaje y eventual sustitución por componentes, aspectos relevantes en un contexto donde las ventanas de intervención, los recursos disponibles y el tiempo de trabajo en sitio resultan condicionantes del proyecto.

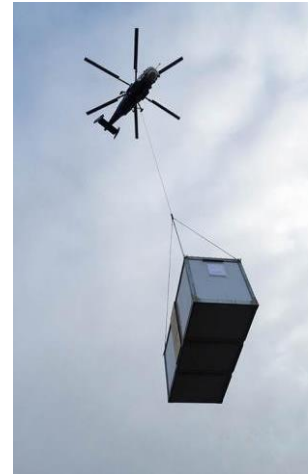


Figura 5.4: Transporte aéreo de un módulo de 20 pies destinado a Base Carlini.

Sin embargo, estos aspectos operativos no constituyen por sí mismos una validación constructiva del módulo, sino que definen el marco desde el cual se adopta la unidad de referencia.

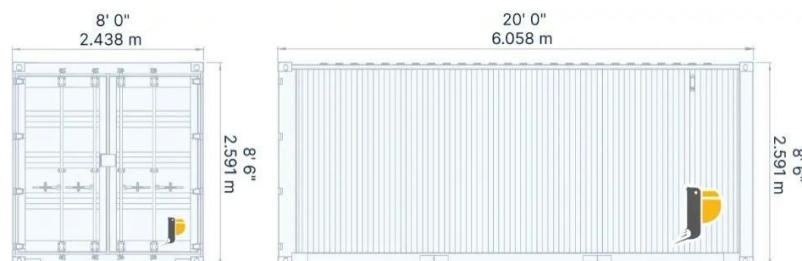


Figura 5.5: Contenedor ISO 20' adoptado como referencia dimensional. Fuente: Pelican Containers.

Las geometrías desarrolladas se modelaron a escala real y se concentraron en la envoltorio exterior y en los elementos con incidencia potencial sobre el flujo.

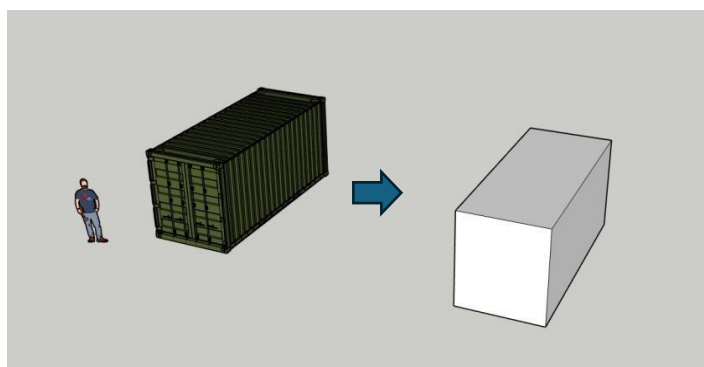


Figura 5.6: Ilustración representativa de la simplificación geométrica del modelo base.

Por esta razón, se omitieron instalaciones, herrajes, aberturas menores, detalles interiores, elementos de equipamiento y resoluciones constructivas que no resultaban determinantes para la comparación aerodinámica entre variantes. Además, la simplificación resulta útil para administrar mejor los recursos informáticos de la simulación. La preparación digital específica del modelado CFD, incluyendo exportación, reparación geométrica y configuración del modelo numérico, se desarrolla en el Capítulo 6.

5.3 Secuencia iterativa de variantes geométricas

La familia de variantes se organiza como una secuencia acumulativa de desarrollo. Cada etapa incorpora transformaciones respecto de la configuración precedente y permite reconocer tanto el aporte de la modificación introducida como las limitaciones que motivaron la siguiente decisión de diseño.

La secuencia no debe interpretarse como un catálogo de alternativas equivalentes. Cada variante surge de una necesidad distinta:

- i) *V0 funciona como condición base.*
- ii) *V1 modifica la relación entre el módulo y el terreno.*
- iii) *V2 incorpora un sistema de envolvente exterior para suavizar la incidencia y ordenar el flujo.*
- iv) *V2B verifica el alcance de una corrección local.*
- v) *V3 reformula la lógica general de la cola mediante una configuración simétrica.*

Los campos de flujo incorporados en este apartado se presentan como insumos de diagnóstico que justifican la continuidad del proceso de diseño. El análisis comparativo integral de las simulaciones se desarrolla en el Capítulo 7.

5.3.1 V0 – Condición base apoyada

La variante V0 representa la condición base del estudio. Se compone de un volumen prismático simple, consecuente al contenedor *ISO 20 pies* de referencia, apoyado directamente sobre el terreno.

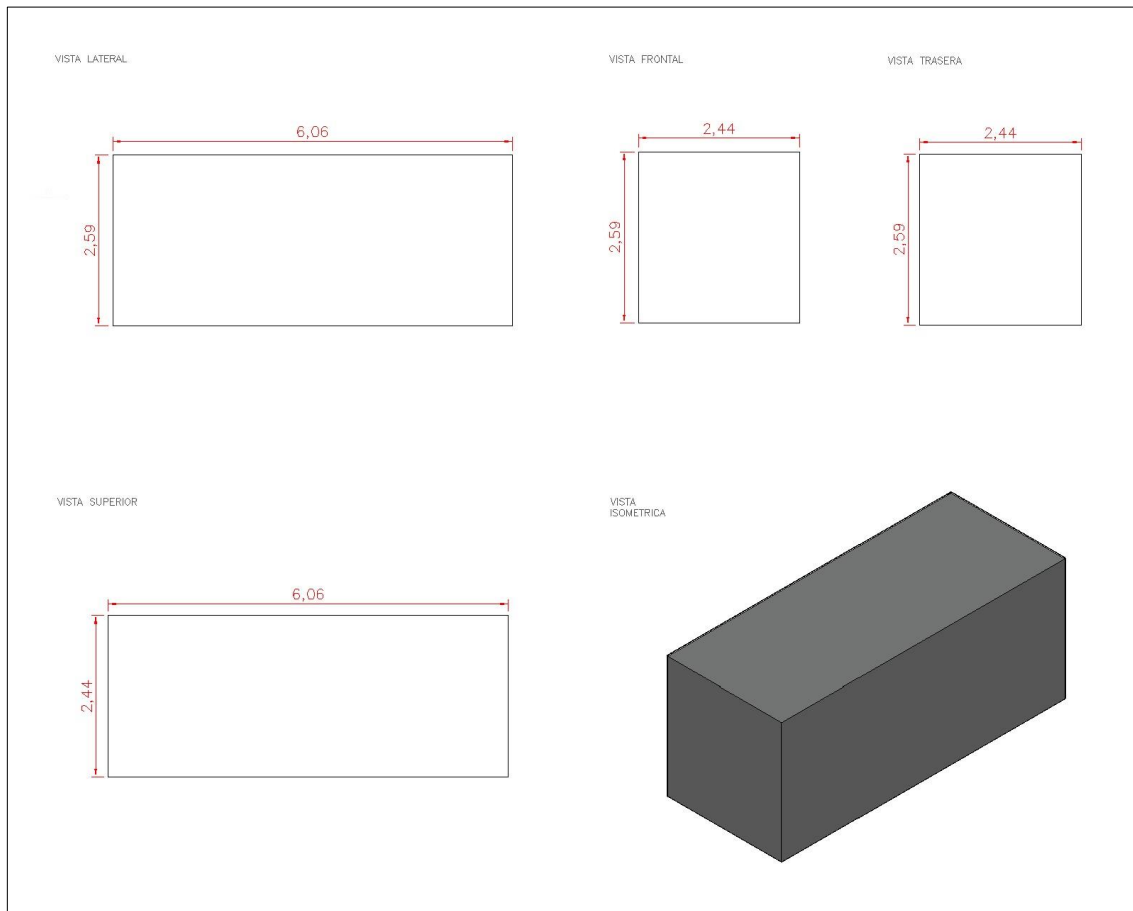


Figura 5.7: Variante V0: condición base apoyada sobre el terreno.

La función de V0 consiste en establecer una condición inicial de comparación frente a la cual puedan leerse los efectos relativos de las transformaciones posteriores. Su geometría conserva el carácter directo del contenedor prismático: una cara frontal plana, bordes de incidencia definidos, caras laterales sin continuidad aerodinámica y una base en contacto con el plano de suelo.

En esta condición, el flujo permite identificar dos aspectos relevantes para el proceso de diseño. En primer lugar, el apoyo directo impide el pasaje de aire bajo el volumen y establece una relación inmediata entre el obstáculo y el terreno. En segundo lugar, la geometría prismática presenta un encuentro abrupto entre el flujo incidente y la cara frontal del módulo generando desprendimiento de la capa límite.

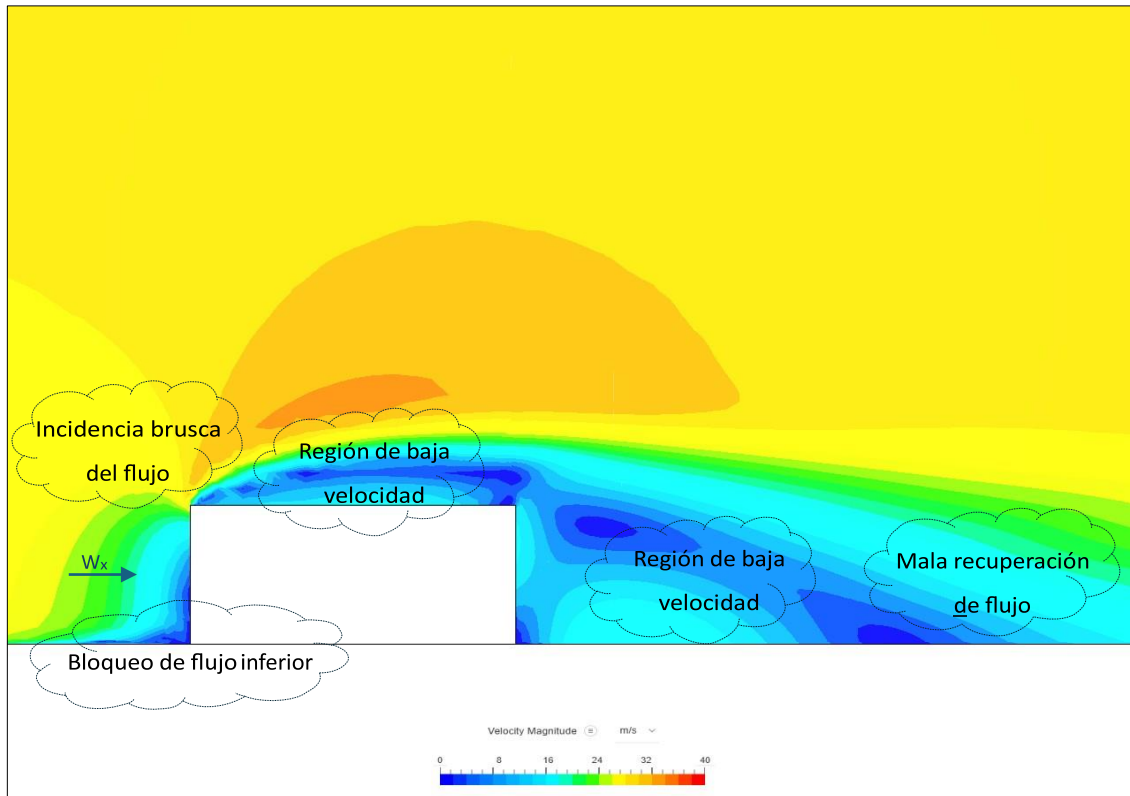


Figura 5.8: Captura de pantalla SimScale – Campo de velocidad: Esquema de problemas aerodinámicos V0

Además, esta lectura diagnóstica inicial de V0 mostró que el módulo apoyado produce una región de baja velocidad inmediatamente a sotavento, vinculada de manera directa con el plano de apoyo. Reforzado por la ausencia de flujo bajo el módulo, que podría beneficiar la recuperación del flujo a sotavento.

Este diagnóstico es el que motivó la primera transformación geométrica: **separar el módulo del terreno para habilitar circulación inferior y reducir el vínculo directo entre la estela y la superficie.**

5.3.2 V1 – Elevación del módulo sobre patas

La variante V1 surge como respuesta al bloqueo próximo al terreno identificado en la condición base. La transformación principal consiste en elevar el módulo mediante cuatro apoyos, formados por perfiles tubulares de 120 mm x 120 mm, ubicados en coincidencia con las esquinas inferiores del contenedor, generando una distancia preliminar de 1,50 m entre la base del contenedor y el plano de suelo.

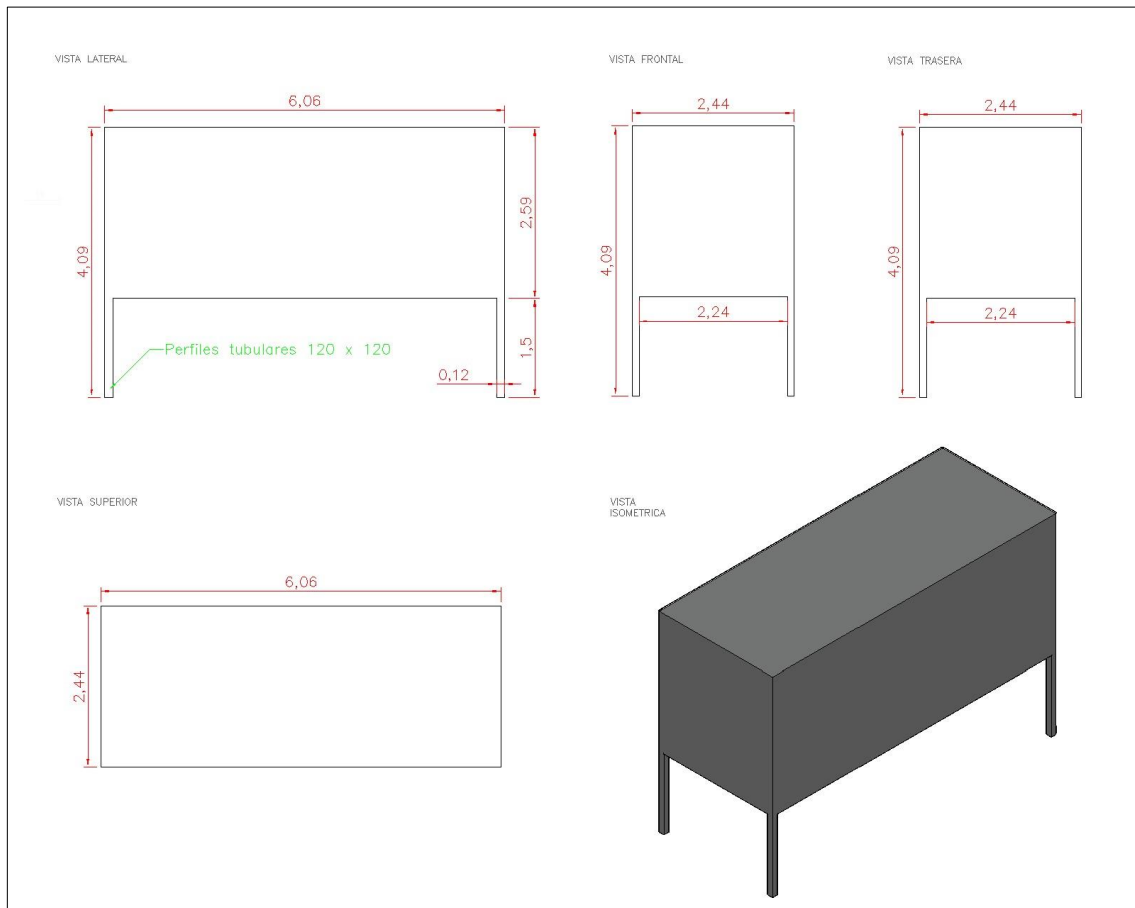


Figura 5.9. Variante V1: elevación del módulo sobre cuatro apoyos.

La incorporación de la elevación no busca únicamente separar el módulo de la superficie, sino modificar la interacción entre el flujo, el volumen construido y el terreno. La hipótesis de mejora asociada a esta operación consiste en habilitar circulación inferior, reducir el estancamiento inmediato bajo el módulo y evitar que la estela quede vinculada de manera continua al plano de apoyo.

La altura libre de 1,50 m se adopta como una condición geométrica preliminar para habilitar circulación inferior y mantener comparabilidad entre las variantes elevadas posteriores. No se presenta como una altura óptima ni como resultado de una optimización paramétrica. Su definición responde a la necesidad de introducir un espacio de ventilación bajo el módulo dentro de una escala compatible con la unidad de referencia.

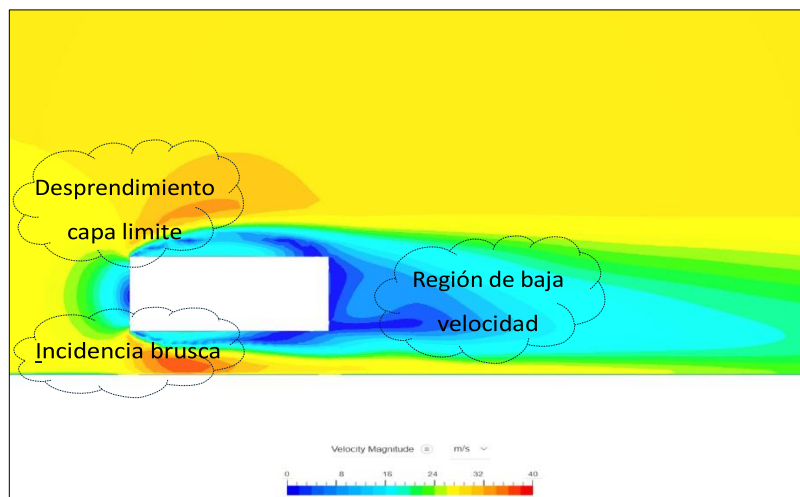


Figura 5.10: Captura de pantalla SimScale – Campo de velocidad: Esquema de problemas aerodinámicos V1

La lectura diagnóstica de V1 permitió verificar que la elevación habilita el pasaje de aire bajo el módulo y modifica la organización de la perturbación próxima al terreno. Sin embargo, esta decisión no resuelve completamente la incidencia abrupta del flujo sobre el volumen prismático ni define por sí sola una descarga posterior ordenada.

A partir de esta limitación, la etapa siguiente se orienta a transformar la envolvente exterior del módulo. La definición y verificación estructural del conjunto no forman parte de este apartado. Posteriormente estos aspectos se abordan de manera preliminar como parte de la evaluación de viabilidad y prefactibilidad desarrollada en el Capítulo 8.

5.3.3 V2 – Carenado frontal, continuidad lateral y cola direccional

La variante V2 incorpora una transformación más amplia de la envolvente exterior. Surge a partir de la lectura de V1, donde la ventilación inferior ya permite modificar la relación entre el módulo y el terreno, pero persiste una interacción abrupta entre el flujo incidente y el volumen prismático.

La hipótesis de diseño consiste en suavizar el primer contacto entre el flujo y el módulo, dar continuidad al recorrido del aire sobre, bajo y lateralmente al volumen, y ordenar la descarga posterior. Para ello, V2 incorpora un sistema de piezas que debe interpretarse como una envolvente articulada y no como una suma de elementos formales independientes.

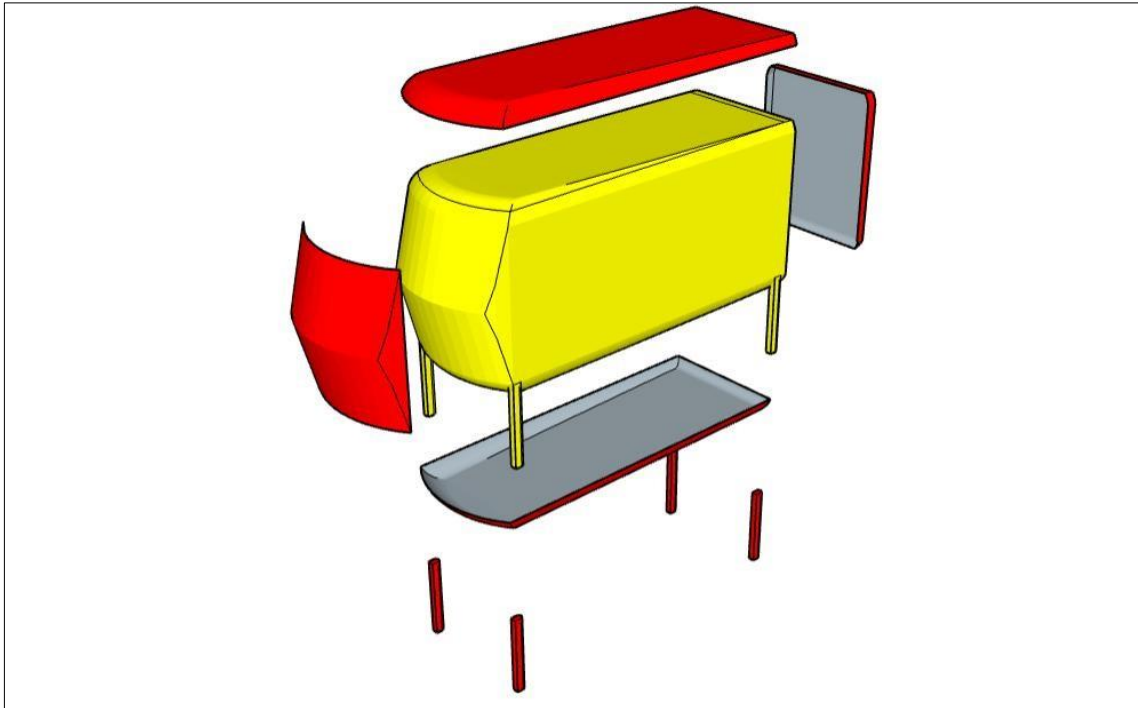


Figura 5.11: Desglose del carenado en V2

El primer componente es el carenado frontal principal. Su función proyectual consiste en sustituir la incidencia directa sobre una cara plana por una transición geométrica gradual, capaz de conducir parte del flujo hacia las superficies superiores, inferiores y laterales del módulo.

Para conseguirlo se fusionaron porciones verticales de tres geometrías conocidas. Se utilizaron dos cilindros (rojos) de un mismo radio ($R = 2,03 \text{ m}$) y uno (amarillo) con un radio menor ($r = 1,22 \text{ m}$). Los cilindros rojos fueron rotados manteniendo el mismo eje horizontal central y el amarillo fue superpuesto con los mismos. Del conjunto intercepto se aprovecharon las caras que resultaron favorables para conseguir desviar el flujo.

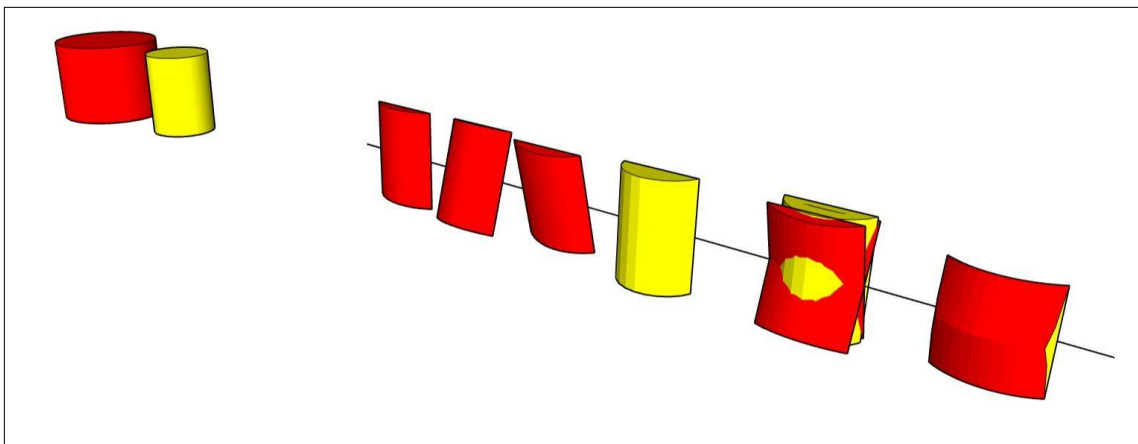


Figura 5.12: Captura de pantalla Sketchup – Esquema de conformación del carenado frontal.

Para conseguir los cierres superior e inferior frontales, se empleó una curva en revolución de lados 0.30 m y 0.40 m, con un giro de $68,7^\circ$. La misma es la que da continuidad entre el carenado frontal y los cerramientos de techo y piso.

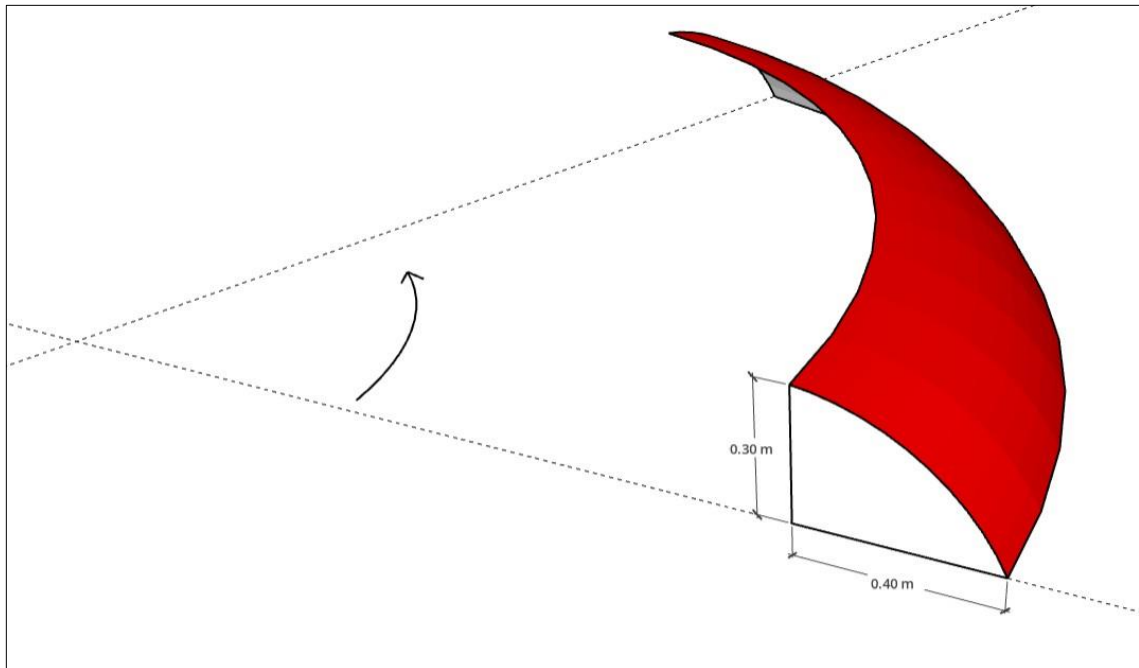


Figura 5.13: Esquema de conformación carenados superior e inferior frontales.

La envolvente se completa con carenados laterales superiores y carenados laterales inferiores. Ambos elementos articulan el frente con la descarga posterior y permiten que el tratamiento aerodinámico no quede concentrado exclusivamente en la cara de incidencia. La continuidad superior acompaña el flujo sobre el techo, mientras que la continuidad inferior colabora con el encauzamiento del aire que circula bajo el módulo.

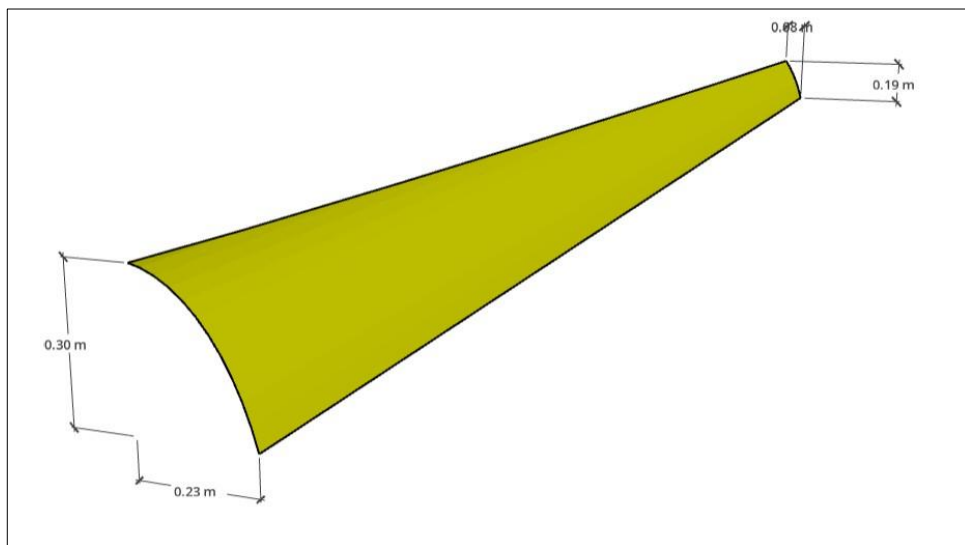


Figura 5.14: Esquema conformación carenados alabeados laterales.

Se conforman por secciones de curvatura variable. El desarrollo de la sección alabeada se compone por lados verticales mayores a los lados horizontales. Ambos van decreciendo en dimensiones hacia sotavento.

De manera complementaria, V2 incorpora un tratamiento trasero no simétrico. El remate posterior superior se resuelve mediante una superficie declinada, asociada a la hipótesis de controlar la descarga del flujo procedente del techo. La pendiente del techo tiene un declive hacia sotavento de 1° y en el tramo final de 20 cm se inclina un grado más, teniéndose una pendiente de descarga de 2° relativos al eje horizontal. El remate posterior inferior adopta una transición redondeada, orientada a acompañar el flujo inferior al abandonar el módulo y a evitar una discontinuidad geométrica brusca en la zona de salida.

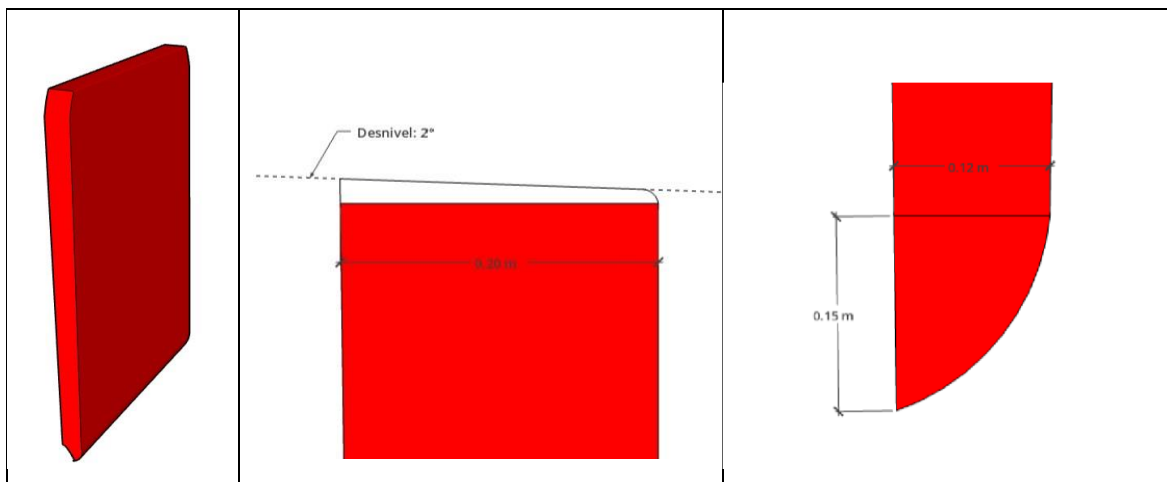


Figura 5.15: Esquema de conformación carenado trasero

Finalmente, se incorporan capuchones o tratamientos locales sobre los apoyos. Estas piezas no se presentan como elementos capaces de modificar por sí solos la estela global, sino como recursos de escala local orientados a reducir las zonas de baja velocidad tras los apoyos acompañando al flujo de manera puntual y a mantener coherencia con la estrategia general de continuidad geométrica. Los mismos son con calce externo completo en el perfil. Cuentan con un borde final conformado por una semicircunferencia ($R = 0,07$ m).

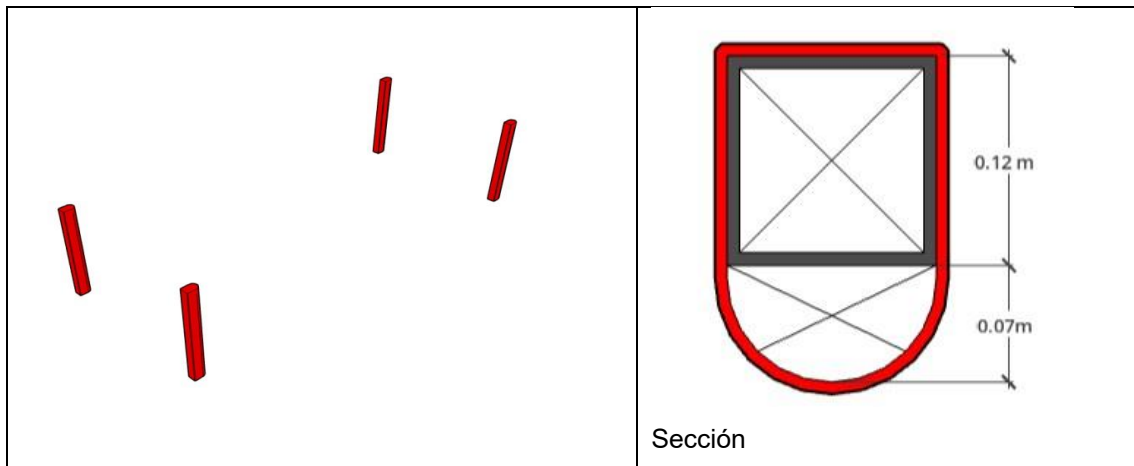


Figura 5.16: Esquema de capuchones en patas.

La incorporación de estas piezas debe interpretarse como una transformación integral de la envolvente. Dado que V2 combina varias modificaciones respecto de V1, no resulta posible atribuir de forma estricta un efecto cuantitativo individual a cada componente.

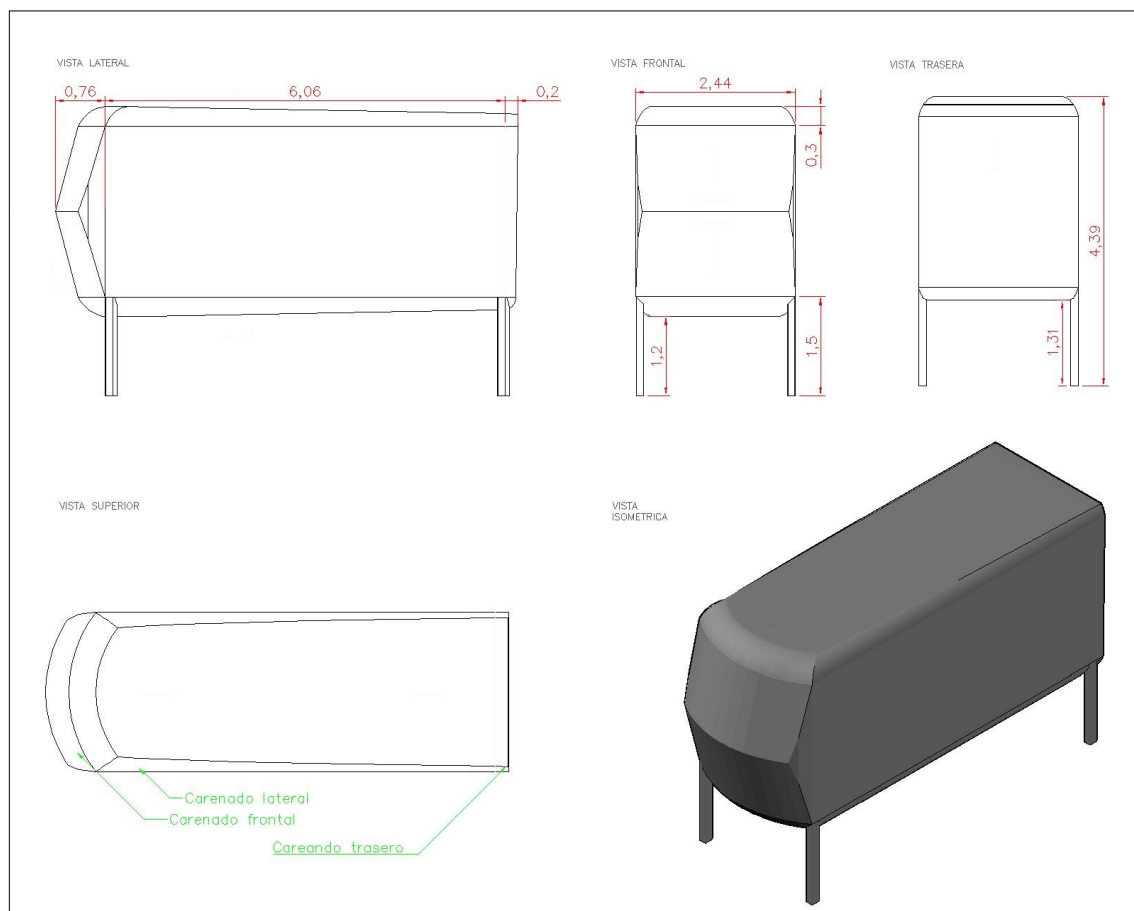


Figura 5.17. Variante V2: primera incorporación de carenados.

Su función se interpreta a partir de la lógica proyectual del conjunto: suavizar la incidencia, conducir el flujo y evitar que la descarga posterior dependa de un remate abrupto.

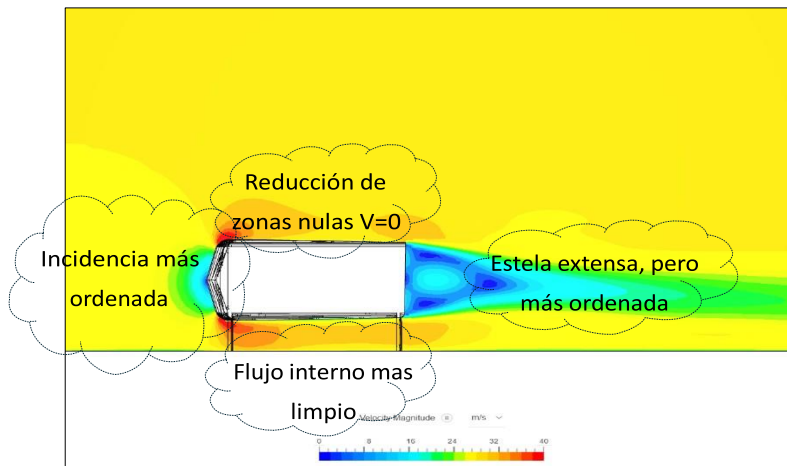


Figura 5.18: Campo de velocidad en V2

En la figura se observa cualitativamente una reducción de zonas problemáticas donde el flujo logra recuperarse con mayor facilidad. Esta lectura exploratoria de V2 permitió, no obstante, reconocer una limitación relevante. El tratamiento posterior presenta un comportamiento condicionado por el sentido principal para el cual fue concebido. Cuando se invierte la dirección del flujo, la zona superior trasera pasa a funcionar como región de incidencia, revelando una sensibilidad direccional asociada a la asimetría de la cola.

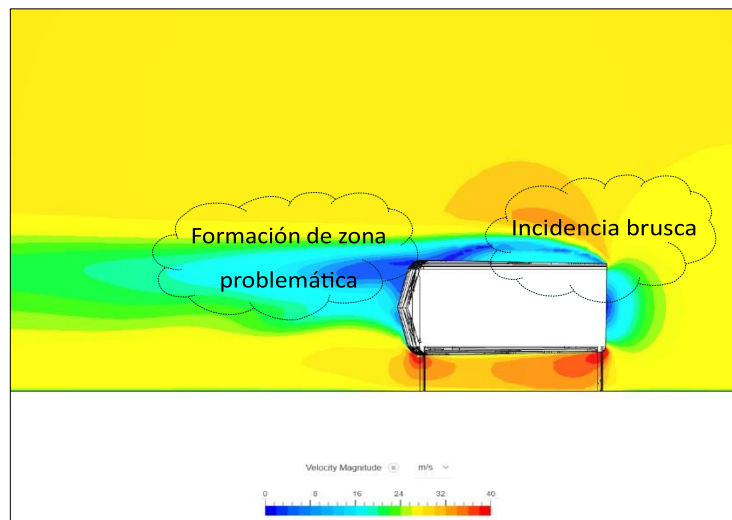


Figura 5.19: Campo de velocidad en sentido inverso – SimScale.

Al someter el módulo a flujo de sentido inverso, se aprecia la incidencia brusca del flujo sobre el borde de ataque superior. Generándose una región de baja velocidad que resulta contraproducente. Así es como surge la necesidad de resolver esta inquietud dando un tratamiento distinto al borde superior que había sido estudiado para la dirección de flujo principal.

5.3.4 V2B – Ajuste local del borde superior trasero

La variante V2B constituye una exploración intermedia dentro del proceso de diseño. No representa una nueva línea geométrica independiente, sino una corrección localizada sobre V2 destinada a verificar si el problema detectado frente a flujo inverso podía resolverse mediante una modificación puntual.

La única transformación introducida consiste en el redondeo local del borde superior trasero. Esta decisión responde a la observación de que, bajo flujo inverso, dicho borde funciona como una zona de incidencia desfavorable debido a la configuración direccional de la cola de V2.

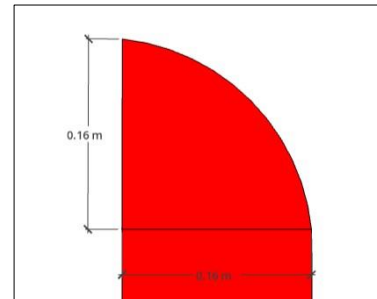


Figura 5.20: Borde superior trasero V2B

La hipótesis asociada a V2B consiste en comprobar si una transición local más suave podía reducir de manera sustancial la perturbación generada en esa condición. La variante se incorpora, por lo tanto, como una instancia de verificación geométrica y no como una propuesta completa de rediseño.

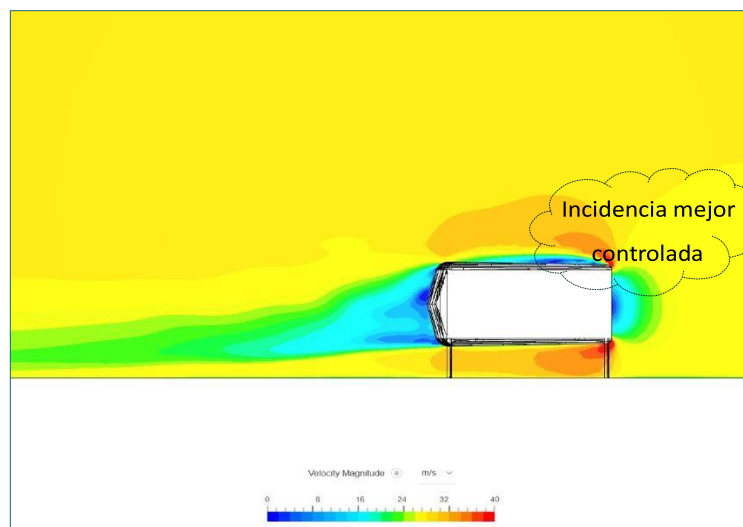


Figura 5.21: Lectura diagnóstica V2B ante flujo inverso - SimScale

La lectura diagnóstica de V2B indica que el ajuste local produce una mejora parcial en la condición que motivó su incorporación. Sin embargo, la modificación no altera de manera suficiente la lógica general de la envolvente posterior. La conclusión del proceso no se refiere a valores cuantitativos específicos, sino a la constatación de que la sensibilidad observada no se concentra exclusivamente en un borde puntual, sino que se vincula con la asimetría global del tratamiento de cola.

5.3.5 V3 – Configuración final con carenado simétrico

La variante V3 surge como respuesta a la constatación de que la limitación identificada en V2 no dependía únicamente de un borde trasero particular. La exploración V2B mostró que una corrección local podía suavizar parcialmente la incidencia en esa zona, pero no modificaba la sensibilidad direccional asociada a una envolvente posterior concebida de manera diferente al frente.

A partir de esta lectura, V3 reemplaza la lógica de cola diferenciada por una configuración simétrica. La transformación principal consiste en replicar en la parte posterior la lógica de carenado aplicada en el frente, generando una envolvente que presenta tratamientos geométricos equivalentes en ambos extremos longitudinales del módulo.

El par de patas a sotavento se rotan de manera tal que las semicircunferencias miran hacia adentro, siendo indistintas al sentido del flujo. Además, los carenados laterales superiores e inferiores ahora son de sección curva con radios de 0,23 m y 0,30 m constantes.

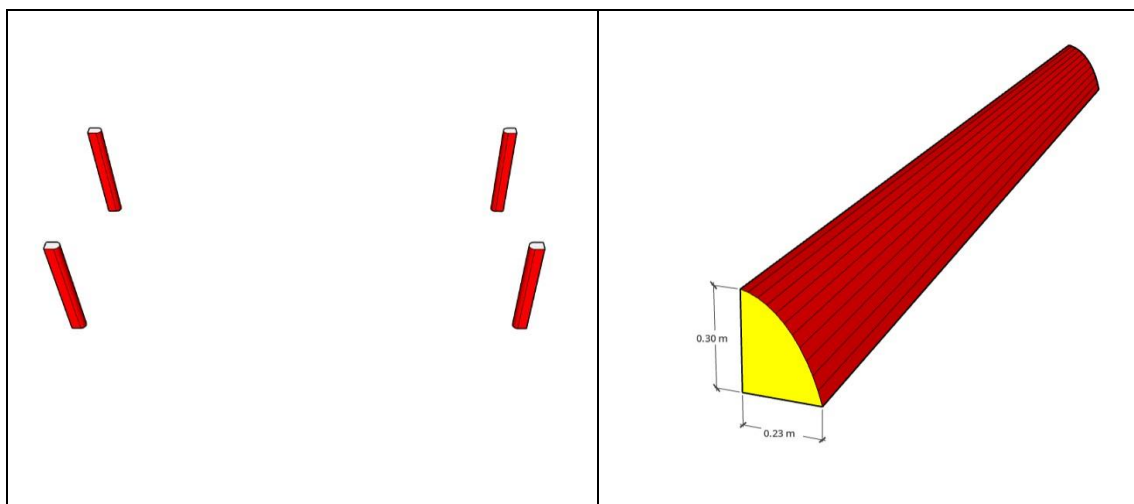


Figura 5.22: Ilustración carenados en patas y laterales de V3

La configuración conserva las decisiones incorporadas en las etapas anteriores: elevación respecto del suelo, ventilación inferior, apoyos tratados localmente y continuidad lateral superior e inferior. La modificación se concentra en la manera en que el flujo abandona o incide sobre los extremos longitudinales de la envolvente.

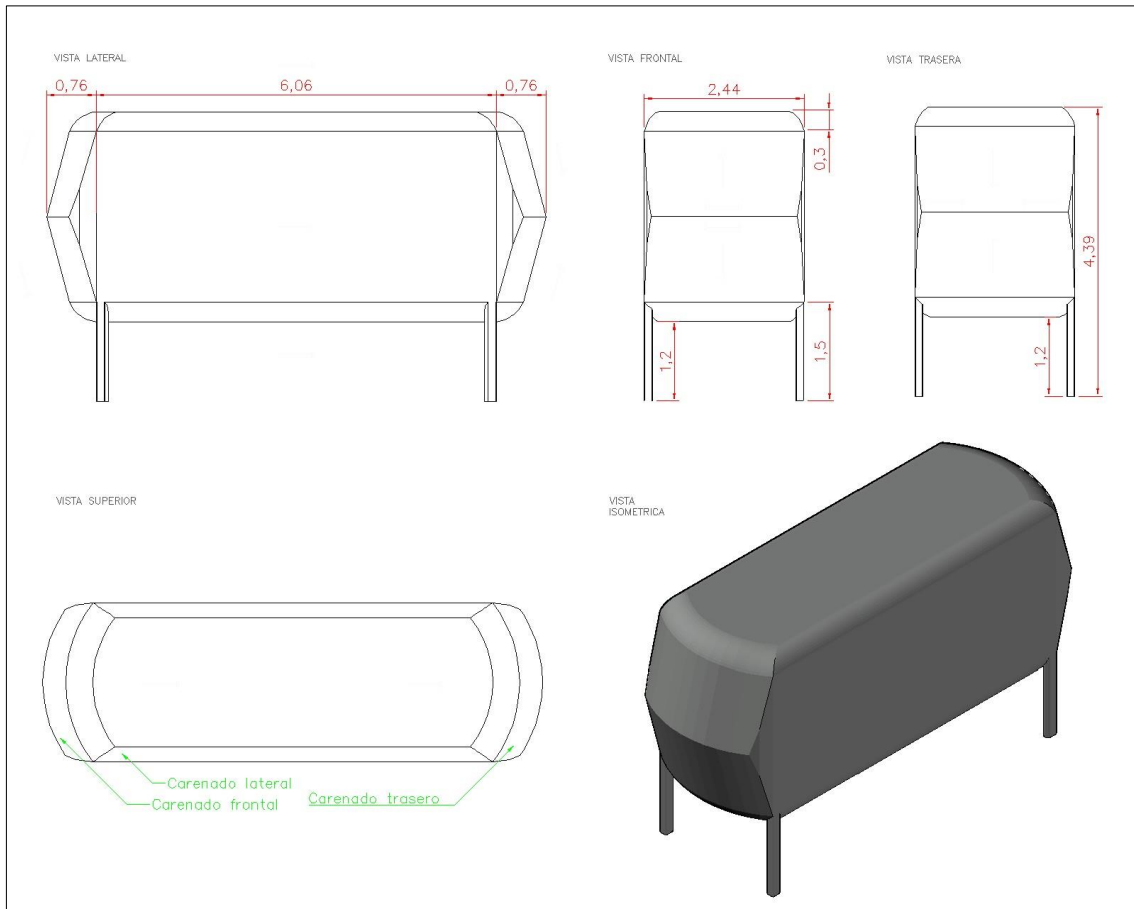


Figura 5.23: Variante V3: Simetrización del conjunto.

La hipótesis de mejora asociada a V3 consiste en reducir la sensibilidad respecto del sentido de incidencia del viento y evitar que una geometría favorable para una dirección determinada se convierta en una condición desfavorable cuando el flujo se invierte. La simetría no se incorpora como un recurso formal autónomo, sino como una respuesta técnica a la necesidad de construir una envolvente menos dependiente de una única dirección de incidencia.

V3 constituye el cierre de la secuencia de desarrollo geométrico. Su adopción como configuración de síntesis dentro de esta etapa responde a la integración de los aprendizajes obtenidos en las variantes precedentes. La justificación comparativa de su desempeño relativo frente al conjunto de casos analizados se desarrolla posteriormente en el Capítulo 7.

6. Metodología de evaluación

6.1 Enfoque metodológico general

La metodología adoptada en esta tesina se plantea como una evaluación comparativa de variantes geométricas mediante simulación numérica CFD. El objetivo no es reproducir de manera explícita el transporte, erosión o deposición de nieve, sino analizar cómo distintas configuraciones del módulo modifican el campo de flujo alrededor de la geometría y, a partir de ello, inferir su mayor o menor predisposición aerodinámica a generar condiciones favorables para la acumulación de nieve.

La simulación directa del fenómeno nieve–viento requeriría incorporar un modelo multifásico, propiedades físicas de las partículas, criterios de erosión y deposición, actualización de la superficie acumulada y validación experimental o de campo. Esta tesina se centra en una etapa preliminar de diseño geométrico, se adopta una estrategia indirecta basada en indicadores aerodinámicos – *proxies*– que permiten comparar variantes bajo condiciones controladas y homogéneas.

El procedimiento metodológico se organiza en una secuencia de trabajo progresiva. En primer lugar, se definieron las variantes geométricas del módulo a partir de una condición base y de sucesivas transformaciones orientadas a mejorar su interacción con el flujo. Luego, dichas variantes fueron modeladas digitalmente y llevadas a un entorno de simulación CFD, manteniendo criterios equivalentes de dominio, condiciones de borde, velocidad de ingreso y postproceso. Los resultados fueron analizados mediante visualizaciones de campos de velocidad, presión, energía cinética turbulenta y esfuerzo cortante, junto con la extracción de indicadores numéricos comparables. En este marco, la metodología permite comparar el desempeño relativo de las cinco variantes bajo una misma lógica de análisis.

La comparación entre variantes se apoya en dos niveles complementarios de análisis. El primero es cualitativo y se basa en la lectura de campos de flujo, cortes e isovolúmenes, con el objetivo de reconocer la forma, extensión y organización de la estela generada por cada configuración. El segundo es cuantitativo y se basa en la extracción de *proxies* numéricos, tales como coeficiente de arrastre, longitud de recirculación, presión media a sotavento, energía cinética turbulenta, esfuerzo cortante sobre el suelo y caudal de aire bajo el módulo. Tan es así que la decisión sobre la conveniencia relativa de una variante depende de la convergencia entre indicadores visuales y numéricos.

Debe remarcarse que, la metodología no predice espesores de nieve ni patrones definitivos de deposición, sino que permite evaluar si una transformación geométrica mejora o empeora las condiciones de flujo asociadas al fenómeno que se busca mitigar.

6.2 Configuración CFD

Las variantes geométricas fueron evaluadas mediante **simulación numérica CFD en la plataforma SimScale**, utilizando el análisis incompresible basado en OpenFOAM. Se adoptó un enfoque estacionario y monofásico, considerando únicamente el flujo de aire alrededor del módulo. Por lo tanto, no se incorporó transporte explícito de nieve, partículas sólidas ni actualización de superficie por erosión o deposición.

El modelo utilizado corresponde a una formulación **RANS**, es decir, un enfoque promediado en el tiempo para la resolución del flujo turbulento. Dentro de este esquema se empleó el **modelo de turbulencia k- ω SST**, seleccionado por su uso extendido en problemas de flujo externo con separación, recirculación y desarrollo de estelas. Esta elección resulta coherente con el objetivo del trabajo, orientado a comparar de manera relativa el comportamiento aerodinámico de distintas variantes geométricas.

Desde el punto de vista físico, la simulación se basa en la resolución numérica de las ecuaciones de conservación que gobiernan el movimiento del fluido.

Para el caso de aire incompresible, el problema se representa mediante la conservación de masa y cantidad de movimiento, asociadas a las ecuaciones de Navier–Stokes. Dado que el flujo alrededor del módulo presenta separación, recirculación y desarrollo de estela turbulenta, no se resolvieron las fluctuaciones instantáneas del flujo, sino sus valores medios mediante un enfoque RANS.

Segunda ley del movimiento de Newton

Figura 6.1: Ecuación de momento de Navier-Stokes: Fluido Incompresible y viscosidad constante.

El modelo de turbulencia k- ω SST, actúa como cierre del problema turbulento, permitiendo estimar el efecto de las fluctuaciones sobre el campo medio de velocidades y presiones.

El fluido se definió como aire con propiedades constantes, sin considerar variaciones térmicas. Se adoptó una densidad de $\rho = 1,226 \text{ kg/m}^3$ y un modelo de viscosidad newtoniano con viscosidad cinemática $\nu = 1,5295 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. Estas propiedades se mantuvieron constantes en todos los casos, de modo que las diferencias observadas entre simulaciones respondieran principalmente a la geometría evaluada y no a cambios en las condiciones físicas del fluido.

Todas las variantes fueron simuladas como modelos tridimensionales completos. Esta decisión permite capturar posibles asimetrías en la estela y en la distribución lateral del flujo, especialmente relevantes para analizar zonas de baja velocidad, recirculación y barrido próximo

al suelo. Las geometrías consideradas fueron V0, V1, V2, V2B y V3, siguiendo la secuencia de evolución definida previamente en el capítulo de diseño.

El proceso de preparación geométrica se realizó a partir de modelos desarrollados en **SketchUp**, exportados en formato STL y posteriormente procesados en **FreeCAD** para generar archivos STEP. Estos modelos fueron importados en **SimScale** para la configuración de las simulaciones. Finalmente, los resultados fueron exportados para su posterior análisis y extracción de datos en **ParaView**.

El dominio computacional se definió como una caja de flujo alrededor del módulo, con espacio libre suficiente a barlovento, sotavento, laterales y parte superior. Dado que las variantes presentan distintas alturas y envolventes, las distancias libres respecto de la geometría no son exactamente iguales en todos los casos. Sin embargo, se mantuvo un criterio equivalente de ubicación y escala del dominio, centrando el módulo según su centroide en el origen del sistema de coordenadas. El nivel del suelo se ubicó en función de la altura de cada variante, de manera que V0 quedara apoyada directamente sobre la superficie y las variantes elevadas conservaran sus patas de 1,50 m.

Como referencia, para la variante V3 se utilizó un dominio de 100 m de longitud en dirección X, 24 m de ancho en dirección Y y 14 m de altura en dirección Z. Esta configuración permitió disponer de una longitud mayor a sotavento que a barlovento, con el objetivo de capturar adecuadamente el desarrollo de la estela detrás del módulo. Si bien las distancias libres varían entre variantes por las diferencias geométricas, el criterio general de dominio se mantuvo equivalente para permitir una comparación consistente.

Tabla 6.1: Condiciones de borde de las simulaciones numéricas.

Superficie del dominio	Condición asignada	Criterio
Entrada	Velocity inlet: 30 m/s - Velocidad de ingreso	Representar el viento incidente
Salida	Pressure outlet: 0 Pa – Presion salida	Permitir la descarga del flujo aguas abajo
Suelo	No slip wall – Sin deslizamiento	Representar la interacción del aire con el terreno
Superficie del módulo	No slip wall – Sin deslizamiento	Representar el obstáculo sólido
Laterales	Slip – Con deslizamiento	Reducir la interferencia artificial de los límites laterales
Techo del dominio	Slip – Con deslizamiento	Evitar bloqueo artificial en la parte superior del dominio

La condición principal de ingreso correspondió a una velocidad de 30 m/s en dirección +X. Esta configuración constituye el caso base de comparación entre variantes. Además, se desarrollaron casos complementarios de sensibilidad, que se detallan en el apartado siguiente, sin modificar la lógica general de configuración CFD.

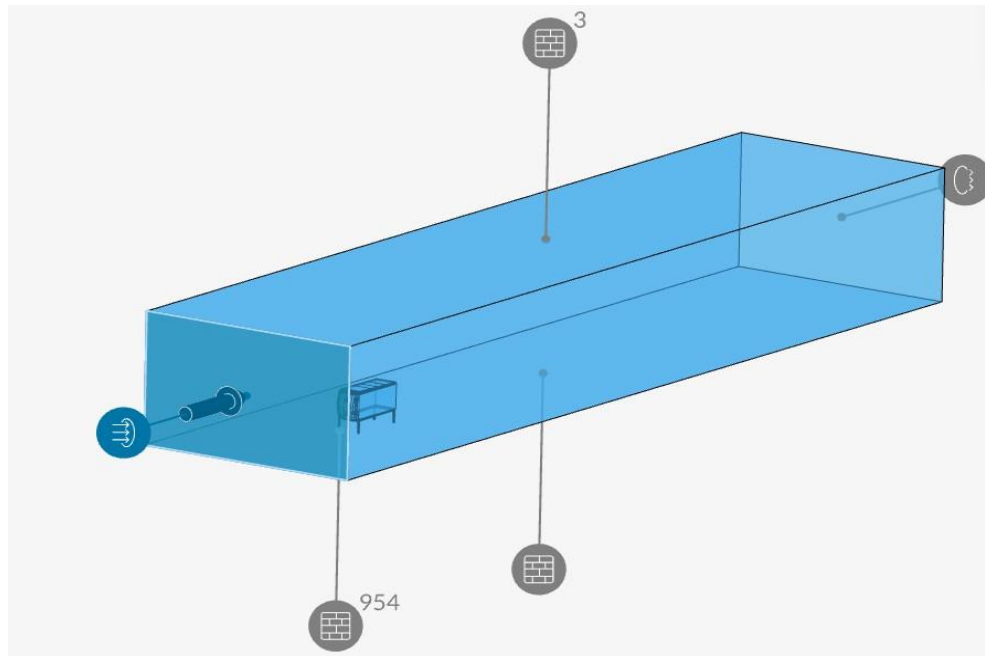


Figura 6.2: Captura de pantalla software SimScale – Caja tunel de viento

El **mallado** se realizó mediante una malla **hex-dominant**: predominantemente hexaédrica. Para mejorar la resolución en las zonas de mayor interés aerodinámico, se incorporaron regiones de refinamiento locales. Alrededor del módulo se utilizó una caja de refinamiento con tamaño máximo de elemento de 0,50 m, mientras que en la zona de estela se empleó una segunda caja de refinamiento con tamaño máximo de elemento de 0,20 m. Esta decisión buscó capturar con mayor precisión la separación del flujo, la región de recirculación y la recuperación aguas abajo del módulo.

Además, se incorporaron **capas de inflación sobre el suelo y sobre la superficie del módulo**, con el objetivo de mejorar la representación del gradiente de velocidad próximo a las paredes. Sobre el suelo se utilizaron 6 capas, con espesor de 0,03 m y razón de expansión de 1,25. Sobre el módulo se aplicaron 8 capas, con espesor de 0,02 m y razón de expansión de 1,25. Este tratamiento resulta importante porque varios indicadores de interés dependen del comportamiento del flujo próximo a superficies sólidas, especialmente el esfuerzo cortante sobre el suelo y la circulación bajo el módulo.

Como verificación complementaria de la resolución próxima a pared, se evaluó la distribución del parámetro adimensional y^+ para la variante final V3 bajo la condición principal de 30 m/s. La comprobación se realizó tanto sobre la superficie del módulo como sobre las regiones del suelo utilizadas posteriormente para la extracción de los esfuerzos cortantes. En el módulo, el 83,2 %

del área presentó valores comprendidos entre $30 \leq y^+ \leq 300$, mientras que las regiones de evaluación del suelo mostraron una correspondencia aún mayor con dicho intervalo: 100 % en la zona a sotavento y 99,4 % bajo el módulo. Los resultados indican una adecuada correspondencia del mallado próximo a pared con el rango considerado para el tratamiento mediante funciones de pared en las regiones directamente vinculadas con los proxies de esfuerzo cortante. La comprobación se realizó sobre V3 como caso representativo de la configuración final y no constituye una verificación individual de todas las variantes.

Tabla 6.2. Distribución superficial de y^+ para V3 y regiones de evaluación del suelo.

Región	$y^+ < 30$	$30 \leq y^+ \leq 300$	$y^+ > 300$
Módulo V3	5,6 %	83,2 %	11,2 %
Suelo a sotavento — Caja C	0,0 %	100,0 %	0,0 %
Suelo bajo módulo — Caja D	0,0 %	99,4 %	0,6 %

Fuente: elaboración propia a partir del postproceso CFD en ParaView.

El criterio de **mallado** se mantuvo **constante** entre variantes. La cantidad total de celdas varió levemente en función de la complejidad geométrica de cada modelo, con aproximadamente 1,3 millones de celdas para V0 y 1,6 millones de celdas para las variantes elevadas y carenadas. Esta diferencia se considera esperable debido a la mayor cantidad de superficies, patas y carenados presentes en las geometrías modificadas.

En cuanto a la **configuración numérica**, se mantuvieron los mismos parámetros principales en todos los casos. Se utilizaron **controles de residuales** de 1×10^{-6} para velocidad, presión, energía cinética turbulenta y tasa específica de disipación. Asimismo, se adoptaron **factores de relajación** de 0,61 para velocidad y 0,30 para presión, junto con 3 correctores no ortogonales. La fuerza aerodinámica utilizada posteriormente para el cálculo de coeficientes se obtuvo a partir del tramo estabilizado de la simulación, tomando el 10% final de los valores exportados.

En síntesis, la configuración CFD fue definida con un criterio de comparación relativa entre variantes. El objetivo no fue obtener una validación absoluta del fenómeno nieve-viento, sino construir un entorno numérico homogéneo para observar cómo la modificación geométrica del módulo altera el campo de flujo, la estela y las condiciones próximas al suelo. Por ello, se mantuvieron constantes el tipo de análisis, las propiedades del fluido, las condiciones de borde, el modelo de turbulencia, los parámetros numéricos y el criterio de mallado en todos los casos comparables.

6.3 Casos analizados

Los casos analizados se organizaron en tres grupos. La comparación principal incluyó las variantes V0, V1, V2, V2B y V3 con velocidad de 30 m/s, dirección +X e incidencia normal, manteniendo condiciones homogéneas para evaluar la evolución geométrica. Además, se analizaron V2 y V2B con flujo inverso a 30 m/s para verificar la sensibilidad de la cola y el efecto del redondeo introducido en V2B. Finalmente, se incorporaron tres casos de sensibilidad sobre V3: 8 m/s y 50 m/s con incidencia normal, y 30 m/s con incidencia oblicua de 15°.

La velocidad de 30 m/s se adoptó como condición severa de comparación aerodinámica. No representa una condición media frecuente en Marambio, sino un escenario exigente y controlado para comparar el comportamiento relativo de las variantes.

El caso de 8 m/s, próximo a la mediana de 7,78 m/s obtenida para la serie 2016–2025, permite evaluar la respuesta de V3 bajo una condición de viento más habitual y con menor capacidad de barrido. Su incorporación no busca identificar una velocidad crítica de deposición de nieve.

El caso de 50 m/s se utiliza exclusivamente como sensibilidad frente al aumento de velocidad, con el objetivo de verificar si la organización aerodinámica de V3 se mantiene ante una condición más exigente.

Finalmente, la incidencia oblicua de 15° permite incorporar una primera evaluación de sensibilidad angular de V3, sin pretender representar la totalidad de direcciones observadas en la rosa de los vientos.

Tabla 6.3: Grupos de análisis realizados por CFD

Grupo	Variantes	Velocidad	Dirección	Ángulo	Finalidad
Comparación principal	V0, V1, V2, V2B, V3	30 m/s	+X	0°	Comparar la evolución geométrica completa
Flujo inverso	V2, V2B	30 m/s	-X	0°	Evaluar sensibilidad de la cola direccional y del ajuste V2B
Sensibilidad: Velocidad	V3	8 m/s	+X	0°	Evaluar la respuesta de V3 bajo una condición de viento próxima a valores habituales del sitio
Sensibilidad: Velocidad	V3	50 m/s	+X	0°	Verificar respuesta de la propuesta final ante mayor sollicitación
Sensibilidad: Incidencia oblicua	V3	30 m/s	+X	15°	Evaluar comportamiento de V3 con viento no alineado

La simetría longitudinal de V3 permite prever un comportamiento geoméricamente equivalente ante una inversión completa del flujo. No obstante, dicha condición no fue incorporada como un caso numérico independiente, por lo que la evaluación direccional de la variante final queda limitada a la incidencia normal en +X y a la sensibilidad oblicua de 15°.

6.4 Variables e indicadores de desempeño:

La comparación entre variantes se realiza mediante un conjunto de indicadores aerodinámicos indirectos (*proxy*), definidos con el objetivo de caracterizar la respuesta del flujo alrededor del módulo. Estos permiten observar tres dimensiones complementarias del problema: *Desempeño aerodinámico global*, *Calidad de estela* y *Barrido / Circulación bajo el módulo*.

Para obtener los indicadores numéricos se definieron **regiones de evaluación** específicas durante el postproceso. Estas regiones mantuvieron un mismo criterio geométrico entre variantes, aunque su posición se ajustó según las dimensiones de cada configuración. De esta manera, las mediciones se realizaron siempre en zonas equivalentes respecto del módulo y de su estela.

La Tabla 6.4 resume qué variable se obtuvo en cada región y el criterio general utilizado para su cálculo. Las dimensiones y posiciones adoptadas para las cajas, superficies y planos de control, junto con el procedimiento de extracción se detallan en el **Anexo B**.

Tabla 6.4. Variables e indicadores de desempeño adoptados.

Dimensión	Indicador	Símbolo	Región de evaluación	Unidad	Criterio de obtención
Desempeño global	<i>Coefficiente de arrastre</i>	Cd	Módulo completo	-	A partir de fuerza longitudinal, presión dinámica y área de referencia: $C_d = \frac{F_x}{0.5\rho U^2 A_{ref}}$
Estela	<i>Longitud de recirculación</i>	Lr	Sotavento	m	Extensión de región con velocidad longitudinal reversa
	<i>Presión media</i>	$\bar{p}$	Caja de control a sotavento	Pa	Promedio espacial
	<i>Energía cinética turbulenta media</i>	$\bar{k}$	Caja de control a sotavento	m²/s²	Promedio espacial
Barrido superficial	<i>Esfuerzo cortante a sotavento</i>	$\bar{\tau}_{sot}$	Suelo a sotavento	Pa	Magnitud media sobre superficie
Barrido inferior	<i>Esfuerzo cortante bajo módulo</i>	$\bar{\tau}_{bajo}$	Suelo bajo módulo	Pa	Magnitud media sobre superficie
Ventilación inferior	<i>Caudal bajo módulo</i>	Q	Plano de corte bajo módulo	m³/s	Integral de la componente normal de velocidad

El **coeficiente de arrastre** se incorpora como indicador del comportamiento aerodinámico global del módulo. Se calcula a partir de la fuerza longitudinal ejercida por el flujo sobre la geometría, la presión dinámica y un área de referencia definida para la comparación. En los casos de incidencia normal, esta fuerza longitudinal coincide con la componente principal en la dirección del viento. En cambio, cuando se analiza una condición con incidencia oblicua, la fuerza debe interpretarse como la componente proyectada en la dirección del flujo incidente. De esta forma, el coeficiente permite comparar la resistencia aerodinámica general de las variantes bajo un criterio común, sin asumir por sí solo una relación directa con la acumulación de nieve.

Además del coeficiente de arrastre de cada caso, se utiliza una forma normalizada respecto de la condición base V0. Esta normalización permite expresar el desempeño relativo de cada variante tomando como referencia el módulo prismático apoyado sobre el terreno. El objetivo de este indicador es facilitar la comparación entre configuraciones geométricas, especialmente cuando se busca evaluar si las transformaciones introducidas modifican la resistencia global del conjunto frente al flujo.

La **longitud máxima de estela de recirculación** se utiliza para caracterizar la extensión de la región ubicada a sotavento donde el flujo presenta inversión de su componente longitudinal respecto de la dirección incidente. Para los casos con viento en dirección +X, esta condición puede identificarse mediante regiones donde la componente U_x adopta valores menores o iguales a cero. Para casos con flujo en sentido opuesto o con incidencia oblicua, el mismo criterio se aplica sobre la componente de velocidad alineada con la dirección principal del viento incidente. De este modo, la recirculación se define por inversión relativa del flujo y no únicamente por el signo de una componente global fija.

La **presión media a sotavento** se obtiene en una caja de control ubicada detrás del módulo. Este indicador permite describir el estado medio del campo de presión en la región posterior a la geometría. En el marco del modelo numérico adoptado, la presión se interpreta respecto de la presión de referencia del dominio, por lo que su lectura debe realizarse en términos comparativos entre variantes. La presión media no describe por sí sola la forma de la estela, pero aporta información sobre el grado de recuperación del campo de presión detrás del obstáculo.

La **energía cinética turbulenta media a sotavento** se incorpora como indicador de la intensidad de fluctuación y mezcla turbulenta en la región posterior al módulo. El parámetro utilizado es la energía cinética turbulenta media, representada como $\bar{k}$ y expresada en m^2/s^2 . No se la equipara con la intensidad turbulenta, ya que esta última constituye una magnitud diferente y no fue adoptada como variable principal de extracción. La energía cinética turbulenta permite complementar la lectura de los campos de velocidad y presión, especialmente para reconocer zonas donde la estela presenta mayor actividad turbulenta.

El **esfuerzo cortante medio sobre el suelo a sotavento** se emplea para caracterizar la interacción del flujo con la superficie en la región posterior al módulo. Este indicador se obtiene a partir de la magnitud del esfuerzo cortante sobre el plano de suelo dentro de una zona de evaluación definida. Su inclusión responde a la necesidad de observar no solo el comportamiento del flujo en el volumen de aire, sino también su efecto próximo a la superficie donde podría producirse deposición o remoción de nieve.

El **esfuerzo cortante medio sobre el suelo bajo el módulo** se define para las variantes elevadas y permite evaluar el comportamiento del flujo en el espacio inferior. Este indicador resulta relevante porque la elevación del módulo busca habilitar circulación bajo la geometría y modificar la relación entre el volumen construido y el plano del terreno. En las configuraciones apoyadas directamente sobre el suelo, este indicador no tiene aplicación directa, ya que no existe un espacio inferior ventilado equivalente.

El **caudal de aire bajo el módulo** se incorpora como indicador de ventilación efectiva en la zona inferior. Se calcula a partir de la integración de la componente normal de la velocidad sobre una sección de control ubicada bajo el módulo. En los casos de incidencia normal, esta sección se define perpendicular a la dirección principal del flujo. En el caso de incidencia oblicua, la sección de control debe acompañar la orientación adoptada para el análisis, de modo que el caudal represente el flujo que atraviesa efectivamente la zona inferior del módulo. Este indicador complementa la lectura del esfuerzo cortante, ya que permite observar no solo la intensidad local de la interacción con el suelo, sino también la cantidad de aire que circula a través del espacio inferior.

En conjunto, los indicadores definidos no buscan describir el fenómeno de acumulación de nieve de manera directa, sino establecer una base metodológica para comparar el comportamiento aerodinámico relativo de las variantes. La interpretación de su conveniencia no se realiza en este apartado de manera aislada, sino mediante los criterios de evaluación desarrollados en el apartado siguiente.

6.5 Criterios de evaluación

La evaluación de las variantes se plantea con un criterio relativo y comparativo. Dado que el modelo numérico adoptado no simula de manera explícita el transporte ni la deposición de nieve, los resultados no deben interpretarse como una predicción directa de acumulaciones, sino como una caracterización aerodinámica de condiciones más o menos favorables para que dichas acumulaciones puedan producirse.

En este sentido, la selección de una variante no surge de un único indicador aislado, sino de la lectura conjunta de los proxies definidos en el apartado anterior y de los campos visuales de flujo. Cada variable aporta información sobre una dimensión particular del comportamiento aerodinámico: resistencia global del módulo, extensión y calidad de la estela, recuperación del

flujo a sotavento, barrido superficial y ventilación bajo el módulo. Por lo tanto, una variante se considera más favorable cuando presenta una combinación coherente de mejoras en esos aspectos, y no necesariamente cuando obtiene el mejor valor individual en todos los indicadores.

Tabla 6.5. Criterios de evaluación adoptados para cada indicador.

Dimensión	Indicadores	Tendencia favorable	Advertencia
Desempeño global	C_d , F_x	Menor resistencia global	No define por sí solo la acumulación de nieve
Calidad de estela	L_r , $\bar{p}$, k , campos de velocidad	Estela más corta, menos compacta, mejor recuperación	k no debe leerse aisladamente
Barrido y ventilación	$\bar{r}_{\text{sot}}$, $\bar{r}_{\text{bajo}}$, Q	Mayor barrido superficial y circulación inferior	Valores medios pueden ocultar distribuciones locales

El **coeficiente de arrastre** se interpreta como un indicador del desempeño aerodinámico global del módulo. En términos generales, un menor coeficiente de arrastre representa una menor resistencia al flujo para el área de referencia adoptada y, por lo tanto, una condición aerodinámica global más eficiente. Sin embargo, este indicador no se considera suficiente para evaluar por sí solo la predisposición a la acumulación de nieve, ya que una geometría puede presentar bajo arrastre y, al mismo tiempo, generar zonas locales de baja velocidad o recirculación desfavorables a sotavento. Por este motivo, el coeficiente de arrastre se utiliza como criterio complementario dentro de una lectura más amplia.

El coeficiente de arrastre normalizado respecto de V_0 permite evaluar la mejora o penalización relativa de cada variante frente a la condición base. Valores menores que la unidad indican una reducción del arrastre respecto del módulo prismático apoyado sobre el suelo, mientras que valores cercanos o superiores a la unidad indican que la transformación geométrica no reduce la resistencia global. Su utilidad principal es comparar de manera directa el efecto relativo de las modificaciones introducidas, manteniendo a V_0 como referencia inicial del proceso.

La **fuerza longitudinal** ejercida por el viento sobre el módulo se interpreta en relación con el sentido del flujo incidente. Para los casos de incidencia normal, esta fuerza coincide con la componente principal del eje de análisis; para casos con flujo inverso u oblicuo, debe considerarse la componente alineada con la dirección del viento. En términos comparativos, una menor magnitud de fuerza longitudinal se considera más favorable desde el punto de vista aerodinámico global. No obstante, al igual que el coeficiente de arrastre, este indicador no

define por sí solo el comportamiento frente a la acumulación de nieve, sino que permite complementar la evaluación general de la geometría.

La **longitud máxima de recirculación** constituye uno de los indicadores más directamente vinculados con la calidad de la estela a sotavento. Se considera más favorable una menor extensión de la región donde el flujo presenta inversión de su componente longitudinal respecto del viento incidente. Una recirculación más corta indica que la perturbación generada por el módulo se recompone en una distancia menor, reduciendo la extensión de zonas con flujo reverso o muy debilitado. Por el contrario, una recirculación extensa puede asociarse a una estela persistente y a condiciones más propensas al estancamiento del flujo.

La **presión media a sotavento** se utiliza como indicador de recuperación del campo de presión detrás del módulo. Dentro del sistema de referencia adoptado en el modelo, una presión media menos deprimida respecto de la presión de referencia se interpreta como una recuperación más favorable del flujo en la región posterior. En cambio, valores muy negativos indican una zona de baja presión más intensa, generalmente asociada a separación, recirculación y pérdida de cantidad de movimiento. Este criterio debe aplicarse de manera comparativa entre variantes y siempre en conjunto con los campos de velocidad y la longitud de recirculación.

La **energía cinética turbulenta media a sotavento** requiere una interpretación particularmente cuidadosa. Un valor mayor de $\bar{k}$ no es automáticamente favorable ni desfavorable. La turbulencia puede indicar mezcla y recomposición del flujo, pero también puede formar parte de una estela intensa, desordenada y persistente. Por este motivo, este indicador no se utiliza como criterio de jerarquización aislado. Se considera menos favorable cuando aparece asociado a zonas extensas de baja velocidad, recirculación prolongada y recuperación deficiente del flujo. En cambio, una turbulencia localizada, acompañada por una estela corta y una recuperación adecuada, puede ser compatible con un comportamiento aerodinámico aceptable.

El **esfuerzo cortante medio sobre el suelo a sotavento** se interpreta como un indicador indirecto de capacidad de barrido superficial. En términos comparativos, valores mayores pueden asociarse a una mayor interacción del flujo con el terreno y, por lo tanto, a una mayor capacidad relativa para evitar zonas de estancamiento próximas al suelo. Sin embargo, este criterio debe analizarse junto con la distribución espacial del campo de velocidades, ya que un valor medio puede ocultar zonas localizadas de bajo esfuerzo cortante. Por lo tanto, se considera más favorable una combinación de mayor esfuerzo cortante medio y ausencia de áreas extensas de baja velocidad próximas al terreno.

El **esfuerzo cortante medio bajo el módulo** permite evaluar la efectividad de la elevación respecto del suelo. En las variantes elevadas, valores mayores pueden indicar que el flujo mantiene una interacción más activa con el terreno bajo el volumen, favoreciendo el barrido

inferior. Este indicador no aplica de manera directa a la condición V0, ya que el módulo se encuentra apoyado sobre el suelo y no existe una zona inferior ventilada comparable. Su interpretación debe realizarse en conjunto con el caudal bajo módulo, ya que el esfuerzo cortante describe la acción local sobre la superficie, mientras que el caudal permite caracterizar la circulación global en el espacio inferior.

El **caudal de aire bajo el módulo** se considera un indicador de ventilación inferior efectiva. En términos comparativos, un mayor caudal indica que una mayor cantidad de aire atraviesa la zona inferior del módulo, lo que puede contribuir a reducir regiones protegidas, lentas o estancas bajo la geometría. Este indicador resulta especialmente relevante para evaluar el efecto de la elevación y del carenado inferior. No obstante, su lectura tampoco debe aislarse: un caudal elevado resulta más favorable cuando se combina con una adecuada distribución del esfuerzo cortante y con una estela a sotavento menos persistente.

La lectura cualitativa de los campos de flujo complementa la interpretación numérica de los proxies. Los planos XZ permiten observar el desarrollo longitudinal de la estela, los planos YZ permiten evaluar su organización transversal y los planos XY próximos al suelo permiten reconocer la distribución superficial de zonas de baja velocidad. Esta información visual resulta necesaria porque los valores medios no siempre representan adecuadamente la distribución espacial del fenómeno. Dos variantes pueden presentar valores similares de un indicador y, sin embargo, organizar la perturbación de manera muy distinta en el entorno del módulo.

En consecuencia, una variante se considera más favorable cuando combina menor recirculación, mejor recuperación de presión, ausencia de una estela compacta y persistente, mayor capacidad de barrido superficial y circulación inferior efectiva. En cambio, se considera menos favorable cuando presenta una estela extensa, zonas amplias de baja velocidad próximas al suelo, presión posterior muy deprimida, baja interacción del flujo con el terreno y escasa ventilación bajo el módulo.

La evaluación final debe entenderse dentro del alcance metodológico definido para esta tesina. Los criterios adoptados permiten comparar la predisposición aerodinámica relativa de las variantes, pero no permiten afirmar espesores reales de nieve acumulada ni tiempos de formación de depósitos. Para ello sería necesario incorporar modelos multifásicos de transporte de nieve, variabilidad temporal del viento, propiedades físicas de las partículas y validación experimental o de campo.

6.6 Limitaciones metodológicas

La metodología adoptada permite comparar el comportamiento aerodinámico relativo de las variantes bajo condiciones controladas de simulación. Sin embargo, los resultados deben interpretarse dentro de los alcances y simplificaciones del modelo utilizado.

Tabla 6.6. Limitaciones metodológicas del análisis

Tipo de limitación	Alcance
Física del modelo	CFD monofásico, sin partículas ni deposición
Régimen de simulación	Análisis estacionario, no evolución temporal
Condiciones de viento	Casos discretos, no rosa de vientos completa
Modelo numérico	Dependencia de malla, turbulencia, condiciones de borde
Postproceso	Proxies y regiones de medición simplifican un fenómeno espacial
Alcance proyectual	No verifica estructura, montaje, fundaciones ni habitabilidad completa

Las limitaciones indicadas no invalidan el análisis, pero delimitan su alcance. Los resultados obtenidos son útiles para comparar variantes geométricas bajo una misma lógica de simulación, identificar tendencias aerodinámicas y seleccionar la configuración con mejor comportamiento relativo.

En este sentido, la metodología no busca predecir espesores reales de nieve ni reproducir la evolución completa del fenómeno en campo. Su valor principal se encuentra en evaluar cómo cada geometría modifica el flujo alrededor del módulo, especialmente en relación con la estela a sotavento, la recirculación, la recuperación de presión, el esfuerzo cortante sobre el suelo y la ventilación inferior.

Por lo tanto, las conclusiones deben entenderse como una evaluación de predisposición aerodinámica relativa y no como una validación definitiva del desempeño real del módulo en condiciones antárticas. Una instancia posterior de desarrollo debería incorporar estudios complementarios, como modelado multifásico de nieve, validación experimental, análisis estructural, evaluación térmica y estudio constructivo/logístico.

7. Resultados y discusión aerodinámica de la propuesta

Este capítulo presenta la lectura integrada de los resultados obtenidos mediante simulación CFD, con el objetivo de evaluar si la evolución geométrica del módulo reduce la predisposición aerodinámica a la acumulación de nieve respecto de la condición base V0. La comparación no se plantea como una competencia entre alternativas finales equivalentes, sino como una verificación progresiva del efecto de las decisiones geométricas adoptadas en el desarrollo.

El análisis consta de tres instancias. Primero, se realiza una lectura cualitativa de los campos de flujo, orientada a reconocer la forma y organización de la estela, la huella próxima al suelo y las zonas de recirculación. Luego, se analizan los proxies numéricos definidos en la metodología, con el fin de contrastar cuantitativamente las tendencias observadas. Finalmente, se sintetiza la evolución geométrica del diseño y se justifica la adopción de V3 como propuesta final, incorporando además una mención a los casos de sensibilidad analizados.

El análisis detallado se incluye en el Anexo A. En este capítulo se prioriza una lectura integrada de los resultados, enfocada en identificar los patrones principales que permiten interpretar la evolución desde la condición base hacia la configuración final.

7.1 Lectura integrada de los campos de flujo

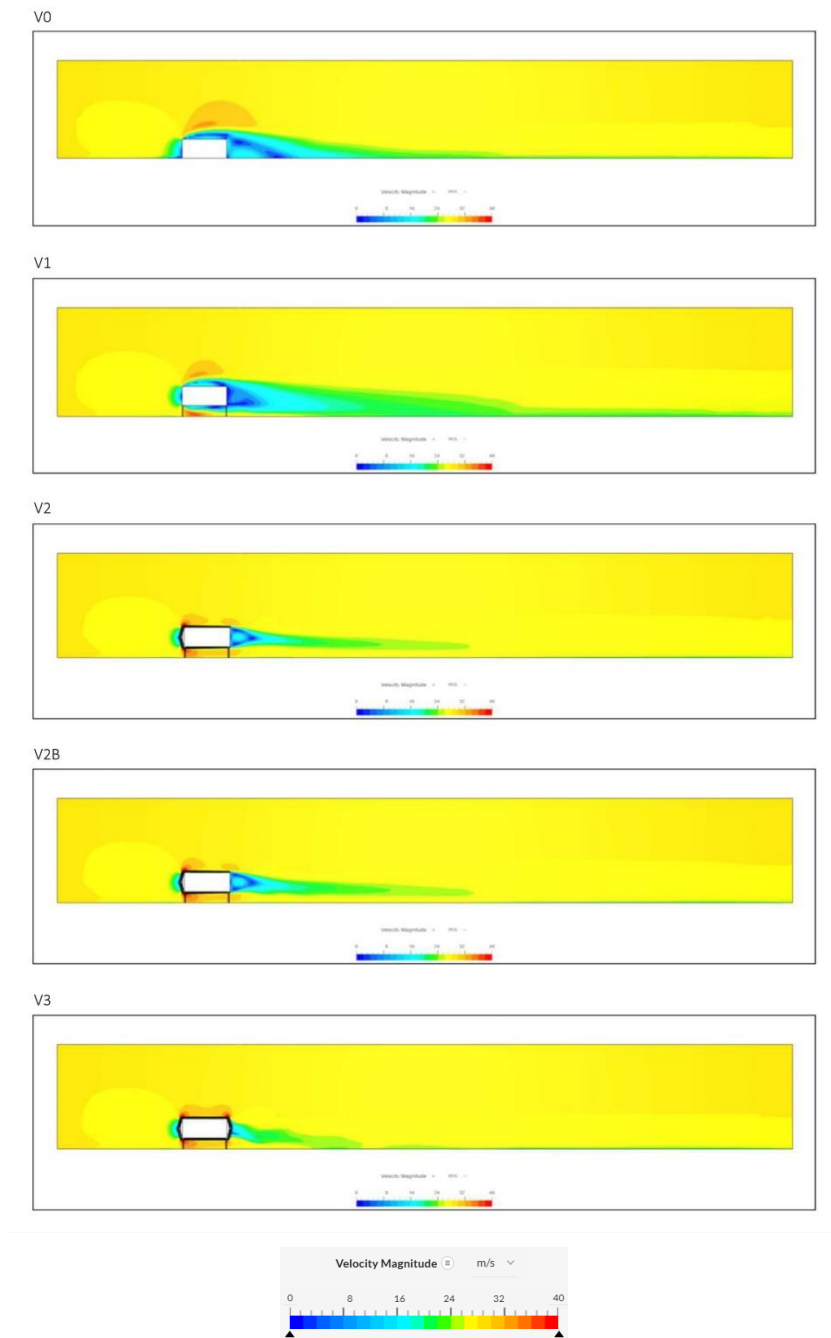
La lectura cualitativa de los campos de flujo se utiliza para reconocer cómo la evolución geométrica modifica la organización de la estela y la interacción del flujo con el entorno próximo al módulo. En este apartado no se desarrolla una descripción exhaustiva de cada variante, ya que ese análisis se incluye en el Anexo A. Aquí se sintetizan los patrones principales observados en los campos de velocidad y recirculación.

El análisis se apoya en tres cortes principales: el plano XZ, que permite observar el desarrollo longitudinal de la estela; el plano YZ, que permite reconocer su organización transversal; y el plano XY, ubicado próximo al suelo, que permite evaluar la huella aerodinámica sobre la zona donde eventualmente podría producirse acumulación de nieve. Como lectura complementaria, se considera la energía cinética turbulenta, sin utilizarla como criterio aislado de desempeño.

7.1.1 Desarrollo longitudinal de la estela

El plano XZ muestra que la transformación más importante respecto de la condición base es la reducción del vínculo directo entre la estela y el suelo. Como se diagnosticó en el capítulo 5, en V0, el módulo apoyado genera una región extensa de baja velocidad a sotavento, fuertemente asociada al terreno. La elevación introducida en V1 modifica esa condición al permitir circulación inferior, reduciendo el anclaje de la perturbación al plano de apoyo.

Figura 7.1. Campo de velocidad: Plano XZ para las variantes V0, V1, V2, V2B y V3.



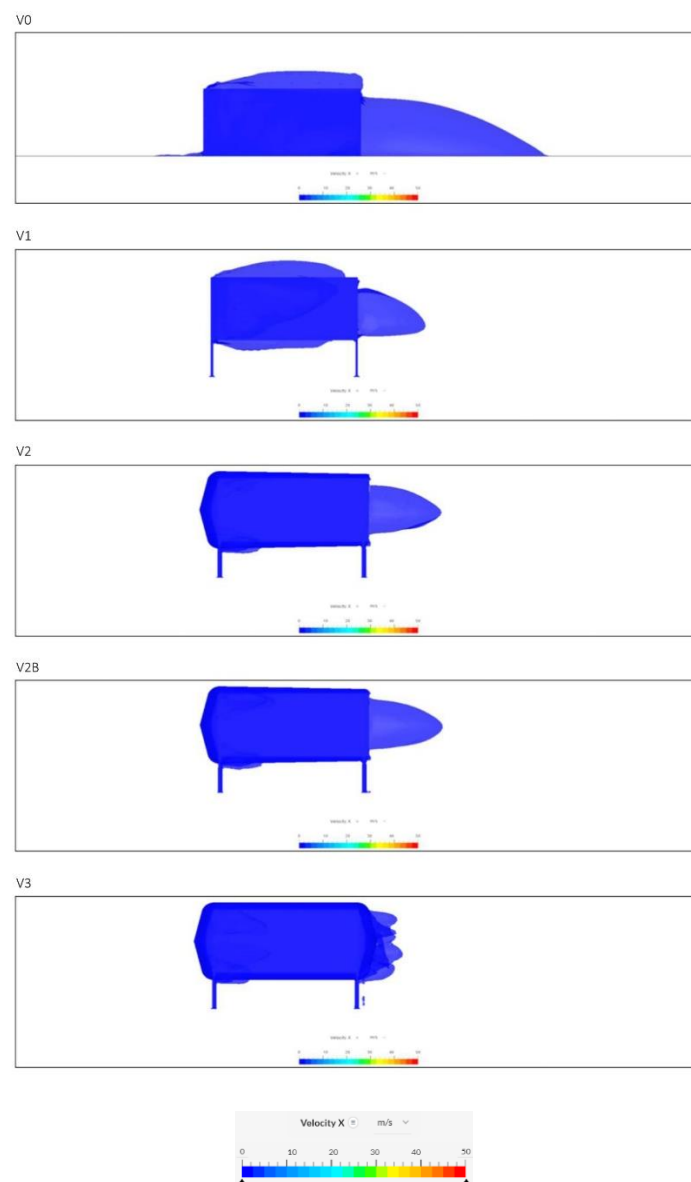
Fuente: CFD | Plano XZ | Velocidad ingreso 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0° | Corte Y = 0 m | Escala 0–40 m/s.

La incorporación de carenados en las variantes posteriores mejora la conducción del flujo alrededor del módulo, pero no todas las modificaciones producen el mismo efecto sobre la estela. V2 y V2B reorganizan el flujo y reducen la brusquedad de incidencia, aunque conservan una zona posterior de baja velocidad relativamente persistente. En V3, en cambio, se observa una recirculación longitudinal más acotada y una recuperación más próxima del flujo a sotavento.

Por lo tanto, la lectura del plano XZ no debe interpretarse como una comparación formal entre alternativas equivalentes, sino como evidencia de una evolución: la geometría pasa de una condición apoyada con estela extensa a una configuración donde la recirculación se reduce y se desacopla en mayor medida del suelo.

La visualización de regiones con velocidad longitudinal negativa refuerza esta lectura. La condición base presenta una región de recirculación extensa, mientras que V3 muestra una zona considerablemente más acotada. Esta diferencia constituye una de las evidencias cualitativas más relevantes del análisis, aunque su interpretación debe completarse con los proxies numéricos del apartado siguiente.

Figura 7.2. Regiones de recirculación: Isovolumen de velocidad longitudinal negativa



CFD | Plano XZ | Vel inlet 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0° | Criterio: $U_x \leq 0$ | Escala de colores: 0 -50 m/s | Corte Y=0

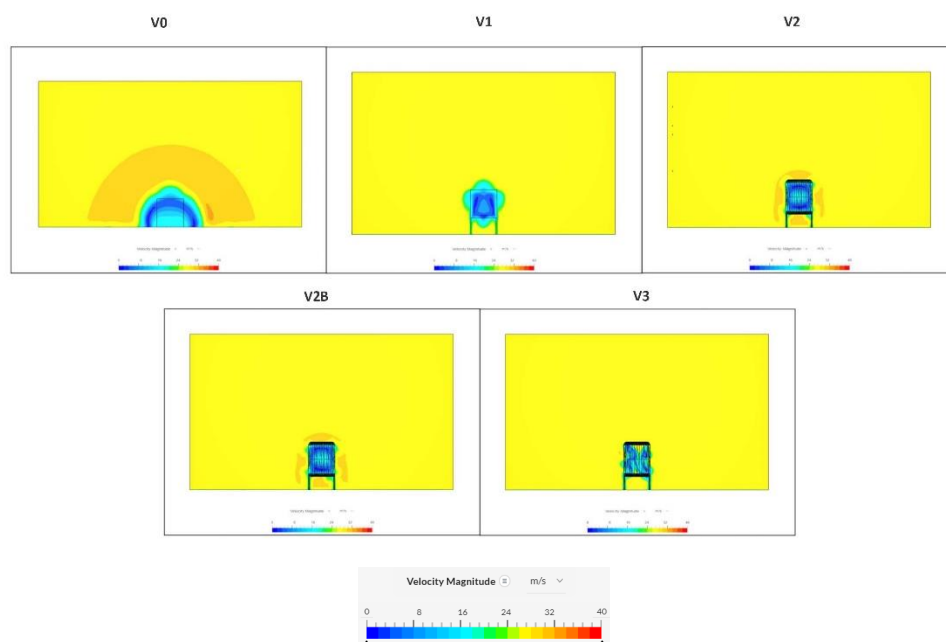
7.1.2 Organización transversal de la estela

El plano YZ permite complementar la lectura longitudinal observando la forma transversal de la estela. El aspecto relevante no es solo cuánto se extiende la perturbación, sino si queda organizada como un núcleo compacto de baja velocidad o si se distribuye de manera menos concentrada.

La evolución geométrica muestra una reducción progresiva de la compacidad de la estela. La condición base genera una perturbación transversal amplia y concentrada. La elevación del módulo introduce ventilación inferior y reduce parcialmente ese carácter masivo. Las variantes carenadas reorganizan el flujo, y V3 presenta una sección de estela menos concentrada en un núcleo único de baja velocidad.

Esta lectura es importante porque una estela compacta y persistente puede favorecer zonas de baja capacidad de barrido a sotavento. En cambio, una estela menos coherente y mejor distribuida representa una condición aerodinámica más favorable dentro del alcance comparativo del modelo.

Figura 7.3. Campo de velocidad: Plano YZ a sotavento para las variantes V0-V1-V2-V2B-V3.



Fuente: CFD | Velocidad ingreso 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0° | Corte X = Xsota + 1 m | Escala 0–40 m/s.

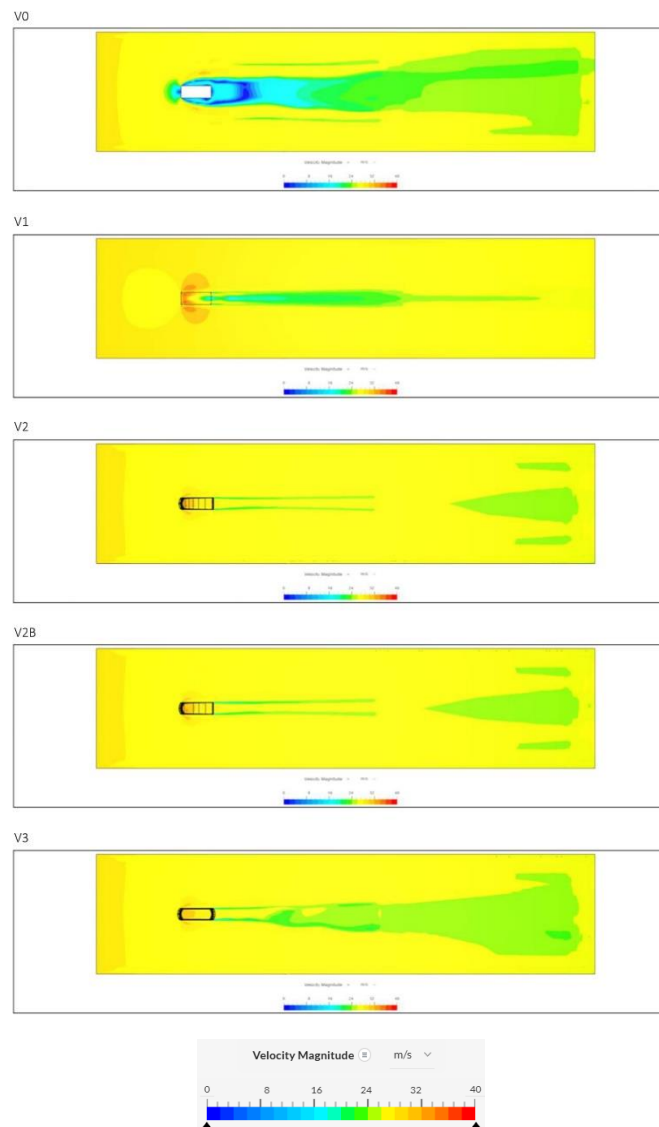
7.1.3 Huella próxima al suelo

El plano XY permite evaluar la distribución de velocidades en una sección próxima al terreno. Esta lectura es necesaria porque el objetivo del trabajo no es únicamente mejorar la estela en el volumen de aire, sino también reducir condiciones desfavorables cerca del plano donde podría producirse acumulación.

En este plano, la mejora no resulta tan absoluta como en los cortes XZ e YZ. La evolución geométrica reduce el bloqueo directo observado en V0 y permite una mejor ventilación asociada a la elevación del módulo, pero no elimina por completo las zonas de baja velocidad próximas al suelo.

Este resultado es importante para formular correctamente la interpretación. La propuesta final no debe presentarse como una geometría que hace desaparecer toda perturbación superficial. Su aporte principal, según la lectura cualitativa, consiste en reducir la extensión de la recirculación, desarticular la compacidad de la estela y mantener circulación inferior. Por ello, el plano XY funciona como una advertencia metodológica: la evaluación debe apoyarse en la lectura integrada de los campos y no en un único corte.

Figura 7.4. Campo de velocidad: Plano XY próximo al suelo para las variantes V0, V1, V2, V2B y V3.



Fuente: CFD | Velocidad ingreso 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0° | Corte Z = 0,15 m | Escala 0–40 m/s.

7.1.4 Energía cinética turbulenta como lectura complementaria

La energía cinética turbulenta permite identificar zonas de mezcla y perturbación del flujo, pero no se utiliza como criterio aislado de selección. Un mayor valor de turbulencia puede indicar una estela más activa y desordenada, aunque también puede formar parte de un proceso de mezcla asociado a la recuperación del flujo.

Por este motivo, la energía cinética turbulenta debe interpretarse junto con los campos de velocidad y las regiones de recirculación. Una zona localizada de mayor turbulencia no tiene el mismo significado que una estela extensa, lenta y apoyada sobre el suelo. En consecuencia, este indicador se utiliza como apoyo cualitativo y no como criterio de jerarquización independiente.

7.1.5 Síntesis cualitativa

La lectura cualitativa muestra que la evolución geométrica modifica favorablemente el comportamiento aerodinámico del módulo respecto de la condición base, aunque no de manera uniforme en todos los planos. El cambio más claro se observa en la reducción de la recirculación longitudinal y en la menor compacidad transversal de la estela. En cambio, la huella próxima al suelo no desaparece completamente, por lo que la mejora debe interpretarse en términos relativos.

Tabla 7.1: Resumen del análisis cualitativo de los campos de flujo.

Lectura evaluada	Resultado principal	Lectura para la evaluación
Plano XZ	Menor extensión longitudinal de la recirculación	Evidencia cualitativa principal de mejora respecto de V0
Isovolumen $U_x \leq 0$	Reducción de la región de flujo reverso	Refuerza la lectura de una estela más acotada
Plano YZ	Estela menos compacta transversalmente	Menor concentración de baja velocidad a sotavento
Plano XY	Persisten zonas de baja velocidad próximas al suelo	La mejora no es absoluta y requiere lectura integrada
Energía cinética turbulenta	Lectura dependiente de ubicación y extensión	No debe usarse como ranking aislado

En conjunto, los campos de flujo permiten identificar una evolución cualitativamente favorable respecto de la condición base: menor recirculación longitudinal, estela menos compacta y mejor organización general del flujo a sotavento. Sin embargo, la persistencia de zonas de baja velocidad próximas al suelo y la necesidad de interpretar conjuntamente los distintos campos hacen necesario contrastar estas observaciones con los proxies numéricos desarrollados en el apartado siguiente.

7.2 Lectura numérica de los indicadores indirectos aerodinámicos

La Tabla 7.2 presenta el resumen de los indicadores indirectos (*proxies*) numéricos obtenidos para las variantes analizadas. Estos resultados no se interpretan como un ranking automático entre configuraciones, sino como una matriz de lectura comparativa que permite evaluar el desempeño relativo de cada etapa geométrica frente al objetivo principal del trabajo: reducir la predisposición aerodinámica a la acumulación de nieve respecto de la condición base V0.

Tabla 7.2. Resumen de proxies aerodinámicos obtenidos para los casos analizados.

Resumen de Proxies													
Caso	Variante	U [m/s]	Sentido	Ángulo	Cd	Cd/CdV0	Fx [N]	Lr [m]	p̄ [Pa]	k̄ [m²/s²]	τ sot [Pa]	τ bajo [Pa]	Q [m³/s]
+30 m/s y 0°	V0	30	+ X	0°	1.00	1.00	3475.6	7.12	-142.89	20.30	0.30	-	-
	V1				1.02	1.02	3709.9	2.63	-29.75	12.63	0.95	1.56	85.45
	V2				0.52	0.52	2289.1	2.79	-52.45	5.76	0.91	1.39	91.53
	V2 B				0.50	0.50	2211.9	2.97	-53.72	5.84	0.88	1.33	90.06
	V3				0.55	0.55	2424.4	0.86	-5.56	12.46	0.92	1.35	87.89
-30 m/s y 0°	V2	30	- X	0°	0.79	0.80	3509.5	0.99	1.64	6.40	0.87	1.51	97.65
	V2 B				0.69	0.69	3058.4	1.01	10.31	9.81	0.92	1.43	96.15
Sensibilidad: +50 m/s y 0°	V3	50	+ X	0°	0.55	0.55	6737.6	1.01	-41.11	35.81	2.41	3.46	148.23
Sensibilidad: +30 m/s y 15°	V3	30	+ X	15°	0.52	0.52	4015.2	1.46	-18.27	10.31	0.86	1.52	92.83
Sensibilidad: +8 m/s y 0°	V3	8	+ X	0°	0.55	0.55	171.3	0.86	-0.65	0.92	0.08	0.12	23.29
Criterio de Interpretación					Menor es mejor		Menor es mejor	Interpretación relativa, no rankear sola	Depende: complementa lectura de estela	Mayor puede indicar mayor barrido	Mayor puede indicar mayor barrido inferior	Mayor indica mayor ventilación inferior	

La lectura de la tabla se organiza en tres dimensiones: desempeño aerodinámico global, calidad de la estela a sotavento, y capacidad de barrido superficial y ventilación inferior. Esta organización permite evitar conclusiones basadas en un único indicador aislado y permite reconocer tanto las mejoras obtenidas como las limitaciones de cada etapa geométrica.

7.2.1 Desempeño aerodinámico global

Desde el punto de vista del arrastre, la evolución geométrica muestra una mejora clara respecto de la condición base. V0 se adopta como referencia, con un coeficiente de arrastre normalizado igual a 1,00. La variante V1, aunque modifica favorablemente la relación entre el módulo y el suelo mediante la elevación, no reduce el arrastre global, ya que mantiene un valor normalizado próximo a la unidad.

La reducción más marcada del arrastre aparece con la incorporación del carenado en V2 y V2B, cuyos coeficientes normalizados descienden a 0,52 y 0,50 respectivamente. V3 presenta un valor levemente mayor, igual a 0,55, por lo que no constituye la variante de menor arrastre

absoluto dentro del conjunto frontal evaluado. Sin embargo, mantiene una reducción aproximada del 45% respecto de V0.

Esta lectura es importante porque evita una conclusión simplificada. Si el criterio de evaluación fuera únicamente minimizar el coeficiente de arrastre, V2B resultaría más favorable que V3. No obstante, el objetivo del trabajo no es solamente reducir la resistencia global al viento, sino analizar condiciones aerodinámicas asociadas a la estela, la recirculación y el comportamiento próximo al suelo. Por este motivo, el arrastre se considera un indicador relevante, pero no suficiente para definir por sí solo el desempeño de la propuesta.

7.2.2 Calidad de la estela a sotavento

Los proxies vinculados con la estela muestran diferencias relevantes entre variantes. La longitud máxima de recirculación se reduce de 7,12 m en V0 a 0,86 m en V3, lo que representa una disminución aproximada del 88%. Esta reducción constituye uno de los resultados numéricos más importantes del conjunto, ya que se vincula directamente con la extensión de la zona de flujo reverso a sotavento.

La presión media en la caja de control posterior también muestra una mejora marcada. En V0 se registra un valor de -142,89 Pa, asociado a una región posterior fuertemente deprimida. En V3, ese valor se aproxima a la presión de referencia del dominio, alcanzando -5,56 Pa. Esta recuperación indica una estela menos deprimida y una recomposición más favorable del flujo a sotavento.

La energía cinética turbulenta media disminuye respecto de la condición base, pasando de 20,30 m²/s² en V0 a 12,46 m²/s² en V3. Este indicador no debe leerse de forma aislada, pero en conjunto con la menor longitud de recirculación y la recuperación de presión refuerza la interpretación de una estela menos persistente que la generada por el módulo apoyado.

En esta dimensión, V3 presenta sus resultados más favorables. Aunque no posee el menor coeficiente de arrastre del conjunto, sí muestra una combinación destacable entre menor recirculación, mejor recuperación de presión y menor energía cinética turbulenta media respecto de V0.

7.2.3 Barrido superficial y ventilación inferior

Los proxies vinculados con el suelo muestran que la elevación del módulo produce una mejora importante respecto de la condición base. En V0, el esfuerzo cortante medio a sotavento es de 0,30 Pa. En las variantes elevadas, este valor aumenta de manera significativa, indicando una mayor interacción del flujo con el terreno en la región posterior.

En V3, el esfuerzo cortante medio a sotavento alcanza 0,92 Pa, valor superior al de V0 y comparable con el de las demás variantes elevadas. Este resultado sugiere una mayor

capacidad relativa de barrido superficial respecto del módulo apoyado, aunque no debe interpretarse como garantía de remoción efectiva de nieve.

El caudal bajo módulo confirma la presencia de ventilación inferior en las variantes elevadas. V3 registra un caudal de 87,89 m³/s, mientras que V2 y V2B presentan valores levemente mayores. Esto indica que V3 no maximiza el flujo inferior dentro del conjunto, pero mantiene una circulación bajo módulo significativa, inexistente en V0.

Por lo tanto, la lectura de barrido y ventilación inferior muestra una mejora clara respecto de la condición base, aunque no una superioridad absoluta de V3 sobre todas las variantes intermedias. Esta observación refuerza la necesidad de interpretar los resultados como un compromiso aerodinámico integrado y no como la optimización individual de cada indicador indirento (*proxy*).

7.2.4 Síntesis de la lectura numérica

La lectura numérica confirma que la evolución geométrica produce mejoras relevantes respecto de la condición base, aunque no de manera uniforme en todos los indicadores. V3 no presenta el menor coeficiente de arrastre ni el mayor caudal bajo módulo; sin embargo, ofrece los resultados más favorables en los indicadores más vinculados con la calidad de la estela a sotavento: longitud de recirculación, recuperación de presión y reducción de energía cinética turbulenta media respecto de V0.

Tabla 7.3: Resumen del análisis cuantitativo de los campos de flujo.

Dimensión evaluada	Lectura principal	Lectura para la evaluación
Desempeño global	V3 reduce el arrastre respecto de V0, aunque no alcanza el menor Cd del conjunto	Mejora aerodinámica global relevante, pero no absoluta
Calidad de estela	V3 presenta la menor longitud de recirculación y mejor recuperación de presión	Principal evidencia numérica favorable dentro del conjunto
Barrido superficial	V3 aumenta el esfuerzo cortante a sotavento respecto de V0	Mejora relativa de interacción entre flujo y suelo
Ventilación inferior	V3 mantiene caudal bajo módulo significativo, aunque no máximo	Conserva el beneficio funcional de la elevación
Lectura integrada	Ningún <i>proxy</i> aislado define por sí solo el desempeño	La interpretación debe integrarse en la síntesis geométrica posterior

En conjunto, los proxies numéricos confirman las tendencias observadas en la lectura cualitativa: la evolución geométrica reduce condiciones desfavorables presentes en V0, especialmente en

términos de recirculación, recuperación de presión y ventilación inferior. Sin embargo, los datos también muestran que la mejora no es absoluta en todos los indicadores. Por ello, la selección de la configuración final debe apoyarse en una síntesis integrada de la evolución geométrica, desarrollada en el apartado siguiente.

7.3 Síntesis de la evolución geométrica y justificación de la propuesta final

La lectura conjunta de los campos de flujo y de los proxies numéricos permite interpretar la secuencia V0–V1–V2–V2B–V3 como una evolución progresiva del diseño, y no como una comparación entre alternativas finales equivalentes. Cada variante permitió evaluar una decisión geométrica específica y reconocer tanto sus aportes como sus límites frente al objetivo principal del trabajo: reducir la predisposición aerodinámica a la acumulación de nieve respecto de una condición base.

En este sentido, V0 funcionó como referencia inicial. Su comportamiento mostró los problemas principales asociados a un volumen prismático apoyado directamente sobre el terreno: estela extensa, baja ventilación inferior, recirculación vinculada al suelo y presión posterior fuertemente deprimida. A partir de esa condición, las variantes posteriores incorporaron modificaciones orientadas a corregir progresivamente esos aspectos.

La primera decisión relevante fue la elevación del módulo, materializada en V1. Esta transformación no redujo el arrastre global respecto de V0, pero sí modificó de manera significativa la interacción entre el volumen y el suelo. La aparición de circulación inferior permitió reducir el anclaje de la estela al terreno y aumentar el esfuerzo cortante medio a sotavento. Por lo tanto, la elevación debe interpretarse como una decisión favorable para mejorar la ventilación inferior y el barrido superficial, aunque no como una optimización aerodinámica global.

La incorporación del carenado en V2 produjo una mejora clara en términos de arrastre. El coeficiente de arrastre normalizado disminuyó de 1,02 en V1 a 0,52 en V2, y la fuerza longitudinal también se redujo de manera significativa. Sin embargo, esta mejora global no resolvió completamente la organización de la estela a sotavento. La longitud de recirculación no disminuyó respecto de V1, lo que indica que suavizar la incidencia del flujo no alcanza por sí solo para controlar la zona posterior del módulo.

La variante V2B permitió verificar si una corrección local del borde superior trasero podía mejorar el comportamiento de V2, especialmente frente a la inversión del flujo. Los resultados muestran una mejora parcial, principalmente en términos de arrastre para flujo inverso, pero sin modificar de fondo la estructura de la estela. Esta etapa resulta importante porque evidencia que el problema no se concentraba únicamente en un borde puntual, sino en la lógica general de la cola.

Finalmente, V3 surge como una respuesta a esa limitación mediante la simetrización del conjunto y la incorporación de una lógica de carenado también en la zona posterior. Esta variante no presenta el menor coeficiente de arrastre ni el mayor caudal bajo módulo del conjunto, pero sí ofrece la combinación más consistente de indicadores vinculados con el objetivo de la tesina: menor recirculación longitudinal, mejor recuperación de presión a sotavento, reducción de la energía cinética turbulenta media respecto de V0 y conservación de circulación inferior.

Tabla 7.4: Resumen de la evolución geométrica: aportes y límites.

Etapas	Decisión geométrica evaluada	Aporte principal	Límite observado
V0	Condición base apoyada	Permite identificar el problema inicial: estela extensa, recirculación y baja ventilación inferior	Configuración más desfavorable del conjunto
V0 → V1	Elevación del módulo	Reduce el anclaje de la estela al suelo y habilita circulación inferior	No reduce el arrastre global
V1 → V2	Incorporación de carenado	Disminuye significativamente el arrastre y suaviza la incidencia del flujo	No resuelve completamente la recirculación a sotavento
V2 → V2B	Ajuste local del borde trasero	Mejora parcial frente a flujo inverso	No modifica de fondo la estructura de la estela
V2B → V3	Simetrización del conjunto	Reduce la recirculación y mejora la recuperación de presión	No maximiza todos los proxies individuales

La comparación entre V0 y V3 permite dimensionar el efecto global de la evolución geométrica. El coeficiente de arrastre normalizado disminuye de 1,00 a 0,55, lo que representa una reducción aproximada del 45%. La fuerza longitudinal media baja de 3475,6 N a 2424,4 N. La longitud máxima de recirculación se reduce de 7,12 m a 0,86 m, y la presión media a sotavento pasa de -142,89 Pa a -5,56 Pa. Estos resultados indican una mejora clara en la recuperación del flujo posterior y en la reducción de la estela recirculante.

Tabla 7.5: Comparación entre variante inicial y final.

Indicador	V0	V3	Lectura
Cd/CdV0	1,00	0,55	Reducción del arrastre relativo
Fx [N]	3475,6	2424,4	Menor fuerza longitudinal
Lr [m]	7,12	0,86	Reducción marcada de la recirculación
$\bar{p}$ sotavento [Pa]	-142,89	-5,56	Mejor recuperación de presión
$\bar{k}$ [m ² /s ²]	20,30	12,46	Menor energía cinética turbulenta media
τ_{sot} [Pa]	0,30	0,92	Mayor interacción entre flujo y suelo
Q bajo módulo [m ³ /s]	No aplica	87,89	Ventilación inferior inexistente en V0

La propuesta final también fue evaluada mediante tres casos complementarios de sensibilidad, desarrollados en detalle en el Anexo A. En primer lugar, se incorporó una condición de menor velocidad, de 8 m/s, próxima a la mediana de los registros horarios de Marambio. Respecto del caso principal de 30 m/s, V3 mantuvo prácticamente constante el coeficiente de arrastre, en torno a 0,55, y la longitud de recirculación, próxima a 0,86 m. En cambio, los esfuerzos cortantes medios disminuyeron a 0,08 Pa a sotavento y 0,12 Pa bajo el módulo, mientras que el caudal inferior se redujo a 23,29 m³/s. El resultado indica que la organización global de la estela se conserva bajo una condición de viento considerablemente menor, aunque disminuye marcadamente la intensidad de la interacción entre el flujo y el suelo.

En el caso de aumento de velocidad a 50 m/s, V3 mantuvo el coeficiente de arrastre en 0,55 y la longitud de recirculación aumentó moderadamente de 0,86 m a 1,01 m. La fuerza, la energía cinética turbulenta, los esfuerzos cortantes y el caudal inferior aumentaron, como era esperable frente al incremento de la velocidad incidente, sin observarse una modificación sustancial de la organización general del flujo. Finalmente, ante una incidencia oblicua de 15°, la longitud de recirculación aumentó a 1,46 m y la presión media a sotavento alcanzó -18,27 Pa. Esto representa una penalización respecto de la incidencia normal, aunque la circulación inferior se mantuvo y el comportamiento general de la propuesta no se degradó completamente.

Tabla 7.6: Análisis de sensibilidad en variante final.

Caso de sensibilidad	Resultado principal	Lectura
V3 – 8 m/s – 0°	C_d se mantiene en 0,55. L_r permanece en 0,86 m. T_{sot} disminuye a 0,08 Pa. T_{bajo} disminuye a 0,12 Pa. Q baja a 23,29 m³/s.	La organización global de la estela se conserva a menor velocidad, aunque disminuye marcadamente la intensidad del barrido superficial y de la circulación inferior.
V3 – 50 m/s – 0°	C_d se mantiene en 0,55. L_r aumenta de 0,86 m a 1,01 m. Aumentan las fuerzas, los esfuerzos cortantes y el caudal inferior.	La geometría conserva un comportamiento aerodinámico consistente frente al aumento de velocidad.
V3 – 30 m/s – 15°	L_r aumenta a 1,46 m. $\bar{p}$ pasa a -18,27 Pa. Se mantiene la circulación inferior.	La incidencia oblicua penaliza el desempeño respecto del caso normal, pero no anula las características principales de la propuesta.

En consecuencia, V3 no debe entenderse como una solución óptima en todos los indicadores posibles, sino como la configuración más consistente dentro del conjunto evaluado. Su selección se justifica porque integra los aportes más relevantes de las etapas anteriores: conserva la ventilación inferior introducida por V1, mantiene la reducción de arrastre asociada al carenado, elimina la asimetría geométrica de la cola direccional observada en V2 y V2B, y mejora de manera significativa la calidad de la estela respecto de V0. Esta ventaja direccional se infiere de la simetría longitudinal de la envolvente, aunque la respuesta de V3 ante una inversión completa del flujo no fue cuantificada mediante un caso numérico independiente.

La conclusión debe formularse dentro del alcance metodológico de la tesina. Los resultados no permiten afirmar una eliminación garantizada de acumulaciones de nieve ni predecir espesores reales de depósito. Lo que sí permiten sostener es que la evolución geométrica hacia V3 reduce la predisposición aerodinámica relativa a la acumulación, al disminuir la recirculación, mejorar la recuperación del flujo a sotavento y mantener circulación inferior bajo el módulo. Por este motivo, V3 se adopta como propuesta final para las etapas posteriores de análisis de viabilidad y prefactibilidad.

8. Prefactibilidad de la propuesta

El presente capítulo evalúa si la variante V3 puede transformarse, de manera preliminar, en un sistema materializable, transportable y montable. El análisis no busca desarrollar una solución ejecutiva, sino verificar que la geometría aerodinámica propuesta pueda vincularse con una lógica constructiva coherente e identificar las condiciones que deberían resolverse en una etapa posterior de ingeniería.

La evaluación se concentra en cuatro aspectos: la utilización de un contenedor ISO de 20 pies como núcleo del módulo, la conformación de un sistema resistente elevado, la fabricación y fijación de los carenados y las implicancias económicas y logísticas de la propuesta.

Como condición de partida, se considera un contenedor ISO de 20 pies General Purpose, certificado, en buen estado estructural y con documentación técnica verificable. Las conclusiones de este capítulo no son aplicables a unidades corroídas, deformadas, reparadas sin control o modificadas sin una evaluación específica.

8.1 Prefactibilidad constructiva

8.1.1 Sistema general y camino de cargas

La variante V3 puede interpretarse como un sistema compuesto por los siguientes elementos:

- Un contenedor ISO de 20 pies utilizado como núcleo dimensional, funcional y resistente
- Cuatro patas metálicas ubicadas próximas a las esquinas inferiores
- Uniones entre las patas y las zonas resistentes del bastidor inferior del contenedor
- Un sistema de arriostramiento lateral
- Carenados aerodinámicos desmontables
- Placas base, anclajes y fundaciones adaptados al emplazamiento

No se propone incorporar un bastidor estructural secundario bajo el contenedor. La estrategia preliminar consiste en aprovechar el bastidor inferior existente, compuesto por los largueros longitudinales, travesaños y elementos extremos próximos a los herrajes de esquina o *corner fittings*.

En este capítulo, este conjunto puede interpretarse como un *bastidor virtual* de transferencia. La expresión no identifica una estructura nueva, sino el funcionamiento conjunto de los perfiles inferiores originales del contenedor como sistema encargado de recibir las cargas interiores y transmitirlas hacia las esquinas y los apoyos.

El camino preliminar de las cargas verticales puede representarse mediante la siguiente secuencia:

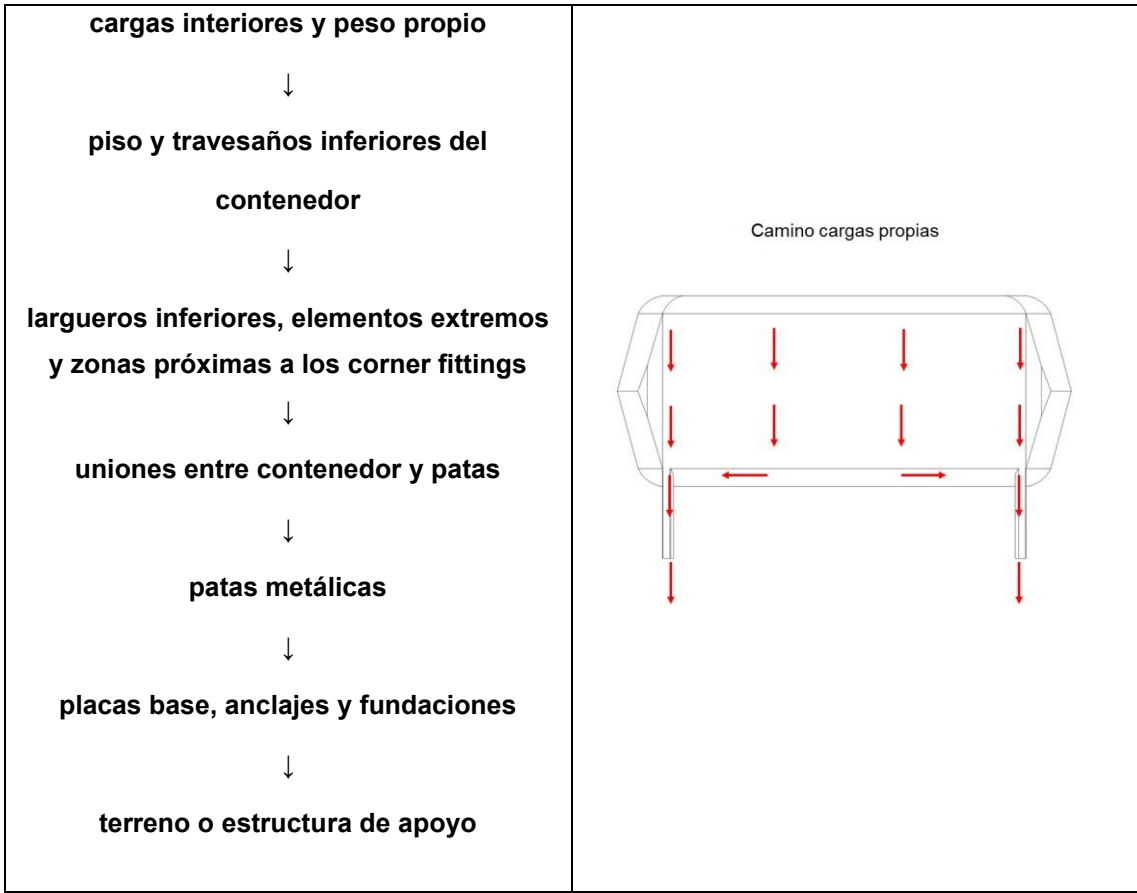


Figura 8.1: Camino de cargas verticales

Las acciones horizontales producidas por el viento siguen un recorrido complementario:

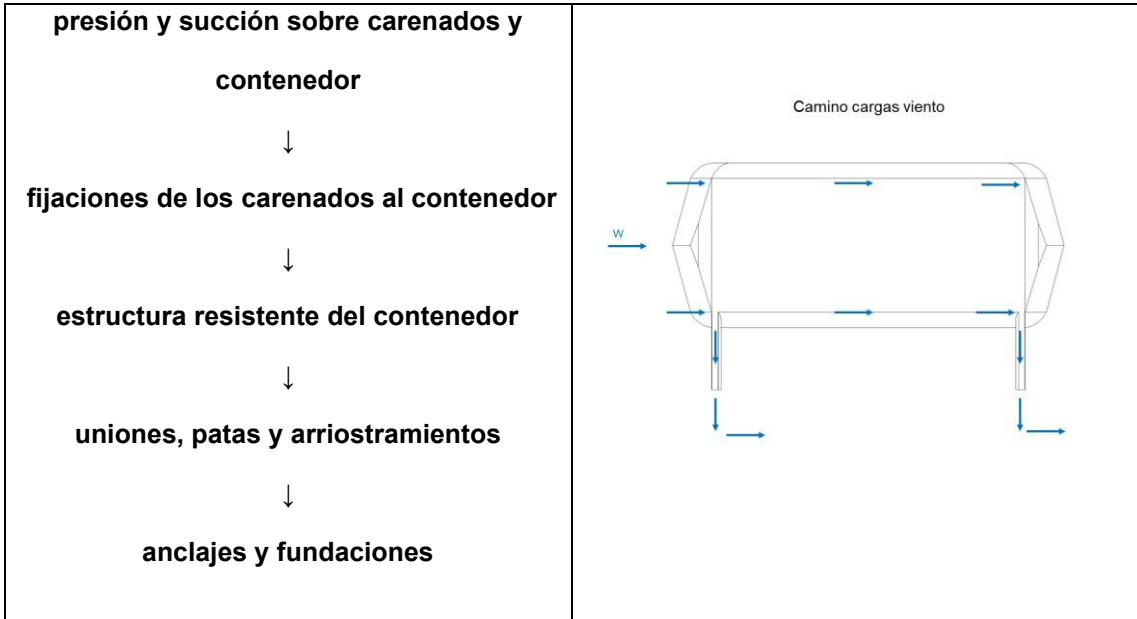


Figura 8.2: Camino de cargas horizontales.

Los carenados se piensan como piezas autoportantes. Su fijación se realiza directamente al contenedor mediante pestañas o elementos salientes integrados a la envolvente, por los cuales se abulonon las piezas.

Esta interpretación permite identificar que la factibilidad del conjunto no depende solamente de la resistencia de las patas. También deben verificarse la capacidad del bastidor inferior existente para redistribuir las cargas, la resistencia local de las zonas de unión, la rigidez lateral del sistema elevado y la capacidad de las fundaciones frente a compresión, corte, vuelco y arrancamiento.

La eventual incorporación de perfiles de refuerzo no forma parte de la definición geométrica inicial de V3. Solo deberá considerarse si la inspección del contenedor, el uso interior adoptado o el cálculo estructural demuestran que los perfiles originales no presentan resistencia o rigidez suficiente.

La Figura 8.3 sintetiza la organización general de la variante V3 y permite identificar los elementos que intervienen en su materialización constructiva. El contenedor ISO de 20 pies constituye el núcleo principal del conjunto, mientras que su bastidor inferior, los montantes de esquina y el bastidor superior conforman las zonas resistentes de referencia para la transferencia de cargas.

La envolvente aerodinámica se dispone exteriormente al contenedor y no se considera parte de la estructura resistente principal. El sistema se completa con cuatro patas ubicadas próximas a las esquinas inferiores y con arriostramientos mediante cables, planteados como una alternativa para aportar estabilidad lateral con baja interferencia sobre el flujo bajo el módulo. La figura tiene carácter esquemático y no representa dimensiones ni uniones estructuralmente verificadas.

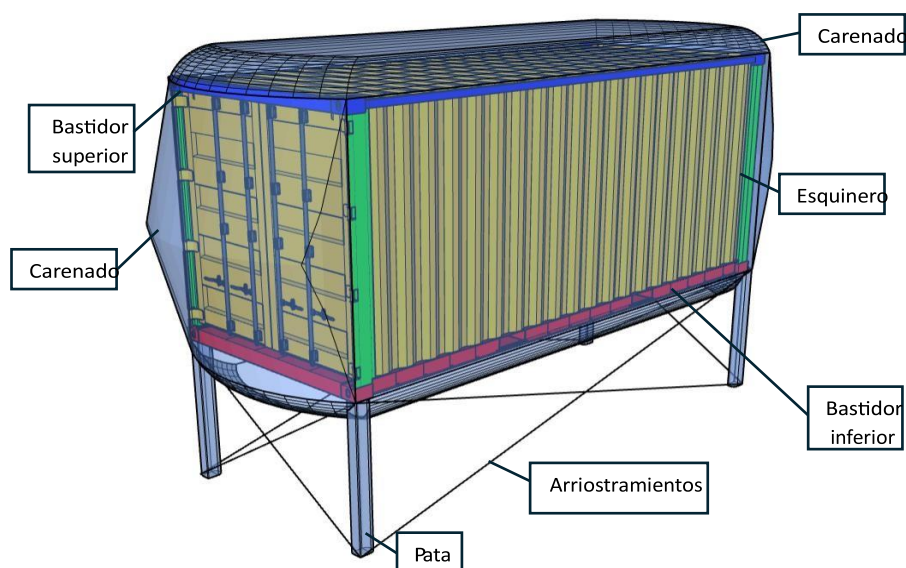


Figura 8.3. Esquema general e identificación de sus componentes principales: contenedor ISO de 20 pies, bastidores, montantes de esquina, patas, arriostramientos estimativos y carenados.

8.1.2 Contenedor adoptado, apoyo y cargas interiores

La propuesta adopta como referencia un contenedor ISO de 20 pies estándar, de uso general o *General Purpose*. Las dimensiones exteriores empleadas en el modelo —aproximadamente 6,06 m de longitud, 2,44 m de ancho y 2,59 m de altura— corresponden a la designación ISO 1CC establecida por ISO 668. La selección definitiva deberá realizarse sobre una unidad identificada mediante su código ISO, placa CSC ¹ y ficha técnica. La existencia de documentación y certificación no demuestra por sí sola su aptitud como módulo habitacional modificado, pero permite conocer las condiciones originales de fabricación, manipulación y capacidad de carga.

Apoyo en las esquinas inferiores

La norma ISO 1496-1 establece que los contenedores de la serie 1 deben poder ser soportados mediante sus herrajes de esquina inferiores o *bottom corner fittings*. De manera concordante, el Código CTU² de IMO³, ILO⁴ y UNECE⁵ indica que, sobre una superficie firme y nivelada, el contenedor debe apoyarse en sus cuatro corner fittings inferiores.

Por lo tanto, ubicar los apoyos próximos a las esquinas inferiores es compatible con la lógica resistente normalizada del contenedor. Esta condición es favorable porque aproxima la transferencia de cargas a los montantes de esquina, largueros inferiores y travesaños extremos, que constituyen zonas principales de su estructura.

Sin embargo, el apoyo normalizado de un contenedor no equivale a la condición de la variante V3. El sistema propuesto se encuentra elevado 1,50 m del nivel del suelo, incorpora elementos expuestos al viento y puede recibir momentos, esfuerzos horizontales y tracciones por vuelco que no forman parte de una situación convencional de almacenamiento o transporte. En consecuencia, la unión entre las patas y el contenedor debe diseñarse específicamente.

Capacidad preliminar del piso

La resistencia del piso debe diferenciarse de la capacidad estructural global del contenedor. ISO 1496-1 incluye un ensayo de resistencia del piso aplicable a los contenedores de carga general, independientemente del material adoptado. El ensayo se realiza mediante un vehículo con neumáticos y una carga por eje de 5.460 kg —*equivalente a 2.730 kg por rueda*— que recorre el piso mientras el contenedor se encuentra apoyado en sus cuatro esquinas inferiores.

¹ *Container Safety Convention*

² *Cargo Transport Unit*

³ *International Maritime Organization*

⁴ *International Labour Organization*

⁵ *United Nations Economic Commission for Europe*

Este valor representa una exigencia mínima normalizada; algunos contenedores con piso de acero pueden admitir cargas por eje superiores, según su diseño y ficha técnica.

El ensayo demuestra que el piso de un contenedor certificado debe resistir cargas dinámicas concentradas propias de las operaciones logísticas. Esto permite inferir que el tránsito normal de personas no constituye, en principio, la solicitud crítica para un contenedor en buen estado.

No obstante, el cambio de uso exige considerar aspectos que el ensayo logístico no evalúa de manera directa:

- Deformaciones admisibles
- Vibraciones y confort
- Estado del tablero o chapa de piso
- Corrosión de los travesaños inferiores
- Cargas puntuales de mobiliario o equipamiento
- Perforaciones e instalaciones
- Aislación térmica y terminaciones
- Transferencia de las cargas hacia las patas

Para vincular el uso interior con criterios edilicios pueden utilizarse las sobrecargas mínimas de referencia establecidas por CIRSOC 101-25.

Tabla 8.1. Sobrecargas de referencia y alcance de la evaluación preliminar CIRSOC 101-25

Uso interior	Sobrecarga de referencia	Lectura preliminar
Dormitorio individual	2,0 kN/m ²	Uso liviano compatible preliminarmente, sujeto a revisión del estado y deformaciones
Oficina	2,5 kN/m ²	Uso liviano a moderado; verificar mobiliario, instalaciones y condiciones de servicio
Laboratorio o área científica	5,0 kN/m ²	Requiere conocer equipos, cargas puntuales y sensibilidad a vibraciones
Depósito liviano	6,0 kN/m ²	Requiere verificar distribución, altura de almacenamiento y capacidad local del piso
Depósito pesado	12,0 kN/m ²	No debe asumirse sin cálculo específico del piso, bastidor y apoyos

La tabla no representa una verificación estructural del contenedor. Su función es distinguir entre usos interiores livianos y situaciones en las que pueden aparecer cargas elevadas o concentradas sobre sectores reducidos. La conversión de una sobrecarga uniforme en una carga total tampoco resulta suficiente para verificar el piso, ya que su comportamiento depende de la posición de las cargas respecto de los travesaños, del área de contacto y de la rigidez del conjunto.

Como comparación de órdenes de magnitud, el ensayo de piso de ISO 1496-1 aplica una carga móvil concentrada de 53,5 kN por eje, transmitida mediante dos ruedas. En cambio, las sobrecargas de uso de CIRSOC se expresan por unidad de superficie. Para un piso interior aproximado de 13,9 m², una sobrecarga de 2 kN/m² para dormitorio representa una carga total distribuida de 27,8 kN; una oficina de 2,5 kN/m², 34,8 kN; y un laboratorio de 5 kN/m², 69,5 kN.

En términos totales, las cargas distribuidas correspondientes a dormitorio y oficina son inferiores a la carga de eje aplicada en el ensayo ISO, mientras que la correspondiente a laboratorio es superior. Esta comparación es únicamente orientativa, porque el ensayo ISO evalúa una carga concentrada y móvil, mientras que las sobrecargas de CIRSOC representan cargas distribuidas de uso y comprometen de manera diferente al piso, los travesaños y el bastidor inferior.

En consecuencia, para un contenedor certificado, estructuralmente sano y sin modificaciones no verificadas, no se identifica preliminarmente una incompatibilidad evidente con usos interiores livianos y distribuidos, como dormitorio u oficina. Esta apreciación no reemplaza la comprobación de deformaciones, cargas puntuales, terminaciones e instalaciones. Los usos como laboratorio, depósito o sala técnica requieren definir las cargas reales, la ubicación de los equipos y las verificaciones locales correspondientes.

8.1.3 Sistema resistente preliminar

Geometría de elevación y patas

La variante V3 mantiene una altura libre de 1,20 m entre el nivel del suelo y el punto inferior del carenado. Esta dimensión corresponde a la geometría final analizada mediante CFD y busca conservar la circulación de aire bajo la envolvente.

Debe diferenciarse esta altura libre de la longitud total de las patas y de la distancia entre el suelo y la base estructural del contenedor. Debido a la presencia del carenado inferior, estas dimensiones no son necesariamente coincidentes.

Las patas se ubican próximas a las cuatro esquinas inferiores, procurando que las cargas sean transferidas hacia las zonas estructuralmente principales del contenedor. La sección de los apoyos utilizada en el modelo geométrico constituye una definición preliminar y no una sección estructural verificada.

El dimensionamiento definitivo deberá considerar:

- Peso propio del módulo
- Cargas interiores
- Acciones de viento
- longitud libre de pandeo
- Flexión producida por acciones horizontales
- Rigidez lateral requerida
- Interacción con los arriostramientos
- Condiciones de fabricación, montaje y corrosión

Aprovechamiento del bastidor inferior existente

La propuesta utiliza los perfiles inferiores originales del contenedor como sistema resistente de distribución. Los largueros longitudinales, los travesaños y las zonas próximas a los corner fittings conforman un marco resistente continuo que puede interpretarse conceptualmente como un *bastidor virtual*.

La viabilidad de esta estrategia depende del contenedor específico. Antes de adoptar el sistema deberán relevarse:

- Geometría y sección de los largueros inferiores
- Disposición y separación de los travesaños
- Características de los elementos extremos
- Estado de corrosión
- Reparaciones o deformaciones previas
- Modificaciones realizadas durante su vida útil

No debe asumirse que todos los contenedores comerciales presentan exactamente las mismas secciones o el mismo estado estructural. La documentación del fabricante y la inspección de la unidad seleccionada serán necesarias para construir un modelo resistente confiable.

Unión entre patas y contenedor

La unión pata-contenedor constituye uno de los puntos críticos de la propuesta. Debe transferir cargas verticales, corte horizontal, flexión local, acciones de los arriostramientos y posibles tracciones producidas por el vuelco.

La ubicación en los corner fittings resulta favorable porque reduce la distancia entre los apoyos y los montantes de esquina, evitando transferencias innecesarias hacia sectores centrales del piso. Por lo que, la conexión no debe localizarse sobre la chapa de piso ni sobre un travesaño aislado.

La solución preliminar deberá vincular cada pata con los perfiles resistentes inferiores y con los corner fittings. Puede resolverse mediante placas, piezas de encastre, componentes abulonados o una combinación de estos recursos.

La elección deberá permitir:

- Distribuir las acciones entre más de un elemento resistente
- Disminuir concentraciones locales
- Conservar la posibilidad de desmontaje
- Absorber tolerancias de fabricación y montaje
- Facilitar la inspección

No se adopta en esta etapa una geometría definitiva de conexión. Su diseño dependerá de las secciones reales del contenedor, de las cargas calculadas y de la configuración final de las patas.

La Figura 8.4 presenta alternativas preliminares para vincular las patas con los corner fittings inferiores del contenedor.

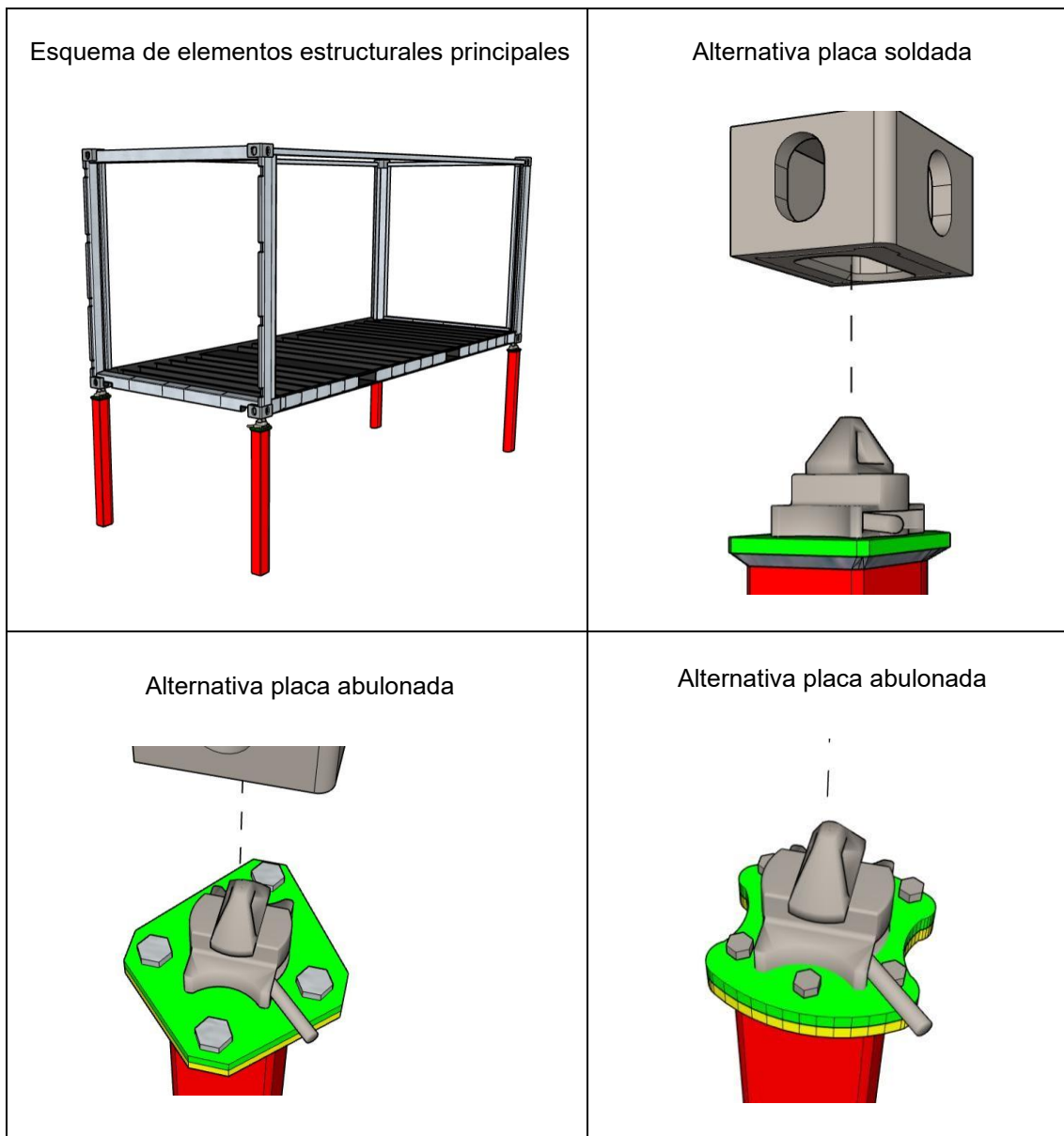


Figura 8.4. Detalle conceptual de la unión entre pata, larguero inferior y zona próxima al corner fitting.

El esquema inicial identifica los elementos resistentes principales considerados en la transferencia de cargas: montantes de esquina, largueros inferiores, travesaños del piso y corner fittings. La ubicación de los apoyos en coincidencia con las esquinas busca conducir las acciones hacia las zonas principales del bastidor del contenedor, evitando apoyos directos sobre la chapa del piso o sobre sectores intermedios no destinados a recibir cargas concentradas.

Como mecanismo de conexión se propone utilizar twistlocks instalados en el extremo superior de cada pata. Estos dispositivos aprovechan la geometría normalizada de los corner fittings y el sistema de encastre utilizado habitualmente para fijar, manipular y asegurar contenedores.

Para esta aplicación se consideran inicialmente twistlocks de accionamiento manual, aunque en una etapa posterior podría evaluarse el empleo de dispositivos semiautomáticos si ofrecieran ventajas para el montaje y desmontaje del módulo.

La vinculación entre el twistlock y la pata puede resolverse mediante dos configuraciones generales. En la primera, el dispositivo se fija sobre una placa soldada directamente al perfil de la pata. Esta alternativa presenta una configuración sencilla y reduce la cantidad de componentes, pero genera una unión permanente cuya fabricación, geometría de soldadura y transferencia local de esfuerzos deberán verificarse.

La segunda configuración incorpora una placa superior vinculada al twistlock, abulonada a otra placa previamente soldada al extremo de la pata. En la figura se representan dos posibles geometrías para esta solución. La unión abulonada facilitaría el desmontaje, el reemplazo del dispositivo y la absorción de ciertas tolerancias de fabricación o montaje, aunque incorpora una mayor cantidad de piezas y requiere comprobar la resistencia de las placas, bulones y soldaduras asociadas.

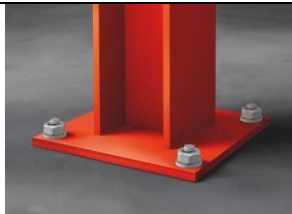
Las configuraciones representadas no constituyen detalles constructivos dimensionados. Su función es establecer posibles caminos de desarrollo para la conexión entre patas y contenedor. La selección definitiva deberá considerar las acciones verticales y horizontales, las posibles tracciones por vuelco, la rigidez de la unión, las tolerancias de montaje, la accesibilidad para inspección y la compatibilidad entre el twistlock seleccionado y el corner fitting del contenedor adoptado.

8.1.4 Apoyos y fundaciones

La solución de fundación depende del emplazamiento real. En el contexto antártico, el módulo podría instalarse sobre roca, suelo granular preparado, una plataforma existente o, eventualmente, una superficie de hielo. Cada condición modifica la transferencia de cargas, el tipo de anclaje y la posibilidad de desmontaje.

Las fundaciones deben verificarse para el conjunto completo y no solamente para el peso del contenedor. La elevación y los carenados incrementan la exposición al viento y pueden generar esfuerzos de arrancamiento. Por este motivo, el peso propio y la fricción en la base no deben asumirse como mecanismos suficientes de estabilidad.

Tabla 8.2. Alternativas de apoyo según el emplazamiento.

Emplazamiento	Solución conceptual	Condiciones críticas	Imagen con fin ilustrativo
Roca	Placas base y anclajes a roca	Tracción, corte, arrancamiento, fisuración de la roca, corrosión y tolerancias	
Suelo granular o terreno con permafrost	Bases premoldeadas, fundaciones superficiales o placas de anclajes	Capa activa, capacidad portante, asentamientos, régimen térmico, congelamiento y deshielo.	
Plataforma existente	Conexión mediante placas y anclajes a la estructura disponible	Compatibilidad resistente, interferencias, nivelación	
Hielo	Solución específica definida mediante estudio del emplazamiento	Fluencia, temperatura, variación estacional, derretimiento local, capacidad portante	

En una implantación sobre roca, la alternativa más directa consiste en utilizar placas base conectadas mediante barras o pernos anclados. El término apropiado es *anclajes a roca*, salvo que se desarrolle específicamente una solución profunda que pueda clasificarse como micropilote.

En suelo granular o sobre una superficie preparada pueden estudiarse fundaciones superficiales, bases de hormigón premoldeado o sistemas recuperables. Aunque estas alternativas responden a procedimientos convencionales de ingeniería civil, requieren información geotécnica, evaluación del congelamiento y análisis de las posibilidades reales de excavación, nivelación y transporte.

En el caso de suelos afectados por **permafrost**⁶, la solución de apoyo deberá considerar la presencia y el espesor de la capa activa, las variaciones estacionales de temperatura y la posibilidad de asentamientos diferenciales asociados al congelamiento y descongelamiento. La fundación no deberá inducir un aporte térmico que degrade el terreno congelado ni asumirse estable sin una caracterización geotécnica y térmica del sitio. Por lo tanto, la utilización de bases premoldeadas o fundaciones superficiales constituye únicamente una alternativa preliminar, condicionada al conocimiento del perfil del terreno y de su régimen térmico.

La implantación sobre hielo presenta un nivel de incertidumbre mayor. Su comportamiento depende de la temperatura, la fluencia, las variaciones estacionales y la historia de carga. Por ello, no se adopta en esta etapa una solución específica para hielo. Cualquier alternativa deberá sustentarse en información glaciológica, térmica y operativa del sitio de implantación.

8.1.5 Materialización y fijación de los carenados

La fabricación de los carenados constituye uno de los principales desafíos de materialización de la variante V3. Las superficies utilizadas en el modelo CFD presentan radios variables, transiciones curvas y sectores alabeados que no pueden trasladarse directamente a piezas metálicas convencionales. La solución constructiva debe conservar, en la medida de lo posible, la continuidad de la geometría analizada sin exigir un procedimiento de fabricación desproporcionado para la escala del módulo.

Para un prototipo único, se propone descomponer la envolvente en piezas metálicas desmontables, fabricadas mediante una combinación de rolado, curvado, plegado segmentado y soldadura. Los sectores de radio aproximadamente constante podrían resolverse mediante rolado, mientras que las zonas alabeadas o de transición requerirían panelización, conformado parcial o piezas soldadas.

Esta estrategia permite utilizar procedimientos habituales de taller, facilitar el transporte por componentes y reemplazar sectores dañados sin intervenir la totalidad de la envolvente. En una eventual fabricación repetitiva podrían evaluarse matrices, moldes o dispositivos específicos que permitan aumentar la precisión y reducir el tiempo de conformado por unidad.

La selección del material deberá considerar peso, rigidez local, resistencia, soldabilidad, corrosión, disponibilidad y mantenimiento. El acero ofrece mayor rigidez para un mismo espesor y facilidad de fabricación, aunque incrementa el peso y requiere protección anticorrosiva. El aluminio reduce la masa transportada y presenta ventajas frente a la corrosión, pero puede

⁶ El permafrost es una capa de suelo, roca o sedimento que se mantiene a temperaturas iguales o inferiores a 0 °C durante dos años seguidos o más. Se encuentra en regiones frías como el Ártico, la Antártida y zonas de alta montaña. Está compuesto por tierra, hielo y restos de materia orgánica antigua.

requerir mayores espesores y procedimientos específicos de unión. En esta etapa no se adopta un material ni un espesor definitivo.

El despiece preliminar comprende carenados frontal, posterior, superiores e inferiores, paneles laterales y capuchones de las patas. La Figura 8.5 presenta la disposición general de estas piezas alrededor del contenedor y permite reconocer su condición desmontable.

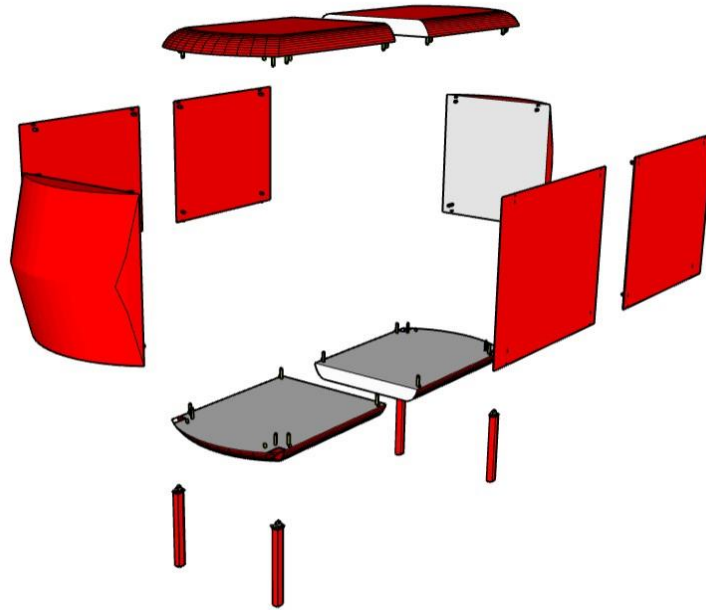


Figura 8.5. Despiece general de los carenados de la variante V3.

Sistema preliminar de fijación

La fijación se plantea mediante una lógica repetitiva que se adapta a la geometría de cada carenado. Las piezas se vinculan principalmente con los perfiles existentes de los bastidores superior e inferior del contenedor, sin incorporar una subestructura exterior independiente.

Cada carenado posee pares de pestañas solidarias a la pieza, dispuestas de manera que abrazan el perfil del contenedor desde caras opuestas. Dentro de cada par, la pestaña de mayor longitud se vincula mediante bulones con la pestaña correspondiente del carenado contiguo. La pestaña más corta no participa directamente de esa unión abulonada, sino que aporta apoyo y restricción frente al desplazamiento local.

De esta manera, la fijación combina dos mecanismos: el encastre de cada panel alrededor de los perfiles existentes y la unión mecánica entre carenados contiguos. La repetición de este criterio permite resolver los encuentros entre piezas de geometría diferente manteniendo una lógica común de montaje.

La Figura 8.6 muestra la aplicación del sistema en una esquina superior posterior del contenedor. Las pestañas representadas con un mismo color pertenecen a una misma pieza: el color rosa corresponde al carenado lateral, el azul al carenado posterior y el verde al carenado superior. En el detalle puede observarse cómo los distintos pares de pestañas se disponen alrededor de los perfiles próximos al corner fitting y se vinculan entre sí mediante bulones.

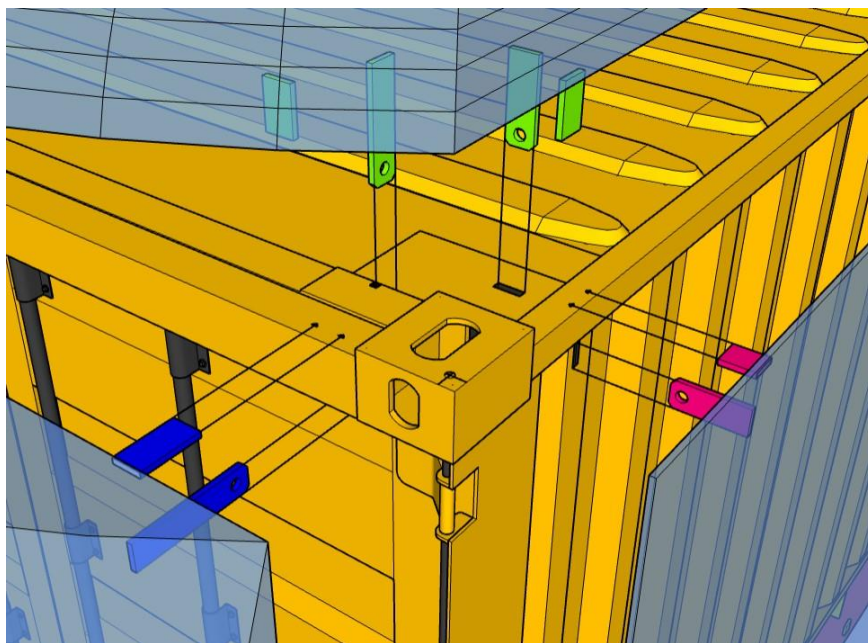


Figura 8.6. Detalle de las fijaciones de los carenados en una esquina superior posterior.

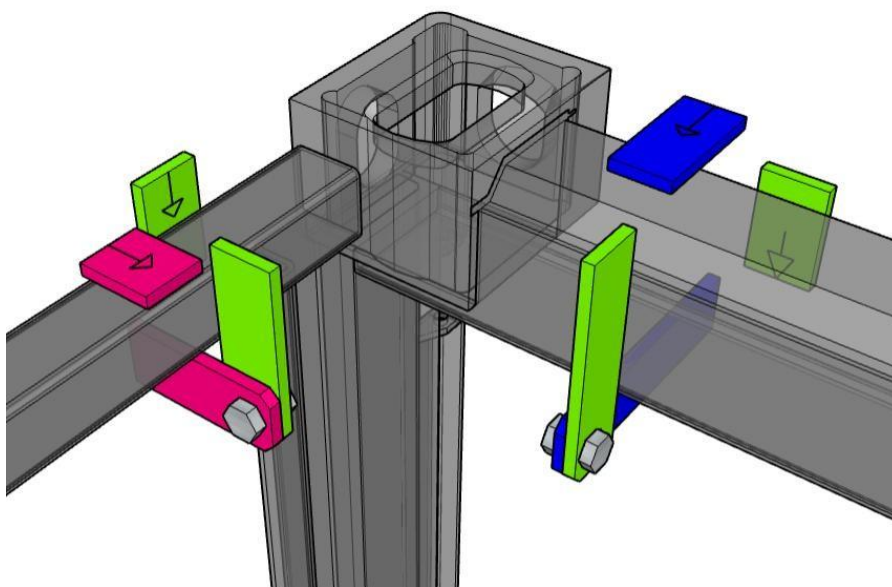


Figura 8.7. Esquema conceptual del encastre entre las pestañas de los carenados contiguos y perfiles del bastidor superior.

El ajuste de la bulonería requiere acceso desde el interior del contenedor. Para ello, se prevén aberturas o ranuras localizadas en sus chapas exteriores, alineadas con los puntos de fijación. Estas intervenciones deberán evitar los montantes, largueros, travesaños y corner fittings, y limitarse a los sectores estrictamente necesarios.

Las aberturas deberán coordinarse posteriormente con la aislación y los revestimientos interiores, ya que una terminación fija podría impedir el acceso a las uniones. También será necesario resolver su sellado, protección anticorrosiva y estanqueidad frente al ingreso de agua, nieve o aire. Una alternativa consiste en mantener registros interiores desmontables en coincidencia con los puntos principales de fijación.

Aunque los carenados no se consideran parte de la estructura resistente principal, sus paneles y uniones deberán transmitir hacia los bastidores del contenedor las presiones y succiones producidas por el viento, además de resistir vibraciones, deformaciones locales, impactos del montaje y variaciones térmicas. La cantidad y separación de pestañas, los espesores, la bulonería y los posibles refuerzos locales deberán definirse mediante una verificación posterior.

El sistema representado tiene carácter conceptual y establece una estrategia posible de fabricación, montaje y desmontaje. La versión construida incorporará juntas, pestañas, tolerancias y discontinuidades que no se encuentran representadas en la geometría ideal utilizada en CFD. Por este motivo, en una etapa posterior sería conveniente comparar la configuración simulada con una versión simplificada de la geometría fabricable, a fin de evaluar si estas modificaciones alteran significativamente su desempeño aerodinámico.

8.1.6 Secuencia preliminar de ensamblaje

La propuesta se concibe como un sistema prefabricado y desmontable, trasladado al emplazamiento con sus componentes separados. El montaje se realizaría mediante una secuencia ordenada que permita instalar primero la estructura resistente y completar posteriormente la envolvente aerodinámica.

Previo al montaje del conjunto, se conforman los carenados inferiores, superiores, frontal, trasero y laterales ensamblando las subdivisiones planteadas para facilitar la logística de transporte.

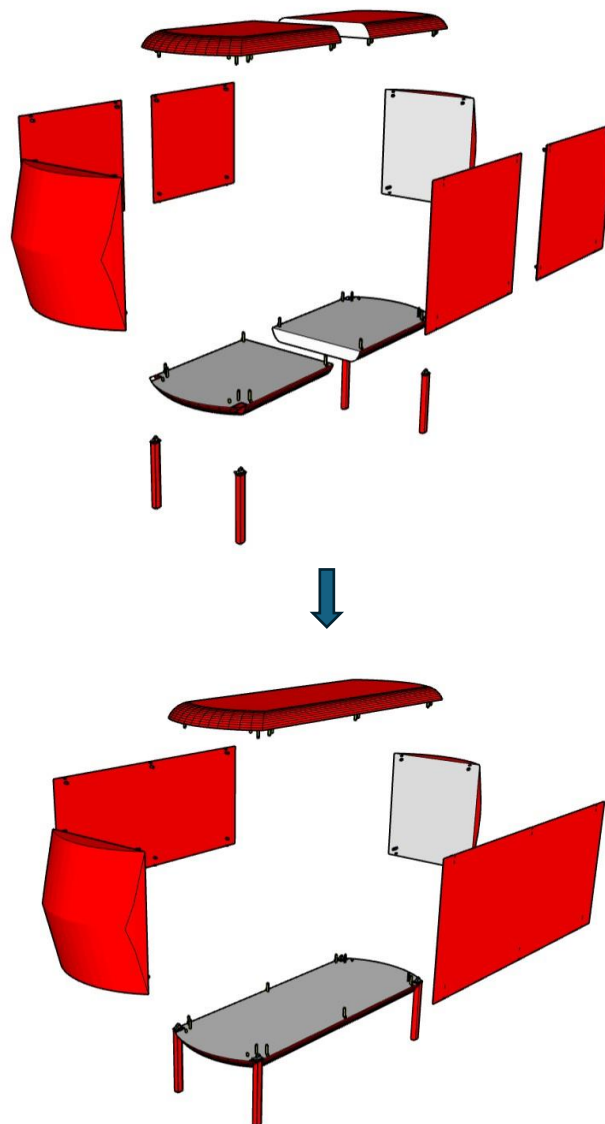
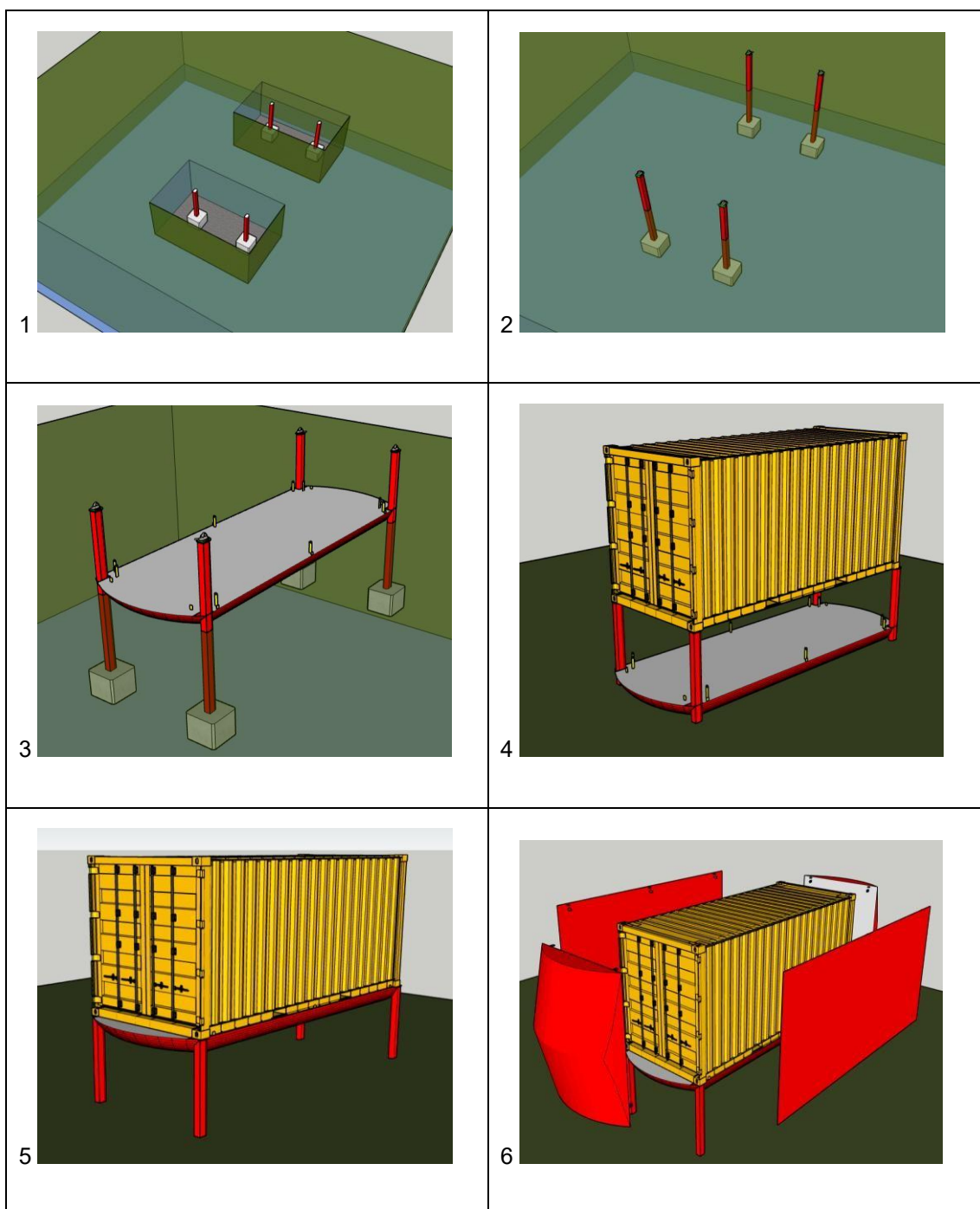


Figura 8.8: Ensamblaje de carenados fragmentados.

Una vez ensambladas las piezas, la secuencia preliminar propuesta, representada en la Figura 8.9 comprende:



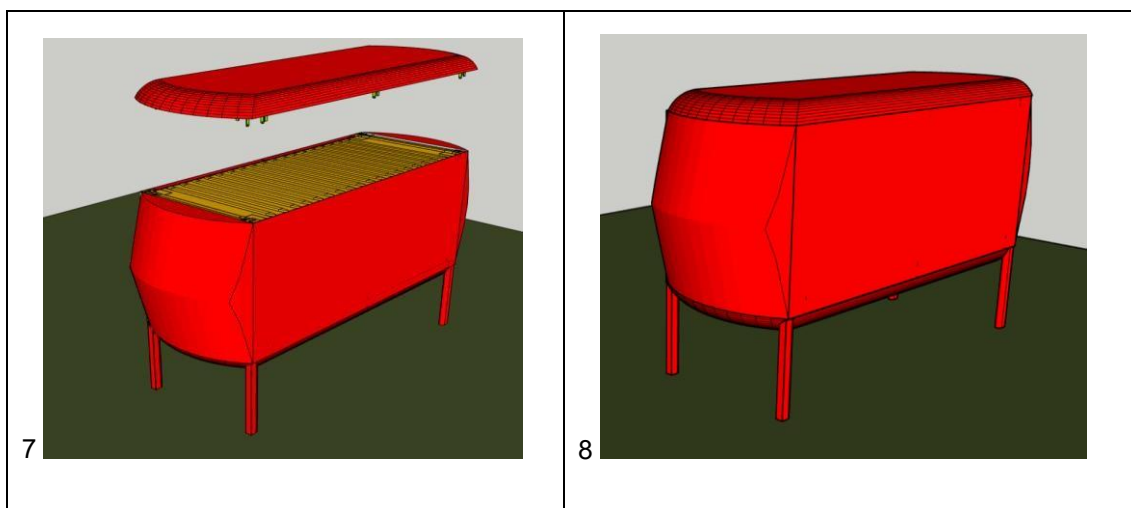


Figura 8.9. Secuencia preliminar de ensamblaje de la variante V3. Fuente: elaboración propia.

1. **Ejecución de las cimentaciones:** Se materializan y nivelan los cuatro apoyos destinados a recibir las patas del módulo.
2. **Colocación de las patas:** Las patas se posicionan y fijan sobre las cimentaciones, conservando la alineación necesaria para recibir el contenedor.
3. **Posicionamiento provisional del carenado inferior:** Antes de colocar el contenedor, el carenado inferior se introduce entre las patas y se mantiene temporalmente por debajo de su posición definitiva.
4. **Colocación y fijación del contenedor:** El contenedor se descende sobre las patas y se vincula mediante las uniones previstas en correspondencia con su bastidor inferior.
5. **Elevación del carenado inferior:** Una vez afirmado el contenedor, el carenado inferior se eleva y encastra en su posición definitiva.
6. **Montaje de los carenados perimetrales:** Se incorporan los paneles frontal, trasero y laterales, vinculándolos entre sí y con el contenedor.
7. **Colocación del carenado superior:** La pieza superior se posiciona sobre el conjunto y completa la envolvente exterior.
8. **Abulonado definitivo:** Finalmente, las piezas se alinean y fijan mediante uniones abulonadas accesibles desde el interior del módulo.

Esta secuencia permite trasladar el contenedor sin elementos sobresalientes y completar la configuración final en el emplazamiento mediante componentes previamente fabricados y presentados en taller. Su definición corresponde a una instancia de prefactibilidad y deberá ajustarse posteriormente a los medios de izaje y montaje disponibles.

La estrategia desarrollada permite reconocer una lógica constructiva posible, pero su avance hacia una etapa de ingeniería requiere resolver:

1. **Contenedor específico:** identificación, documentación, corrosión, reparaciones y estado de los *corner fittings*.
2. **Bastidor inferior existente:** secciones, espesores, separación de travesaños, continuidad y capacidad para transferir cargas hacia las patas.
3. **Cargas interiores:** definición del uso, terminaciones, instalaciones, equipamiento y cargas puntuales.
4. **Uniones pata-contenedor:** transferencia de carga, placas, bulones, soldaduras, aplastamiento y resistencia local.
5. **Patas y arriostramientos:** compresión, pandeo, flexión y desplazamientos.
6. **Fundaciones:** capacidad portante, deslizamiento, vuelco, arrancamiento y compatibilidad con el emplazamiento.
7. **Carenados:** definición de su resolución estructural propia, sistema de fijación mediante pestañas al contenedor, comportamiento frente a presión de viento, vibraciones, tolerancias y protección anticorrosiva.

Los refuerzos adicionales no se consideran parte obligatoria de la propuesta. Su incorporación quedará condicionada a los resultados de estas verificaciones.

8.2 Estimación económica preliminar

La evaluación económica tiene por objetivo estimar el orden de magnitud de la inversión necesaria para materializar el sistema básico correspondiente a la variante V3. No se busca elaborar un presupuesto ejecutivo, sino establecer una referencia económica compatible con el nivel de definición alcanzado por la propuesta.

La estimación incorpora la adquisición de un contenedor ISO de 20 pies, dado que este constituye el núcleo dimensional, funcional y resistente del conjunto. Sobre esta unidad se adicionan los componentes específicos de la variante V3: patas metálicas, carenados, twistlocks, arriostramientos y protección anticorrosiva.

El análisis se organiza en dos niveles. En primer lugar, se cuantifican los materiales y componentes principales para los cuales fue posible obtener cantidades aproximadas y precios comerciales identificables. En segundo lugar, se incorpora una estimación paramétrica del costo de producción de los carenados y patas, debido a que todavía no se dispone de un despiece ejecutivo, una secuencia productiva definitiva ni cotizaciones de talleres metalúrgicos.

No se incluyen:

- Acondicionamiento interior del contenedor
- Aislación térmica, instalaciones y equipamiento
- Carpinterías, revestimientos y terminaciones
- Fundaciones y nivelación del conjunto
- Transporte terrestre y logística antártica
- Medios de izaje y montaje en el emplazamiento
- Ingeniería de detalle y cálculo estructural
- Gastos de importación y transporte internacional de componentes
- Matricería o herramental específico

Los precios se expresan en pesos argentinos y corresponden a valores comerciales relevados durante julio de 2026. Cuando la referencia se encuentra publicada en moneda extranjera, se utiliza la cotización vendedora de divisas del Banco de la Nación (27/07/2026). La conversión permite homogeneizar los valores dentro del cómputo, pero no reemplaza las condiciones cambiarias, impositivas y comerciales que pueda establecer cada proveedor.

8.2.1 Cómputo preliminar de materiales y componentes

Carenados

La superficie desarrollada neta de los carenados frontal, posterior, superior, inferior, laterales y capuchones de las patas, obtenida a partir del modelo geométrico, es:

$$S_{\text{neto}} = 89,52 \text{ m}^2$$

Para incorporar la adaptación a formatos comerciales, los recortes y las pérdidas preliminares de fabricación, se adopta un margen del 10 %:

$$S_{\text{compra}} = 89,52 \times 1,10 = 98,47 \text{ m}^2$$

Como referencia económica se adopta una chapa lisa laminada en frío de acero SAE 1010, calibre N.º 16, de 1,59 mm de espesor y formato comercial de 1,50 × 3,00 m. Cada hoja cubre una superficie de 4,50 m², por lo que se requieren:

$$N = \frac{98,47}{4,50} = 21,88$$

En consecuencia, se considera la adquisición de 22 hojas, equivalentes a 99,00 m² de chapa.

El acero y el espesor adoptados constituyen una hipótesis de costeo y no una especificación estructural definitiva. El espesor deberá verificarse posteriormente en función de las dimensiones de cada panel, las presiones de viento, la separación entre fijaciones, la curvatura y la posible incorporación de rigidizadores.

Patatas metálicas

Para las patas se mantiene como referencia la sección utilizada en el modelo geométrico: perfil tubular cuadrado de 120 × 120 mm. A los efectos exclusivos del costeo se adopta un espesor comercial de 3,2 mm.

Considerando cuatro patas de aproximadamente 1,50 m:

$$L_{\text{total}} = 4 \times 1,50 = 6,00 \text{ m}$$

Por lo tanto, se considera una barra comercial de 6 m. Tanto la sección como la longitud adoptadas son preliminares y no constituyen un dimensionamiento estructural. La longitud definitiva dependerá de la solución de fundación, las cotas del emplazamiento y el sistema de nivelación.

Unión mediante twistlocks

La vinculación entre las patas y el contenedor se representa económicamente mediante cuatro twistlocks manuales con placa base integrada, uno por cada corner fitting inferior.

La referencia comercial adoptada posee una placa de 16 mm de espesor, cuatro perforaciones para fijación y terminación galvanizada. Su selección permite representar el tipo de componente considerado en la propuesta, pero no verifica la resistencia del mecanismo, la placa, la soldadura ni su unión con la pata. El precio se convierte directamente a pesos argentinos utilizando la cotización vendedora de divisas del Banco Nación (27/07/2026).

Protección anticorrosiva

Se considera la protección de ambas caras de los carenados:

$$S_{\text{neto, protegida}} = 2 \times 89,52 = 179,04 \text{ m}^2$$

Se adiciona un 10 % por bordes, pestañas, irregularidades y pérdidas de aplicación:

$$S_{\text{protegida}} = 179,04 \times 1,10 = 196,94 \text{ m}^2$$

Se adopta, por lo tanto:

$$S_{\text{protegida}} \approx 197 \text{ m}^2$$

Como sistema de referencia para el costeo se utiliza un esmalte industrial anticorrosivo DTM aplicado en dos manos, con rendimiento teórico de 8,8 m²/L por mano.

El volumen requerido es:

$$V = \frac{197 \times 2}{8,8} = 44,77 \text{ L}$$

Considerando presentaciones comerciales de 20 L, se requieren tres latas, equivalentes a 60L.

El producto adoptado constituye una referencia económica y no una especificación definitiva para exposición antártica. La solución final podría requerir una preparación superficial más exigente y un esquema epoxi o poliuretánico de mayores prestaciones.

Arriostramientos

El sistema de estabilidad lateral se plantea mediante ocho cables que forman cruces en X sobre los cuatro planos verticales del módulo: dos caras longitudinales y dos transversales.

Cada diagonal vincula la base de una pata con el nudo superior correspondiente a la pata contigua dentro del mismo plano. La longitud geométrica total medida en el modelo es:

$$L_{\text{neto}} = 36,4 \text{ m}$$

Se incorpora un 10 % para cortes, ajustes y resolución de terminales:

$$L_{\text{estimada}} = 36,4 \times 1,10 = 40,04 \text{ m}$$

Para el costeo se adopta un rollo comercial de 50 m de cable de acero galvanizado de 8 mm, ocho tensores y un margen global del 10 % sobre el costo del cable y los tensores para representar guardacabos, prensacables y accesorios menores.

El diámetro del cable se utiliza únicamente como hipótesis económica. La sección necesaria, la capacidad de los tensores y la resistencia de los puntos de anclaje deberán verificarse posteriormente mediante cálculo estructural.

Tabla 8.3. Criterios de cómputo adoptados

Partida	Dato de partida	Hipótesis adoptada	Cantidad para costeo
Contenedor ISO de 20 pies	Una unidad como núcleo del sistema	Contenedor seco usado, nacionalizado y en buen estado operativo	1 unidad
Chapa para carenados	89,52 m ² de superficie desarrollada, incluidos los capuchones	Acero SAE 1010 de 1,59 mm y 10 % de margen	22 hojas de 1,50 × 3,00 m
Perfiles para patas	Cuatro patas de aproximadamente 1,50 m	Perfil tubular 120 × 120 × 3,2 mm	1 barra de 6 m
Twistlocks	Cuatro esquinas inferiores	Twistlock manual con placa base integrada	4 unidades
Protección anticorrosiva	179,04 m ² correspondientes a ambas caras de los carenados	Dos manos y 10 % adicional por pérdidas	3 latas de 20 L
Arriostramientos	36,4 m medidos en el modelo	Ocho cables, 10 % de margen y diámetro de referencia de 8 mm	1 rollo de 50 m y 8 tensores

8.2.2 Valoración de materiales y componentes

La Tabla 8.4 reúne las cantidades adoptadas, los precios unitarios y los proveedores utilizados como referencia. Los valores no constituyen cotizaciones solicitadas específicamente para el proyecto, sino precios comerciales disponibles al momento del relevamiento.

Tabla 8.4. Cómputo y valoración de materiales y componentes principales

Partida	Cantidad	Precio unitario	Subtotal	Fuente adoptada
Contenedor ISO de 20 pies usado	1 u	\$ 6.120.485	\$ 6.120.485	Mega Containers
Chapa SAE 1010 de 1,59 mm, 1,50 × 3,00 m	22 hojas	\$ 171.815	\$ 3.779.930	Hierros Torrent
Perfil tubular 120 × 120 × 3,2 mm	1 barra de 6 m	\$ 426.250	\$ 426.250	Provecom
Twistlock con placa base integrada	4 u	\$ 143.473	\$ 573.892	Universal Containers
Esmalte industrial anticorrosivo DTM, 20 L	3 latas	\$ 169.871	\$ 509.613	Martel Pinturerías
Cable de acero galvanizado de 8mm	1 rollo de 50 m	\$ 141.185	\$ 141.185	MAQPRO
Tensores ojo-gancho de 8 mm	2 conjuntos de 4u	\$ 23.748 por conjunto	\$ 47.496	Vagolnet
Accesorios menores del arriostramiento	Global	10 % sobre cable y tensores	\$ 18.868	Guardacabos, prensacables, terminales, etc
Subtotal materiales			\$ 11.617.720	

El subtotal cuantificado de materiales y componentes principales es:

$C_{\text{materiales y componentes}} \approx \$ 11.62 \text{ millones}$

Dentro de este valor, el contenedor representa aproximadamente \$ 6.12 millones. Los materiales y componentes directamente asociados a la adaptación V3 representan aproximadamente \$ 5.50 millones.

El subtotal presenta un grado de trazabilidad mayor que la estimación productiva posterior, porque surge de cantidades obtenidas del modelo y de precios comerciales identificables. Sin

embargo, continúa sujeto a variaciones de mercado, condiciones de pago, disponibilidad, impuestos, transporte y, en el caso de los componentes importados, gastos de nacionalización.

8.2.3 Estimación paramétrica de la fabricación

El subtotal anterior no representa el costo final de materialización. La chapa debe ser cortada, rolada, plegada, curvada, ajustada y soldada para conformar los carenados. Los perfiles de las patas también deben cortarse, prepararse y vincularse con los componentes de conexión.

No resulta posible determinar estos costos mediante un presupuesto detallado porque todavía no se dispone del despiece constructivo definitivo, las horas de mano de obra y maquinaria, la longitud de soldaduras, las tolerancias de fabricación ni la secuencia final de preensamblaje. Por este motivo, el costo de producción se estima de manera paramétrica a partir de una referencia sectorial oficial argentina.

Los **Cuadros de Oferta y Utilización 2023 del INDEC** incluyen la actividad 289, correspondiente a *“Fabricación de otros productos elaborados de metal; actividades de servicios de trabajo de metales”*. Para esta actividad se registran:

- Valor bruto de producción: VBP = \$2.441.534,15
- Consumo intermedio: CI = \$ 1.393.461,36

La relación entre ambas magnitudes resulta: $F_{sectorial} = \frac{VBP}{CI} = \frac{\$2.441.534,15}{\$1.393.461,36} = 1,752$

A los efectos de la estimación se adopta: $F_{sectorial} = 1,75$

Este coeficiente no representa una tarifa de mano de obra ni implica que el costo de fabricación sea exactamente un 75 % adicional sobre el acero. El consumo intermedio sectorial comprende los bienes y servicios utilizados durante la producción, mientras que la diferencia hasta el valor bruto de producción incorpora el valor agregado generado por la actividad.

La aplicación al proyecto se limita a los materiales metálicos que requieren una transformación significativa en taller:

$$C_{base} = C_{chapas} + C_{perfiles}$$

$$C_{base} = \$3.779.930 + \$426.250$$

$$C_{base} = \$4.206.180$$

Aplicando el factor adoptado:

$$C_{elementos\ fabricados} = \$4.206.180 \times 1,75$$

$$C_{elementos\ fabricados} = \$7.360.815$$

El adicional productivo implícito respecto del costo de chapas y perfiles resulta:

$$C_{\text{adicional de producción}} = \$7.360.815 - \$4.206.180$$

$$C_{\text{adicional de producción}} = \$3.154.635$$

Este adicional representa de forma global las operaciones y recursos incorporados durante la transformación de los materiales, como corte, conformado, rolado, plegado, soldadura, utilización de maquinaria y costos generales de producción.

La estimación no incorpora matricería específica. El factor de 1,75 representa un promedio sectorial y no reproduce las particularidades de fabricar una única envolvente de geometría alabeada. Por ello, el valor debe interpretarse como una referencia de orden de magnitud hasta disponer de un despiece fabricable y cotizaciones específicas de taller.

8.2.4 Síntesis económica

Para obtener el costo preliminar de materialización, el costo paramétrico de los carenados y patas fabricados se suma al contenedor y a los componentes que no forman parte de la base multiplicada: twistlocks, protección anticorrosiva y arriostramientos.

Tabla 8.5. Estimación preliminar de materialización del sistema V3.

Concepto	Costo estimado
Contenedor ISO de 20 pies	\$ 6.120.485
Carenados y patas fabricados	\$ 7.360.815
Twistlocks con placa integrada	\$ 573.892
Protección anticorrosiva	\$ 509.614
Arriostramientos	\$ 207.549
Costo preliminar del sistema V3	\$ 14.772.355

El costo incremental correspondiente a la adaptación V3, sin considerar la adquisición del contenedor, resulta:

$$C_{\text{adaptación V3}} = \$14.772.355 - \$6.120.485$$

$$C_{\text{adaptación V3}} \approx \$8.65 \text{ millones}$$

El costo preliminar del sistema básico completo, incluyendo el contenedor, resulta:

$$C_{\text{sistema V3}} \approx \$14.77 \text{ millones}$$

El subtotal de **\$11.62 millones** correspondiente a materiales y componentes mantiene el mayor grado de trazabilidad, dado que surge de cantidades obtenidas del modelo y precios comerciales identificables. Dentro de ese subtotal, los materiales metálicos sujetos a transformación representan aproximadamente **\$4.21 millones**.

La aplicación de la relación sectorial actualizada eleva el costo estimado de esos materiales transformados a aproximadamente **\$7.36 millones**. El valor final de **\$14.77 millones** debe interpretarse como un escenario de referencia y no como una cotización o presupuesto ejecutivo.

La principal incertidumbre económica continúa asociada a la fabricación de la envolvente: geometrías curvas y alabeadas, ajustes entre piezas y condición de prototipo único. La reducción de esta incertidumbre requerirá completar el despiece constructivo y solicitar cotizaciones específicas a talleres con capacidad de rolado, plegado, soldadura y conformado. Los costos de fundaciones, acondicionamiento habitacional, transporte e implantación antártica permanecen fuera de la estimación.

8.3 Estrategia logística preliminar para Base Marambio

La adopción de un contenedor ISO de 20 pies como núcleo del módulo responde, además de su disponibilidad constructiva, a una ventaja logística concreta: permite conservar una unidad dimensionalmente normalizada, preparada para su manipulación, sujeción y transferencia entre distintos medios de transporte. La incorporación de patas y carenados no elimina esta condición, dado que dichos componentes se conciben como elementos desmontables y no forman parte de la envolvente exterior durante el traslado.

Para el caso específico de Base Marambio, se propone como estrategia principal el transporte aéreo del núcleo contenedor mediante una aeronave C-130 Hércules. Esta elección se apoya en la función logística de la base, en la operación regular de este sistema de armas entre el territorio continental y la Antártida, y en la compatibilidad dimensional preliminar entre un contenedor ISO de 20 pies y la bodega de carga de la aeronave.

El alcance del presente apartado se limita a verificar la coherencia general de esta estrategia. No se pretende desarrollar un plan ejecutivo de carga, vuelo, descarga o implantación, tareas que deberán ser definidas por el Comando Conjunto Antártico y por el operador de los medios asignados.

8.3.1 Configuración modular para el transporte

La variante V3 presenta dos estados diferenciados: una configuración instalada, correspondiente al módulo completo en servicio, y una configuración de transporte, en la cual se conserva el contenedor como unidad principal y se retiran los componentes que exceden sus dimensiones normalizadas.

Durante el traslado, el núcleo contenedor se mantendría sin patas, arriostramientos ni carenados instalados. De este modo, conservaría libre su envoltorio exterior y mantendría accesibles los corner fittings superiores e inferiores, necesarios para las operaciones de manipulación, sujeción e izaje.

Las pestañas destinadas a vincular los paneles entre sí forman parte de los propios carenados y, por lo tanto, no generan elementos salientes sobre el contenedor durante el transporte. Las modificaciones aerodinámicas desarrolladas en la propuesta no alteran así el galibo del núcleo transportable.

La configuración de transporte estaría compuesta por:

- Contenedor ISO de 20 pies acondicionado
- Patas y piezas de vinculación desmontables
- Arriostramientos, cables, tensores y terminales
- Placas base y componentes de anclaje
- Paneles de los carenados
- Bulonería, juntas y fijaciones

Los componentes desmontados podrían disponerse dentro del contenedor o distribuirse en bultos complementarios, de acuerdo con su masa, volumen y secuencia de utilización. La posibilidad de aprovechar el espacio interior representa una ventaja adicional, dado que permite utilizar el propio módulo como envoltorio de protección durante parte de la cadena logística. La definición final de la estiba requerirá comprobar la distribución de masas y la inmovilización de las piezas, sin que ello modifique la lógica modular propuesta.

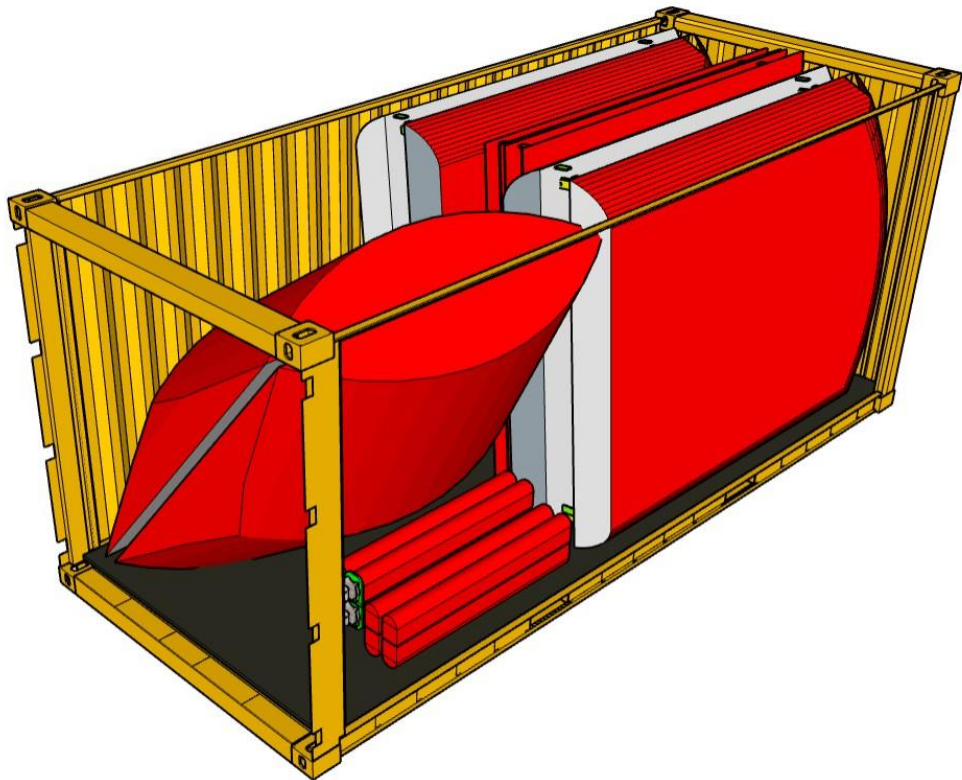


Figura 8.10: Configuración para transporte con los despieces del carenado y patas en su interior.

Para conservar las ventajas propias de la unidad intermodal, debería utilizarse un contenedor aprobado conforme al Convenio Internacional sobre la Seguridad de los Contenedores — CSC— y con su correspondiente placa de aprobación vigente.

8.3.2 Transporte aéreo propuesto mediante C-130 Hércules



Figura 8.11: Avión porta cargas C-130 Hercules (TC-70) de la Fuerza Aerea Argentina

La Base Marambio constituye la principal puerta de entrada de la logística aérea argentina en la Antártida. Su implantación sobre una meseta respondió precisamente a la necesidad de disponer de una pista operable con aeronaves de ruedas, y desde 1970 recibe operaciones de aviones C130 Hércules. En la actualidad, este medio continúa cumpliendo funciones regulares de abastecimiento, traslado de personal y transporte de materiales entre Río Gallegos y la base.

Esta conexión aérea permite plantear una cadena logística directa, sin necesidad de transferir el núcleo contenedor desde un buque hacia la meseta.

La compatibilidad preliminar puede evaluarse comparando las dimensiones exteriores del contenedor con las dimensiones generales publicadas para la bodega del C-130.

Tabla 8.6: Comparación dimensional preliminar entre un contenedor ISO 20 pies y la bodega del C-130 Hércules.

Parámetro	Contenedor ISO 20' tipo 1CC	Bodega C-130 E/H/J	Lectura preliminar
Longitud	6,06 m	12,31 m	Contenida dentro de la longitud útil publicada
Ancho	2,44 m	3,12 m	Contenido dentro del ancho de bodega
Altura	2,60 m	2,74 m	Contenida dentro de la altura publicada
Ancho de rampa posterior	2,44 m	3,02 m	Contenido dentro del ancho publicado de la rampa

Las dimensiones del contenedor corresponden a la designación ISO 1CC incluida en el estándar de transportabilidad del Departamento de Defensa de Estados Unidos. Las dimensiones de la bodega corresponden a la información oficial publicada para las variantes C-130E, **C-130H** y C130J.

La comparación muestra que el contenedor ISO de 20 pies queda comprendido dentro de la envolvente general publicada de la bodega. En particular, su longitud representa aproximadamente la mitad de la longitud útil, mientras que su ancho resulta inferior tanto al ancho de la bodega como al ancho informado para la rampa posterior. La altura presenta una holgura más reducida, pero continúa dentro del límite dimensional general indicado para la aeronave.

Este análisis no constituye por sí mismo una certificación de carga para los C-130 operados por la Fuerza Aérea Argentina, pero permite establecer una compatibilidad geométrica preliminar fundada. Además, existen antecedentes oficiales de sistemas logísticos militares que utilizan contenedores ISO de 20 pies y cuyas configuraciones de transporte se encuentran preplanificadas para aeronaves C-130. El Naval Sea Systems Command de la Marina de Estados Unidos informa, por ejemplo, que gran parte de su equipamiento de respuesta

ambiental se almacena en contenedores ISO de 20 pies preparados para movilización por carretera, vía marítima o transporte aéreo militar, con configuraciones previamente planificadas para C-130.

Desde el punto de vista de la capacidad de carga, la Fuerza Aérea de Estados Unidos publica para el C-130H una carga útil máxima admisible de referencia de 19.090 kg. Este valor no debe interpretarse como la capacidad disponible en cualquier vuelo hacia Marambio, ya que la carga admisible de cada misión depende de factores operativos como combustible, alcance, condiciones meteorológicas y configuración de la aeronave. Sin embargo, demuestra que el sistema fue concebido para el transporte de cargas de magnitud considerablemente superior a la tara de un contenedor vacío.

La masa relevante para la propuesta no será la capacidad máxima nominal del contenedor, sino la suma de:

- Tara del contenedor seleccionado
- Refuerzos y modificaciones incorporados
- Acondicionamiento interior
- Instalaciones y equipamiento
- Elementos desmontados transportados en su interior
- Dispositivos de apoyo, reparto y sujeción requeridos para la operación

Una vez definida esta configuración, el operador deberá establecer la masa bruta transportada, el centro de gravedad, la posición dentro de la bodega y el sistema de amarre. Estas comprobaciones forman parte del procedimiento normal de planificación de una carga aeronáutica y no modifican la prefactibilidad general de la alternativa.

La documentación operativa del C-130 establece que la configuración de las cargas debe ser desarrollada por personal especializado, considerando la distribución de pesos, el balance de la aeronave, la resistencia del piso, los medios de sujeción y el procedimiento de carga y descarga. Por lo tanto, la ingeniería de detalle de esta operación corresponderá a la Fuerza Aérea Argentina y al Comando Conjunto Antártico, una vez definida la masa y configuración definitiva del módulo.

Desde la perspectiva de esta tesina, la información disponible permite sostener que:

- El C-130 opera regularmente en Base Marambio
- El contenedor ISO 20' queda comprendido dentro de las dimensiones generales publicadas de su bodega
- Existen antecedentes oficiales de configuraciones ISO de 20 pies planificadas para esta aeronave
- El carácter desmontable de la propuesta permite conservar el gálibo del contenedor durante el traslado
- La verificación final puede integrarse al procedimiento habitual de planificación de cargas especiales

En consecuencia, el transporte aéreo mediante C-130 se adopta como estrategia logística principal para el caso de estudio.

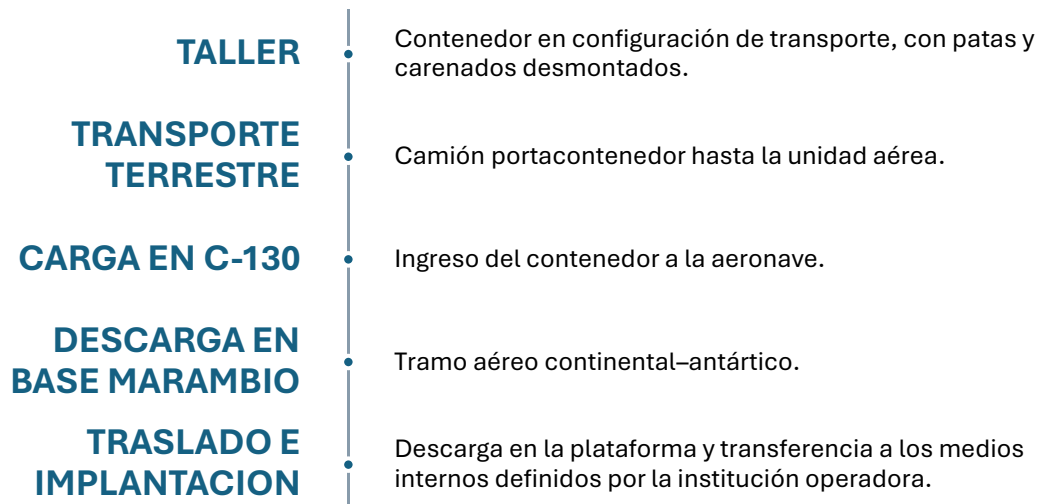


Figura 8.12: Cadena logística propuesta desde el taller de acondicionamiento hasta Base Marambio.

8.3.3 Alternativas logísticas complementarias

La selección del transporte aéreo para Marambio no excluye la posibilidad de utilizar otros medios dentro del sistema logístico antártico. El carácter desmontable de la propuesta permite distribuir el conjunto entre distintos modos de transporte según el destino, la disponibilidad de medios y la planificación de cada campaña.

El rompehielos ARA Almirante Irízar constituye el principal medio naval de abastecimiento de las bases argentinas. En las operaciones realizadas sobre Marambio, la transferencia de carga desde el buque hasta la base se efectúa mediante helicópteros Sea King, debido a la separación entre las zonas de fondeo y la meseta donde se encuentra la infraestructura.

Los Sea King utilizados por la Armada Argentina poseen una capacidad oficial publicada de hasta 2.700 kg de carga externa. Esta capacidad permite transportar materiales de construcción, equipos, combustible, vehículos livianos y otros componentes empleados durante las campañas antárticas. Para la propuesta V3, esta modalidad resultaría especialmente adecuada para componentes desmontados, tales como:

- Patas
- Placas base
- Paneles de carenado
- Cables y arriostramientos
- Bulonería y fijaciones
- Herramientas y repuestos

La subdivisión de los carenados en partes y el transporte separado de las patas reducen la masa y la superficie expuesta de cada carga, facilitando su adaptación a operaciones mediante helicóptero. La vía marítima-aérea podría emplearse así como complemento del traslado principal, por ejemplo, para distribuir materiales en diferentes etapas de campaña o evitar que todos los componentes deban ocupar la bodega del mismo vuelo.

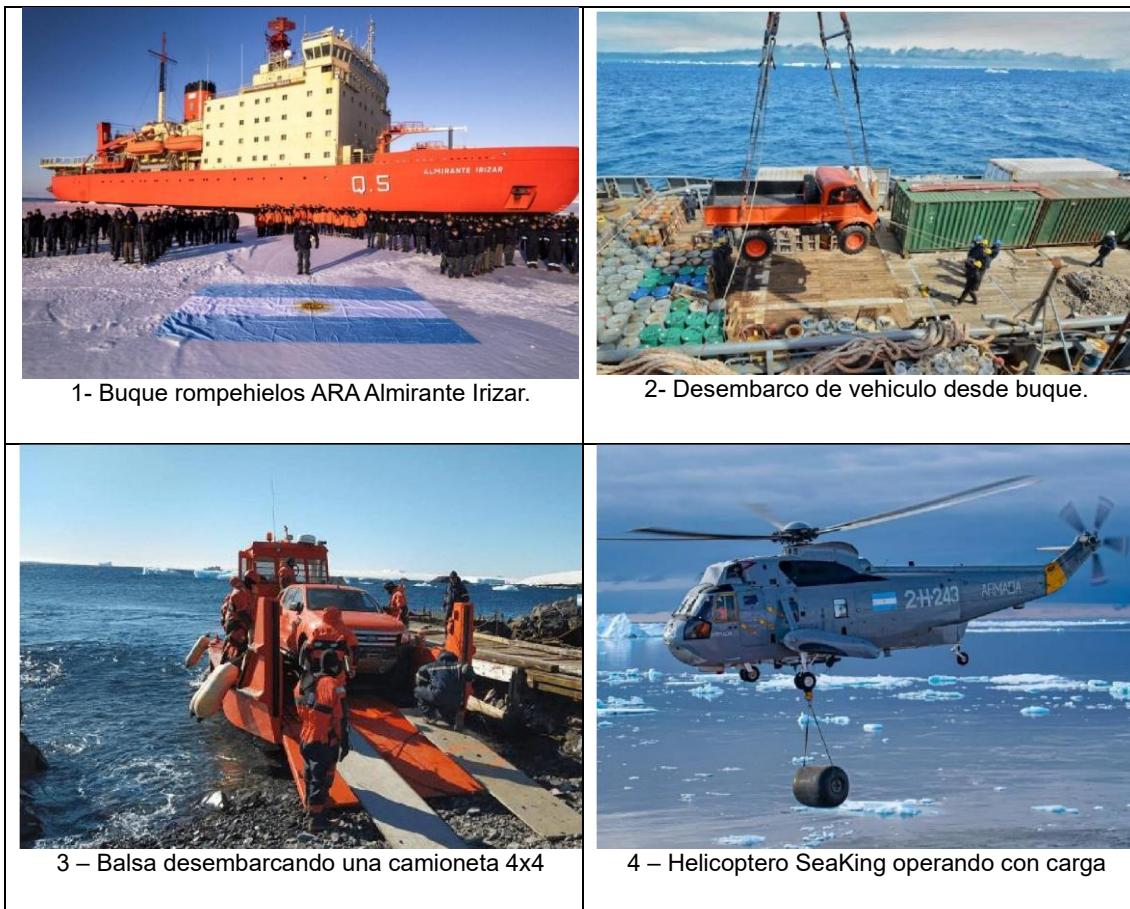
En bases o emplazamientos con acceso costero adecuado, el contenedor también podría trasladarse mediante el Irizar u otros buques logísticos y transferirse mediante embarcaciones de desembarco o equipos terrestres. Las campañas antárticas argentinas utilizan combinaciones de buques, helicópteros, aeronaves y embarcaciones menores en función de las condiciones particulares de cada base.

Por lo tanto, aunque el C-130 se adopta como medio principal para Marambio, la unidad ISO y la modularidad de los componentes conservan la posibilidad de emplear cadenas alternativas:

Tabla 8.7: Medios de transporte multimodal disponibles de la Armada Argentina.

Cadena logística	Aplicación preliminar
Transporte terrestre + C-130	Traslado principal del núcleo contenedor hasta Base Marambio
C-130 con componentes distribuidos	Traslado del núcleo y de las piezas en uno o más vuelos
Rompehielos Irizar + Helicóptero Sea-King	Transporte complementario de componentes desmontados
Rompehielos Irizar + Embarcación de desembarco	Aplicación potencial en bases con accesibilidad costera (Carlini, Esperanza, Petrel)
Transporte combinado aéreo-marítimo	Distribución de cargas según masa, volumen y prioridad operativa

Figura 8.13: Conjunto de imágenes de operaciones antárticas:



Esta flexibilidad constituye una ventaja del sistema propuesto. La envolvente aerodinámica no obliga a transportar una pieza exterior sobredimensionada, sino que puede descomponerse y asignarse al medio más conveniente dentro de la campaña.

8.3.4 Síntesis de prefactibilidad logística

La estrategia analizada permite considerar logísticamente prefactible el traslado de la variante V3 a Base Marambio. La configuración mantiene al contenedor ISO de 20 pies como unidad principal, con sus *corner fittings* accesibles y sin componentes que excedan su envolvente normalizada.

Se adopta como alternativa principal el transporte aéreo mediante C-130 Hércules, ya que permite conectar directamente el territorio continental con Marambio. El contenedor se encuentra dentro de la envolvente general publicada para la bodega y existen antecedentes oficiales del transporte de configuraciones ISO de 20 pies en aeronaves C-130. La masa final, distribución de cargas, apoyos, amarres y procedimientos de carga y descarga deberán definirse al completar el desarrollo técnico, mediante las verificaciones habituales del operador junto con el Comando Conjunto Antártico.

9. Conclusiones

9.1 Resultado general de la investigación

La investigación permite afirmar que una modificación geométrica de un módulo habitacional basado en un contenedor ISO de 20 pies logra reducir la predisposición aerodinámica a la acumulación de nieve a sotavento. Los resultados respaldan la hipótesis, demostrando que la elevación y el tratamiento de la envolvente exterior mejoran la circulación del flujo alrededor y bajo el módulo.

Al comparar la configuración final (Variante V3) con la condición prismática apoyada (Variante V0), se evidencian las siguientes mejoras sustanciales:

- **Reducción de recirculación:** La longitud máxima de la estela de recirculación a sotavento disminuyó en un 88%, pasando de 7,12 m a 0,86 m.
- **Desempeño aerodinámico:** El coeficiente de arrastre normalizado se redujo en un 45% y la presión media posterior se recuperó de -142,89 Pa a -5,56 Pa.
- **Circulación inferior:** Se logró generar un caudal de ventilación de 87,89 m³/s e incrementar el esfuerzo cortante sobre el suelo a sotavento de 0,30 Pa a 0,92 Pa, reduciendo las condiciones de estancamiento asociadas a la deposición de nieve.

9.2 Principales conclusiones del proceso de diseño

El desarrollo iterativo permitió identificar el aporte y los límites específicos de cada transformación geométrica:

- **Elevación (V1):** Demostró ser fundamental para desvincular la estela del terreno y habilitar la circulación inferior, aunque por sí sola no redujo la resistencia global al viento.
- **Carenado frontal (V2):** Logró suavizar el encuentro con el flujo y disminuir considerablemente el arrastre, pero evidenció que mejorar la zona de incidencia no resuelve automáticamente la extensión de la recirculación posterior.
- **Corrección de cola (V2B):** Confirmó que los problemas de sensibilidad ante cambios de dirección del viento no se solucionan con ajustes locales en los bordes.
- **Simetrización final (V3):** Integró los beneficios previos, eliminó la asimetría longitudinal que originaba la sensibilidad direccional identificada en V2 y V2B, y obtuvo el comportamiento aerodinámico más consistente y equilibrado del conjunto analizado.

9.3 Alcance y prefactibilidad de la propuesta

El análisis preliminar permite considerar favorable la prefactibilidad de la propuesta y no identifica, dentro del nivel de desarrollo alcanzado, incompatibilidades que impidan avanzar hacia una etapa posterior de ingeniería:

- **Prefactibilidad constructiva:** El sistema aprovecha el bastidor de un contenedor ISO de 20 pies y emplea twistlocks normalizados para la fijación de las patas. Los carenados se diseñaron como paneles desmontables con pestañas, facilitando su fabricación mediante procesos metalúrgicos convencionales de rolado, plegado y soldadura.
- **Estimación económica:** El análisis paramétrico permitió establecer un orden de magnitud de la inversión, diferenciando el costo base de los materiales del costo agregado por la transformación de la envolvente.
- **Estrategia logística:** El diseño desmontable permite conservar al contenedor ISO de 20 pies como unidad principal de transporte, manteniendo accesibles sus corner fittings y evitando componentes que excedan su envolvente normalizada. La comparación dimensional y los antecedentes oficiales analizados respaldan preliminarmente la compatibilidad del transporte aéreo mediante C-130 Hércules hacia Base Marambio. La definición final de masa, distribución de cargas, apoyos, amarres y procedimientos de carga y descarga queda sujeta a las verificaciones correspondientes del operador.

9.4 Limitaciones y desarrollos futuros

Las conclusiones obtenidas deben interpretarse dentro de los alcances del modelo computacional (CFD) estacionario y monofásico utilizado, el cual evalúa proxies aerodinámicos, pero no simula explícitamente el transporte de partículas de nieve ni la evolución de los depósitos.

Para consolidar el proyecto hacia una etapa ejecutiva, las futuras líneas de trabajo deberán enfocarse en:

- **Validación del fenómeno:** Aplicar modelos multifásicos con simulación de nieve y realizar validaciones experimentales mediante ensayos en túnel de viento o mediciones directas en campo.
- **Ingeniería de detalle:** Ejecutar verificaciones estructurales definitivas, diseñar fundaciones adaptadas a las exigencias geotécnicas del suelo antártico y resolver el acondicionamiento térmico interior.
- **Planificación operativa:** Detallar la distribución de masas para las maniobras de estiba e izaje de la estructura.

10. Referencias

10.1 Referencias del Capítulo 2 – Marco teórico

Aynsley, R. M., Melbourne, W. H. y Vickery, B. J. (1977). *Architectural Aerodynamics*. Applied Science Publishers.

Kind, R. J. (1981). Snow drifting. En D. M. Gray y D. H. Male (Eds.), *Handbook of Snow: Principles, Processes, Management and Use* (pp. 338–359). Pergamon Press.

Lawson, T. (2001). *Building Aerodynamics*. Imperial College Press / World Scientific.

Pomeroy, J. W. y Gray, D. M. (1990). Saltation of snow. *Water Resources Research*, 26(7), 1583–1594. DOI: 10.1029/WR026i007p01583.

Pomeroy, J. W. y Gray, D. M. (1995). *Snowcover: Accumulation, Relocation and Management*. National Hydrology Research Institute Science Report No. 7. Environment Canada.

Schlichting, H. y Gersten, K. (2017). *Boundary-Layer Theory* (9.ª ed.). Springer.

Simiu, E. y Scanlan, R. H. (1996). *Wind Effects on Structures: Fundamentals and Applications to Design* (3.ª ed.). John Wiley & Sons.

Tabler, R. D. (2003). *Controlling Blowing and Drifting Snow with Snow Fences and Road Design*. Final Report, NCHRP Project 20-7(147). Tabler and Associates / National Cooperative Highway Research Program.

Tominaga, Y. (2018). Computational fluid dynamics simulation of snowdrift around buildings: Past achievements and future perspectives. *Cold Regions Science and Technology*, 150, 2–14. DOI: 10.1016/j.coldregions.2017.05.004.

10.2 Referencias del Capítulo 3 – Estado del arte y antecedentes

Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. (2016). Neumayer III and Kohnen Station in Antarctica operated by the Alfred Wegener Institute. *Journal of Large-Scale Research Facilities*, 2, A85. DOI: 10.17815/jlsrf-2-152.

Beyers, M., Harms, T. y Stander, J. (2010). Mitigating snowdrift at the elevated SANAE IV research station in Antarctica: CFD simulation and field application. En *Proceedings of the Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, Chapel Hill, North Carolina, Estados Unidos.

British Antarctic Survey. (2007). Proposed construction and operation of Halley VI Research Station and demolition and removal of Halley V Research Station, Brunt Ice Shelf, Antarctica: Final Comprehensive Environmental Evaluation. British Antarctic Survey.

Chen, X. y Yu, Z. (2022). DriftScalarDyFoam: An OpenFOAM-Based Multistage Solver for Drifting Snow and Its Distribution Around Buildings. *Frontiers in Earth Science*, 10, 822140. DOI: 10.3389/feart.2022.822140.

Council of Managers of National Antarctic Programs (COMNAP). (2017). Antarctic Station Catalogue. COMNAP Secretariat. ISBN 978-0-473-40409-3.

Kang, L., Zhou, X., van Hooff, T., Blocken, B. y Gu, M. (2018). CFD simulation of snow transport over flat, uniformly rough, open terrain: Impact of physical and computational parameters. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 177, 213–226. DOI: 10.1016/j.jweia.2018.04.014.

Novoa, R. E., Díaz, D. O. y Rueda, J. (2020). Modelación de acción viento y nieve sobre estructuras en caso de climas extremos. *Revista Digital del Departamento de Ingeniería e Investigaciones Tecnológicas*, 5(2), 1–9.

Sanz Rodrigo, J., van Beeck, J. y Buchlin, J.-M. (2012). Wind engineering in the integrated design of Princess Elisabeth Antarctic base. *Building and Environment*, 52, 1–18. DOI: 10.1016/j.buildenv.2011.12.023.

Thiis, T. K. (2000). A comparison of numerical simulations and full-scale measurements of snowdrifts around buildings. *Wind and Structures*, 3(2), 73–81. DOI: 10.12989/was.2000.3.2.073.

Tominaga, Y., Okaze, T. y Mochida, A. (2011). CFD modeling of snowdrift around a building: An overview of models and evaluation of a new approach. *Building and Environment*, 46(4), 899–910. DOI: 10.1016/j.buildenv.2010.10.020.

10.3 Referencias del Capítulo 4 – Contexto de aplicación

Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, Dirección Nacional del Antártico. (s. f.). Bases Antárticas argentinas. Gobierno de la República Argentina.

Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, Dirección Nacional del Antártico. (s. f.). Logística y medios de transporte. Gobierno de la República Argentina.

Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, Dirección Nacional del Antártico. (s. f.). Marambio. Gobierno de la República Argentina.

Servicio Meteorológico Nacional. (s. f.). Datos meteorológicos horarios. Datos Argentina, Gobierno de la República Argentina.

World Meteorological Organization. (s. f.). Clarification on wind direction code 99 in WDQMS. WIGOS Learning Portal.

10.4 Referencias del Capítulo 5 – Criterios de diseño y definición de variantes

International Organization for Standardization. (2020). ISO 668:2020. Series 1 freight containers — Classification, dimensions and ratings (7th ed.). ISO.

International Organization for Standardization. (2022). ISO 6346:2022. Freight containers — Coding, identification and marking (4th ed.). ISO.

10.5 Referencias del Capítulo 6 – Metodología de evaluación

Menter, F. R. (1994). Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8), 1598–1605. DOI: 10.2514/3.12149.

SimScale GmbH. (2026). Incompressible Fluid Flow Analysis. SimScale Documentation.

10.6 Referencias del Capítulo 8 – Prefactibilidad

10.6.1 Normativa y prefactibilidad constructiva

Bjella, K. L., Shur, Y., Kanevskiy, M., Duvoy, P., Grunau, B., Best, J., Bourne, S. y Affleck, R. T. (2020). Improving Design Methodologies and Assessment Tools for Building on Permafrost in a Warming Climate (ERDC/CRREL TR-20-13). U.S. Army Engineer Research and Development Center, Cold Regions Research and Engineering Laboratory. DOI: 10.21079/11681/38879.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial – CIRSOC. (2025). Reglamento CIRSOC 101-25: Reglamento Argentino de Cargas Permanentes y Sobrecargas Mínimas de Diseño para Edificios y Otras Estructuras. INTI-CIRSOC.

International Maritime Organization, International Labour Organization y United Nations Economic Commission for Europe. (2014). IMO/ILO/UNECE Code of Practice for Packing of Cargo Transport Units (CTU Code).

International Organization for Standardization. (2013). ISO 1496-1:2013. Series 1 freight containers — Specification and testing — Part 1: General cargo containers for general purposes (6th ed.). ISO.

Organización Marítima Internacional. (s. f.). Convenio internacional sobre la seguridad de los contenedores (CSC), 1972. International Maritime Organization.

10.6.2 Estimación económica

Banco de la Nación Argentina. (2026, 27 de julio). Cotizaciones de divisas en el Mercado Libre de Cambios. Banco de la Nación Argentina.

Hierros Torrent. (s. f.). Chapa Lisa LAF N.º 16 (1,59 mm) de 1,50 × 3,00 m, acero SAE 1010. Consultado el 27 de julio de 2026.

Instituto Nacional de Estadística y Censos (INDEC). (s. f.). Cuadros de oferta y utilización (COU): Cuadro de oferta y utilización 2023. INDEC.

MAQPRO. (s. f.). Cable de acero galvanizado 8 mm, 6 × 19, 50 m, Duroll [Publicación comercial]. Consultado el 27 de julio de 2026.

Martel Pinturerías. (s. f.). Sintoplast Esmalte Industrial DTM Anticorrosivo Negro, 20 L. Consultado el 27 de julio de 2026.

Mega Containers Argentina. (s. f.). Precio de container usado en Argentina. Consultado el 27 de julio de 2026.

Provecom. (s. f.). Tubo estructural soldado 120 × 120 × 3,2 mm, barra de 6 m. Consultado el 27 de julio de 2026.

Universal Container Services Ltd. (s. f.). Twist Lock Fixing Plate. Consultado el 27 de julio de 2026.

Vagolnet. (s. f.). Tensor ojo–gancho x4 unidades para cable de acero de 8 mm (5/16”), Bremen 3564. Consultado el 27 de julio de 2026.

10.6.3 Prefactibilidad logística

Armada Argentina. (2019, 21 de noviembre). Se incorporaron los helicópteros Sea King a bordo del rompehielos ARA “Almirante Irizar”. Argentina.gob.ar.

Armada Argentina. (2021, 17 de marzo). El rompehielos ARA “Almirante Irizar” finalizó el reabastecimiento de la Base Conjunta Antártica Marambio. Argentina.gob.ar.

Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, Dirección Nacional del Antártico. (s. f.). Marambio: Bases Antárticas argentinas. Gobierno de la República Argentina.

United States Air Force, Air Mobility Command. (s. f.). C-130 Hercules. United States Air Force.

United States Department of Defense. (2006). MIL-STD-1366E: Interface Standard for Transportability Criteria. Defense Logistics Agency.

United States Navy, Naval Sea Systems Command. (s. f.). ESSM: Environmental equipment. Naval Sea Systems Command.

10.7 Créditos de figuras y material gráfico externo

Las figuras, esquemas, renders, visualizaciones CFD y gráficos no incluidos en el presente apartado corresponden a elaboración propia. Las siguientes fuentes corresponden al material gráfico externo incorporado en el documento.

Figura 3.1 – Estación SANAE IV. South African National Antarctic Programme (SANAP). (s. f.). SANAE IV Antarctica [Material gráfico institucional].

Figura 3.2 – Estación Halley VI. British Antarctic Survey. (s. f.). Halley VI Research Station [Material gráfico institucional].

Figura 3.3 – Estación Comandante Ferraz. Mies Crown Hall Americas Prize. (s. f.). Comandante Ferraz Antarctic Station [Fotografías de Leonardo Finotti].

Figura 3.4 – Princess Elisabeth Antarctica. International Polar Foundation. (2008, 5 de marzo). The finished building [Galería fotográfica].

Figura 3.5 – Estación Neumayer III. Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. (s. f.). Neumayer Station III [Material gráfico institucional].

Figura 3.6 – Bharati Research Station. Bof Architekten. (2013). Indian Research Base [Material gráfico del proyecto]. En ArchDaily, Indian Research Base / Bof Architekten. Fotografías acreditadas a NCAOR y diagramas a Bof Architekten.

Figura 3.7 – Kohnen Station. Alfred-Wegener-Institut Helmholtz-Zentrum für Polar- und Meeresforschung. (s. f.). Kohnen Station [Material gráfico institucional].

Figura 3.8 – Amundsen-Scott South Pole Station. National Science Foundation. (2023). NSF's Amundsen-Scott South Pole Station [Material gráfico institucional]. U.S. Antarctic Program.

Figura 3.9 – Dirck Gerritsz Laboratory. British Antarctic Survey. (2013, 28 de enero). New Research Laboratory opened at Rothera Research Station [Material gráfico institucional].

Figura 3.10 – Scott Base. Antarctica New Zealand. (s. f.). Scott Base [Material gráfico institucional].

Figura 5.4 – Transporte aéreo de un módulo de 20 pies destinado a Base Carlini. 4housing. (2016, 25 de abril). 4housing llegó a la Antártida [Fotografía].

Figura 5.5 – Contenedor ISO de 20 pies adoptado como referencia dimensional. Pelican Containers. (2022). 20 Ft Standard Container [Ficha técnica e ilustración dimensional].

Figura 8.11 – C-130 Hércules de la Fuerza Aérea Argentina. Bardón, D. O. (2020, 17 de enero). C-130 Hércules de la Fuerza Aérea Argentina en operación antártica [Fotografía]. En Zona Militar, Un C-130 Hércules de la Fuerza Aérea Argentina realiza evacuación en la Antártida (Galería).

11. Anexos

11.1 ANEXO A – Resultados CFD complementarios

El presente anexo reúne las visualizaciones complementarias utilizadas para respaldar la lectura aerodinámica desarrollada en el Capítulo 7. Su incorporación permite ampliar la trazabilidad de los resultados sin trasladar al cuerpo principal una descripción exhaustiva de cada campo analizado.

Las láminas correspondientes a casos comparables mantienen criterios homogéneos de variable, escala y posición de corte. En primer lugar, se presentan los resultados correspondientes a la comparación principal entre las variantes V0, V1, V2, V2B y V3 bajo una velocidad de ingreso de 30 m/s, dirección +X e incidencia normal. Posteriormente se incorpora la comparación específica entre V2 y V2B con flujo inverso y, finalmente, los tres casos de sensibilidad evaluados sobre la variante V3.

Tabla 11.1. Índice de láminas CFD complementarias.

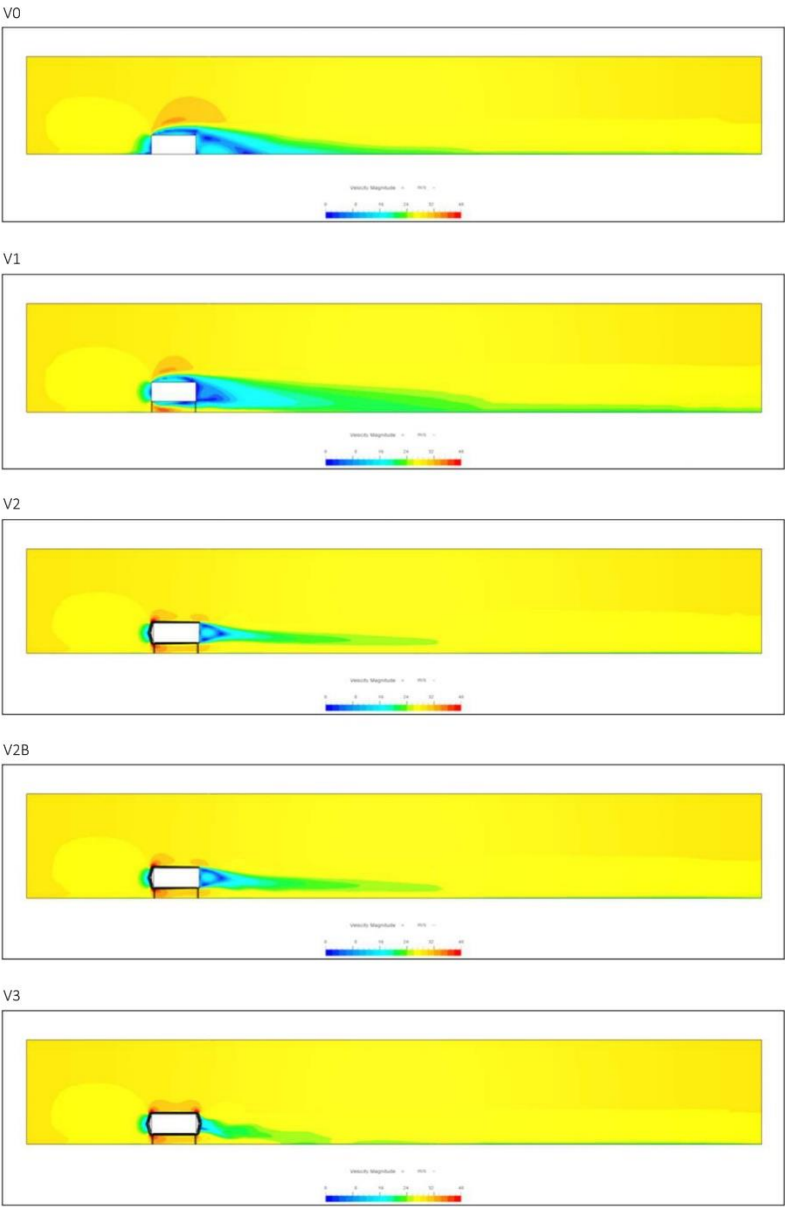
Lámina	Contenido
A.1.1 A.1.2 A.1.3	Campos de velocidad – comparación principal V0–V3
A.2	
A.3.1 A.3.2	
A.4	Región de recirculación – isovolumen de velocidad longitudinal negativa
A.3.1 A.3.2	Energía cinética turbulenta – comparación principal V0–V3
A.4	
A.5	Esfuerzo cortante sobre el suelo – comparación principal V0–V3
A.5	Comparación V2–V2B con flujo inverso
A.6	Sensibilidad de V3 frente a una velocidad de 8 m/s
A.7	Sensibilidad de V3 frente a una velocidad de 50 m/s
A.8	Sensibilidad de V3 frente a una incidencia oblicua de 15°

11.1.1 Comparación principal de variantes

Lamina A.1.1:

[PLANO XZ – VELOCITY MAGNITUDE]

Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0°



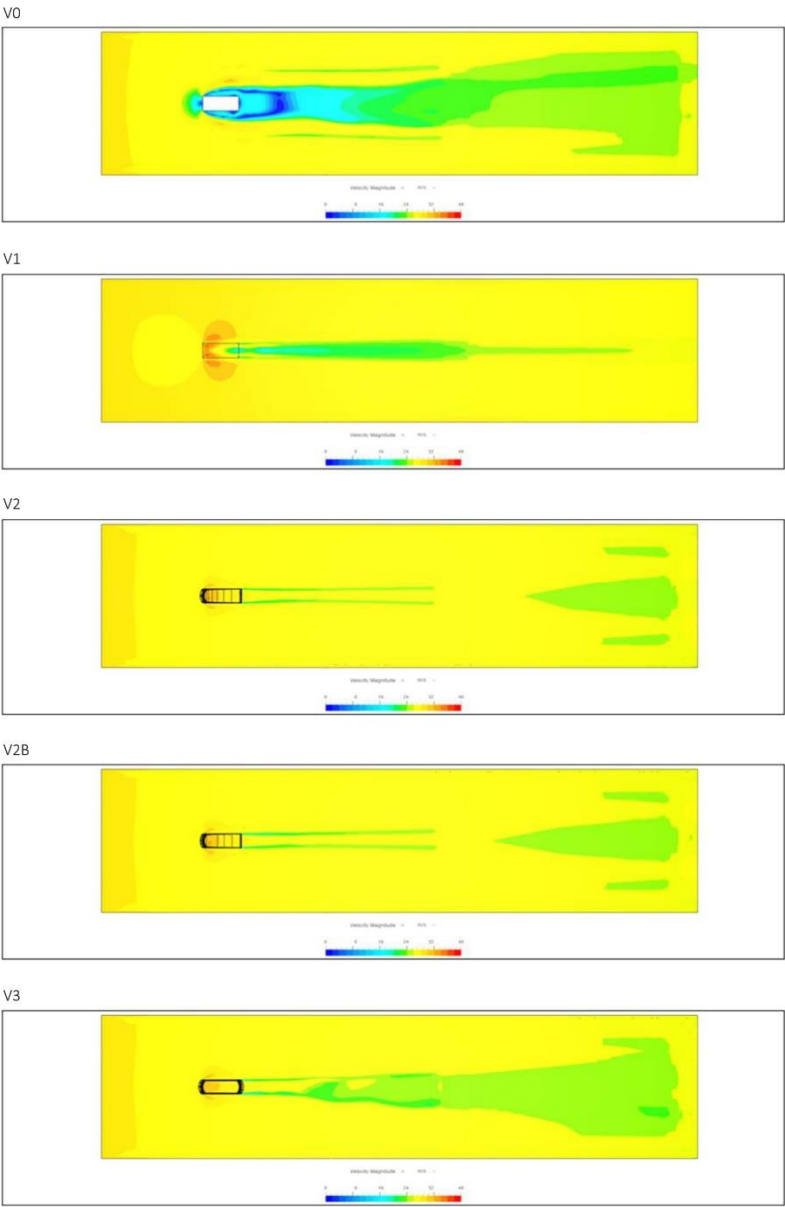
Escala de colores: [rango: 0 - 40 m/s]. Corte: [Y=0m].
Las imágenes mantienen igual variable, escala y criterio de visualización.

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

Lamina A.1.2:

[PLANO XY – VELOCITY MAGNITUDE]

Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0°



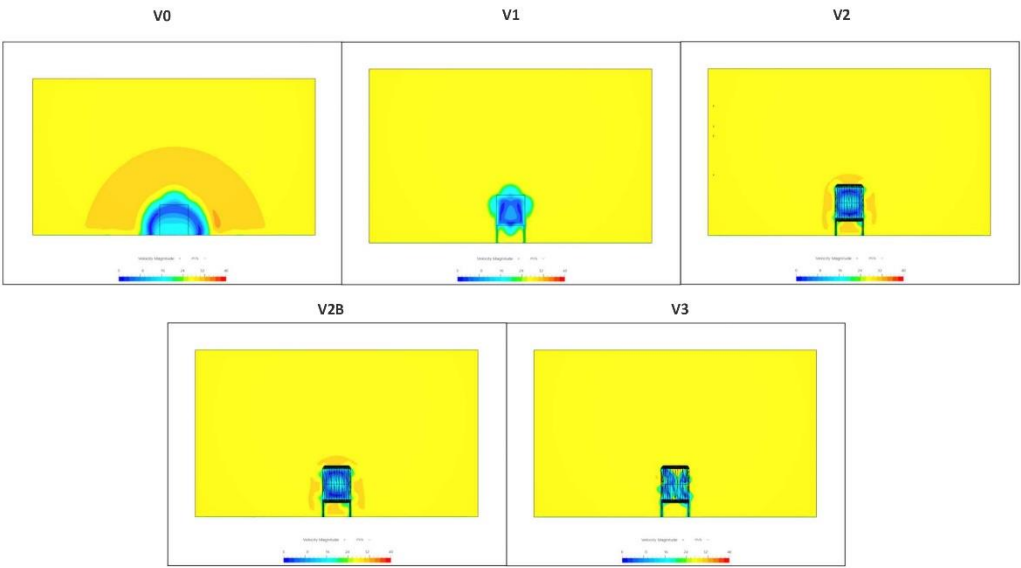
Escala de colores: [rango: 0 - 40 m/s]. Corte: [Z=0.15m].
Las imágenes mantienen igual variable, escala y criterio de visualización.

Fuente: elaboración propia en base a
resultados CFD SimScale.

Lamina A.1.3:

[PLANO YZ – VELOCITY MAGNITUDE]

Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0°



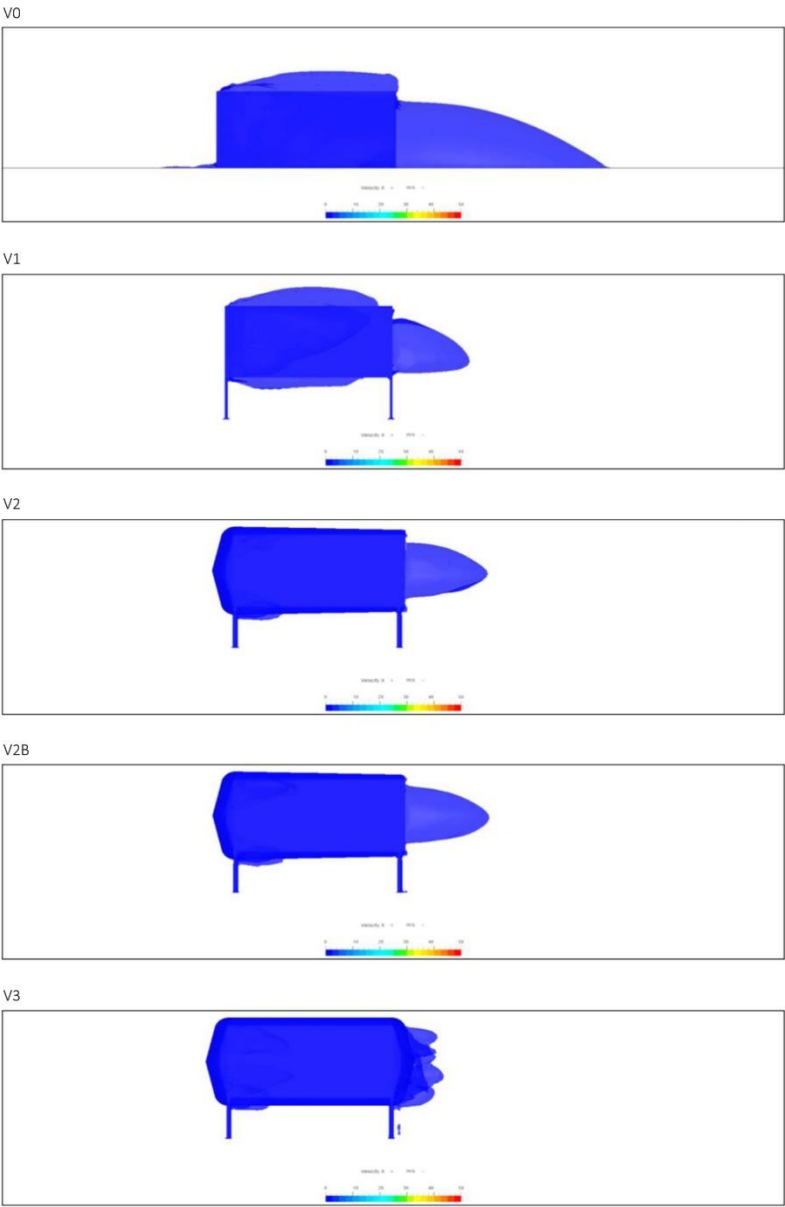
Escala de colores: [0 – 40 m/s]. Corte: [X = Xsota + 1m].
Las imágenes mantienen igual variable, escala y criterio de visualización.

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

Lamina A.2:

[PLANO XZ – ISOVOLUME $U_x \leq 0$]

Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0°



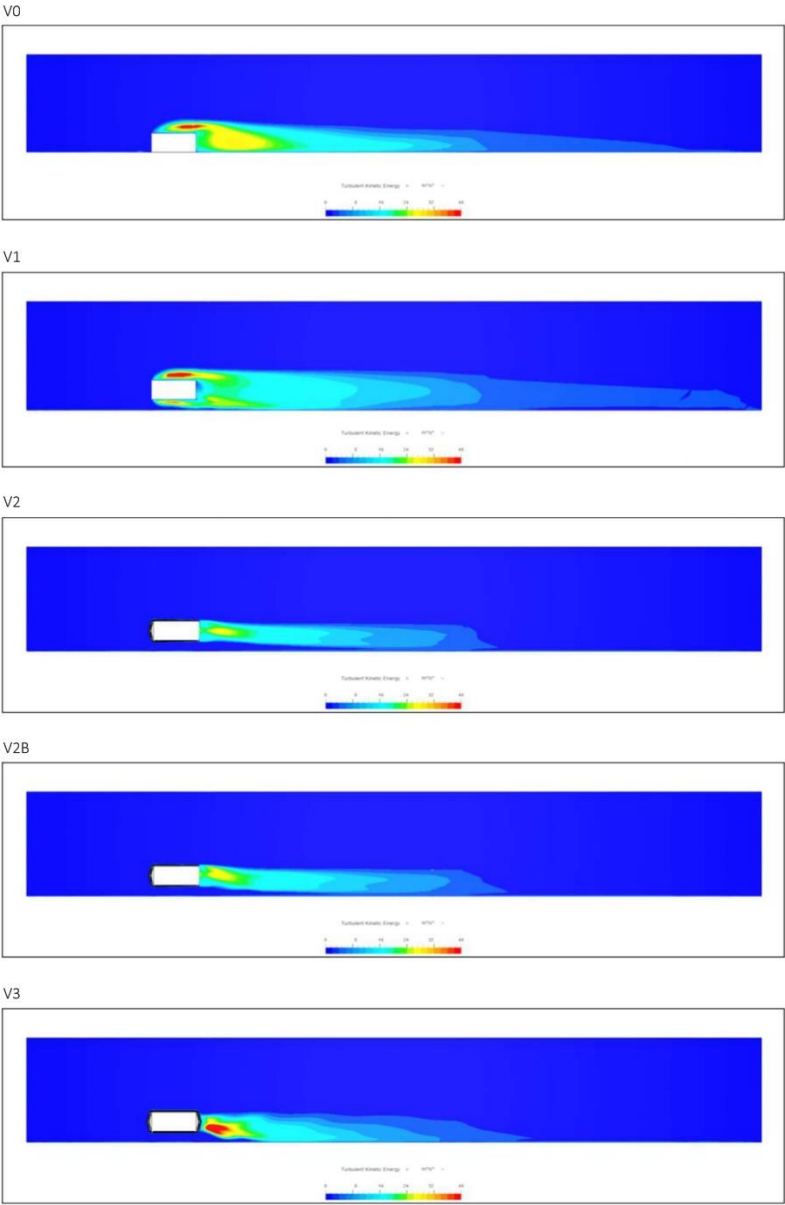
Escala de colores: [rango: 0 - 50 m/s]. Corte: [Y=0m].
Las imágenes mantienen igual variable, escala y criterio de visualización.

Fuente: elaboración propia en base a
resultados CFD SimScale.

Lamina A.3.1:

[PLANO XZ – TURBULENT KINETIC ENERGY]

Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección +X | Ángulo 0°



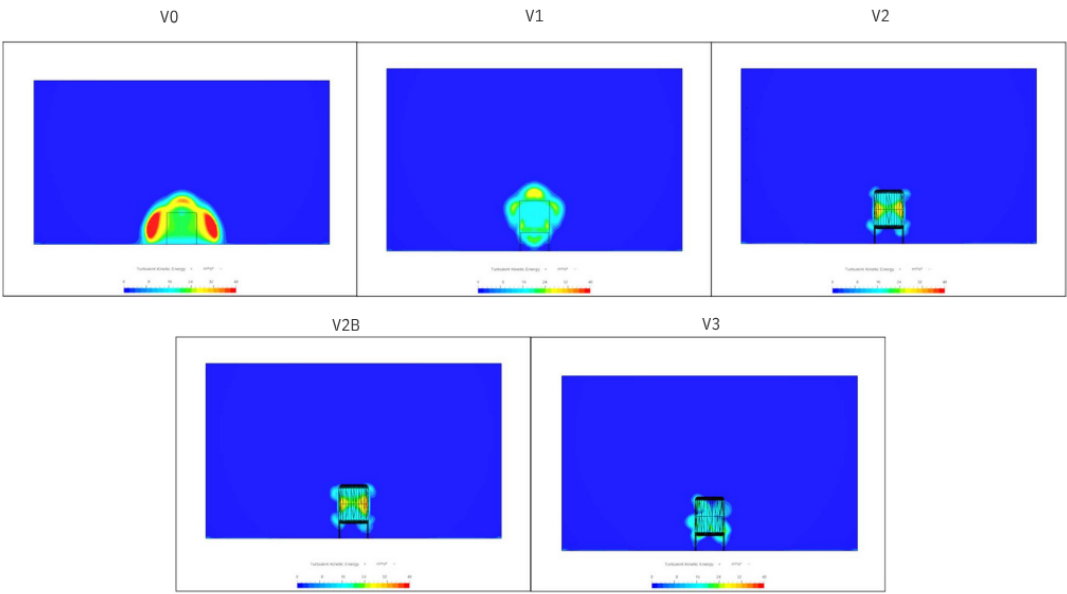
Escala de colores: [rango: 0 - 40 m²/s²]. Corte: [Y=0m].
Las imágenes mantienen igual variable, escala y criterio de visualización.

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

Lamina A.3.2:

[PLANO YZ –TURBULENT KINETIC ENERGY]

Simulación CFD [Velocity inlet 30m/s] Dirección +X| Ángulo 0 °

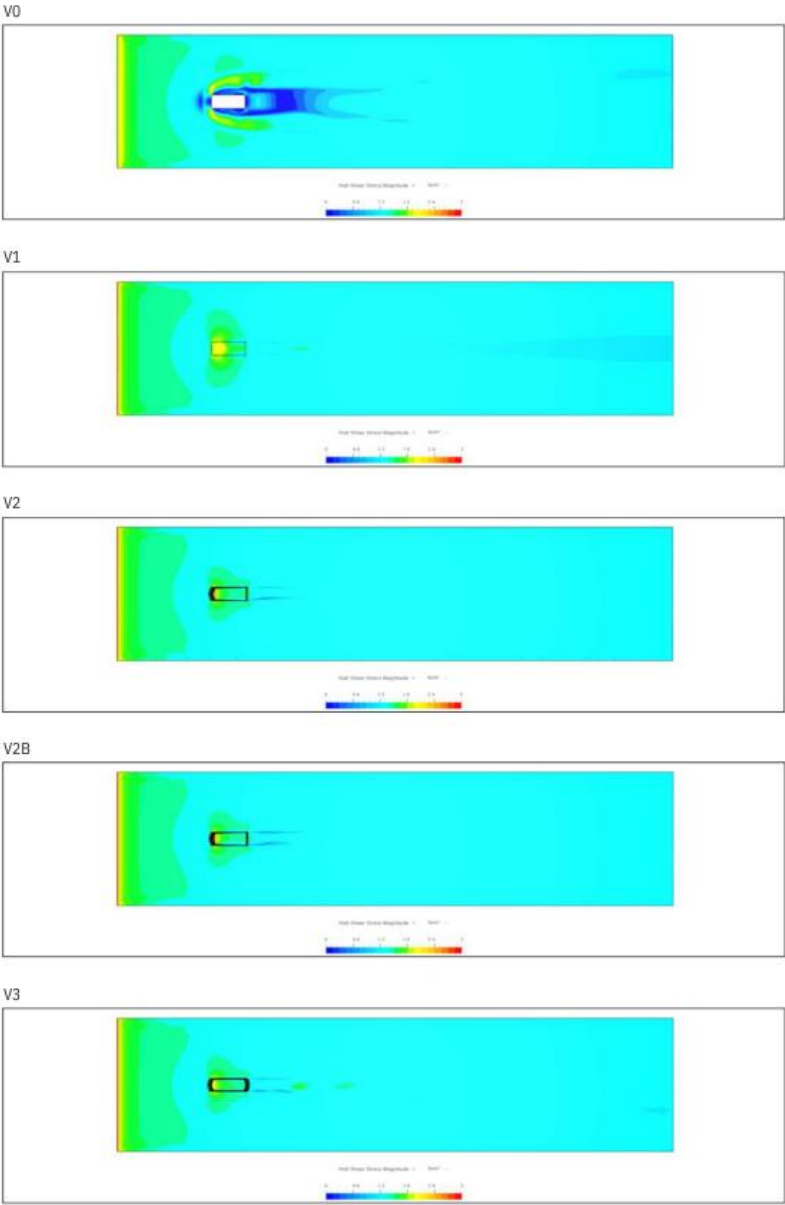


Escala de colores: [0 ~40 m²/s²];Corte: [X = Xsota+ 1m].
Las imágenes mantienen igual variable, escala y criterio de visualización.

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

[PLANO XY –WALL SHEAR STRESS -SUELO]

Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección+X | Ángulo0°



Escala de colores: [rango: 0 –3 N/m²]. Superficie evaluada: [Suelo].
Las imágenes mantienen igual variable, escala y criterio de visualización.

Fuente: elaboración propia en base a
resultados CFD SimScale.

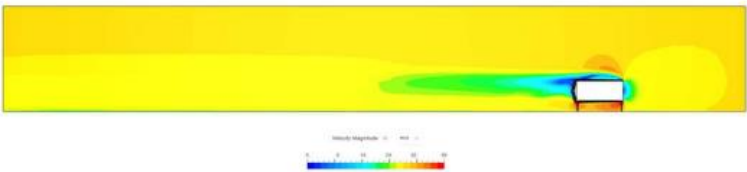
11.1.2 Evaluación específica con flujo inverso

Como verificación de la sensibilidad de la cola direccional desarrollada en V2, se presentan los campos de velocidad correspondientes a V2 y V2B bajo una velocidad de ingreso de 30 m/s, dirección -X y ángulo de incidencia de 0°

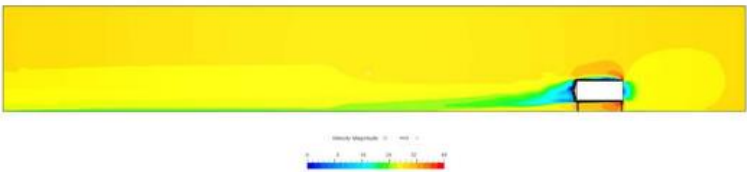
Lamina A.5:

[PLANO XZ / XY –VELOCITY MAGNITUDE –SENTIDO OPUESTO]
Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección-X | Ángulo0°

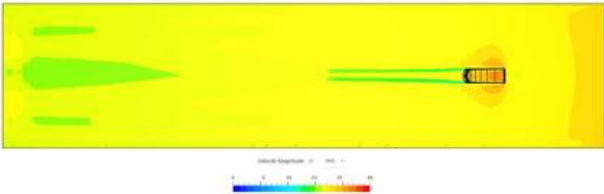
V2 –Plano XZ



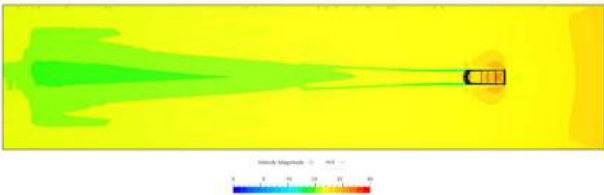
V2B –Plano XZ



V2 –Plano XY



V2B –Plano XY



Escala de colores: [rango: 0 -40 m/s].
Corte Plano XZ: [Y=0].
Corte Plano XY: [Z=0.15m].

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

11.1.3 Análisis de sensibilidad de V3

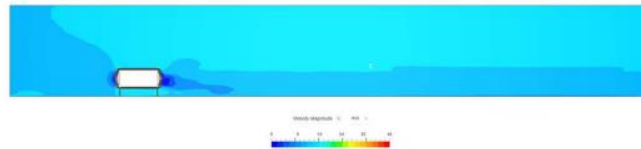
Los casos analizados no buscan definir condiciones extremas de deposición, sino verificar en qué medida la organización aerodinámica de la propuesta resulta sensible a variaciones.

Lámina A.6:

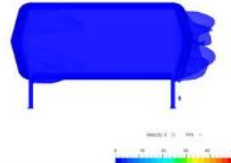
[SENSIBILIDAD V3 -8 m/s]

Simulación CFD | Velocity inlet 8 m/s | Dirección+X | Ángulo0°

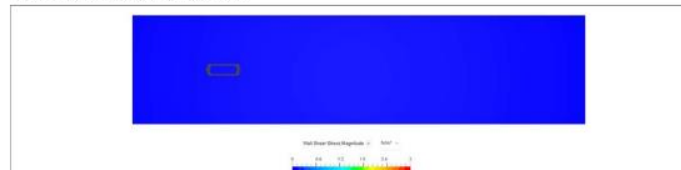
V3 -8 -Plano XZ -Velocity Magnitude



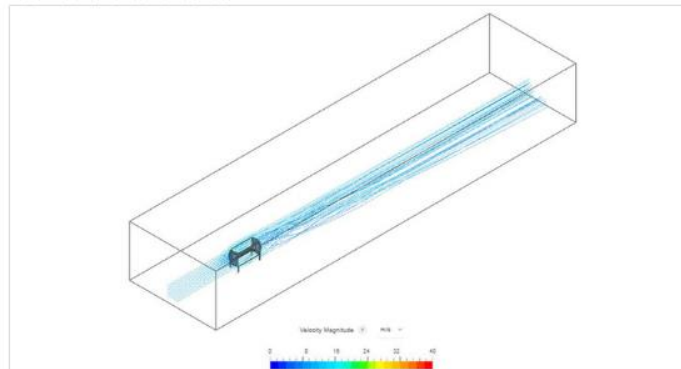
V3 -8 -Plano XZ -IsovolumeUx≤ 0



V3 -8 -Plano XY -Wall Shear Stress -Suelo



V3 -8 -Vista Isométrica -Particle Trace



Corte Plano XZ Vel Mag: [Y=0m] -[rango: 0 -40 m/s].
Corte Plano XZ Iso Vol: [Y=0m] -[rango: 0 -40 m/s].
Vista Plano XY WSS: Superficie evaluada: [Suelo] -[rango: 0 -0.12 N/m²].
Vista Isométrica Particle trace -[rango: 0 -40 m/s].

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

La escala 0-40 m/s se mantiene para conservar la comparabilidad visual con el caso base de 30 m/s. Debido a la menor velocidad del caso analizado, las diferencias internas del campo presentan menor contraste dentro de esta escala común.

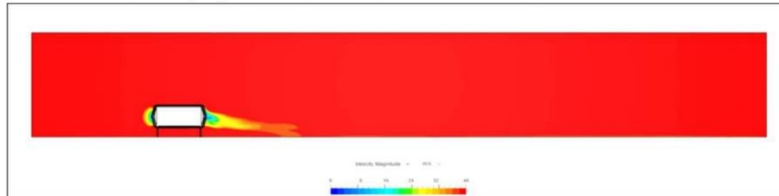
A 8 m/s, V3 mantiene prácticamente los mismos valores de coeficiente de arrastre y longitud de recirculación obtenidos a 30 m/s, con $C_d \approx 0,55$ y $L_r \approx 0,86$ m. Sin embargo, los esfuerzos cortantes disminuyen marcadamente, hasta 0,08 Pa a sotavento y 0,12 Pa bajo el módulo, mientras que el caudal inferior se reduce a 23,29 m³/s. El resultado indica que la organización general de la estela se conserva, aunque con una intensidad considerablemente menor de interacción entre el flujo y el suelo.

Lamina A.7:

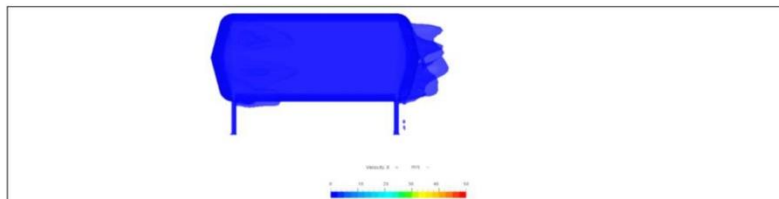
[SENSIBILIDAD V3 - 50 m/s]

Simulación CFD | Velocity inlet 50 m/s | Dirección +X | Ángulo 0°

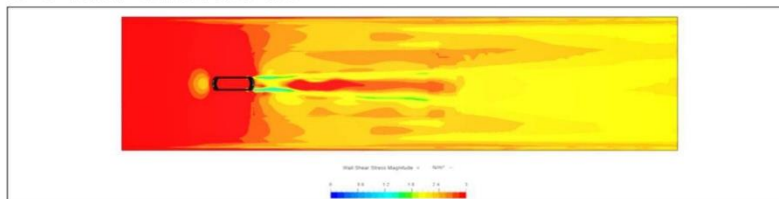
V3 – 50 – Plano XZ – Velocity Magnitude



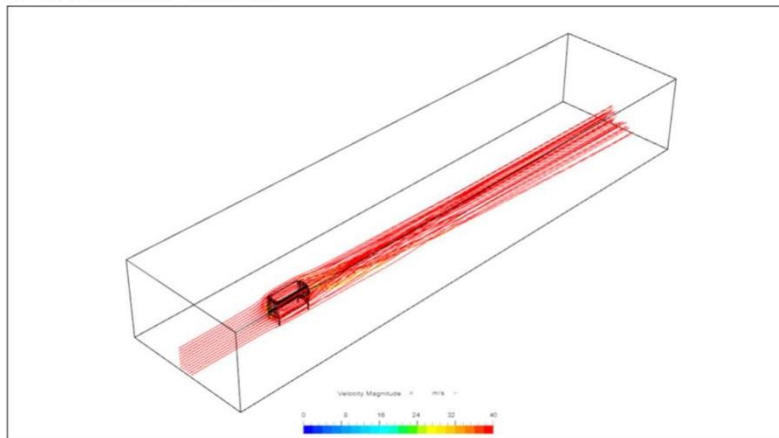
V3 – 50 – Plano XZ – Isovolume Ux ≤ 0



V3 – 50 – Plano XY – Wall Shear Stress - Suelo



V3 – 50 – Vista Isométrica – Particle Trace



Corte Plano XZ Vel Mag: [Y=0m] - [rango: 0 - 40 m/s].
Corte Plano XZ Iso Vol: [Y=0m] - [rango: 0 - 50 m/s].
Vista Plano XY WSS: Superficie evaluada: [Suelo] - [rango: 0 - 3 N/m²].
Vista Isométrica Particle trace: [rango: 0 - 40 m/s].

La escala 0-40 m/s se mantiene para comparación visual con el caso base de 30 m/s, por lo que sectores del campo pueden quedar saturados.

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

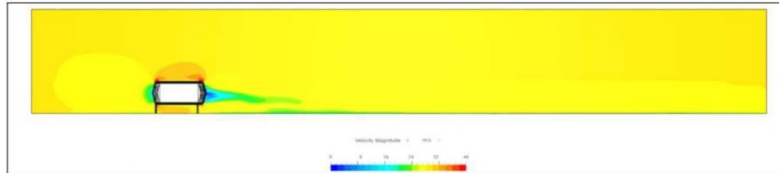
A 50 m/s, el coeficiente de arrastre permanece en 0,55 y la longitud de recirculación aumenta moderadamente de 0,86 m a 1,01 m. En paralelo, aumentan las fuerzas, los esfuerzos cortantes y el caudal inferior, sin observarse una modificación sustancial de la organización general del flujo. La respuesta resulta consistente con una intensificación del mismo patrón aerodinámico observado en el caso principal.

Lamina A.8:

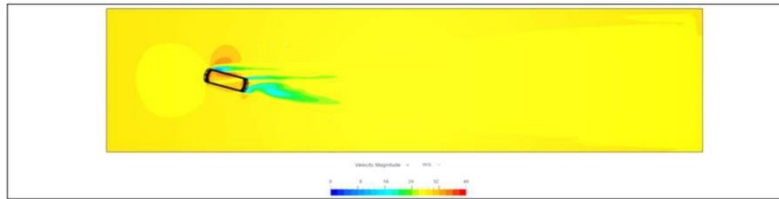
[SENSIBILIDAD V3 – 15°]

Simulación CFD | Velocity inlet 30 m/s | Dirección +X | Módulo rotado 15° respecto del flujo

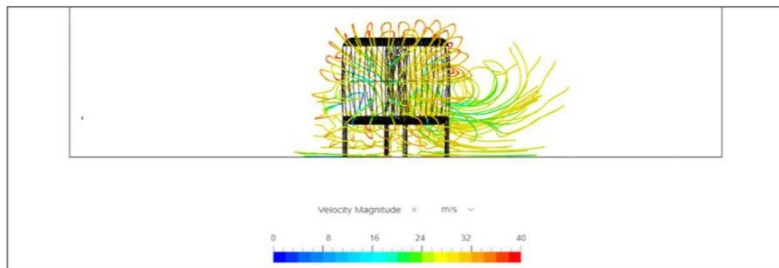
V3 – 15° – Plano XZ – Velocity Magnitude



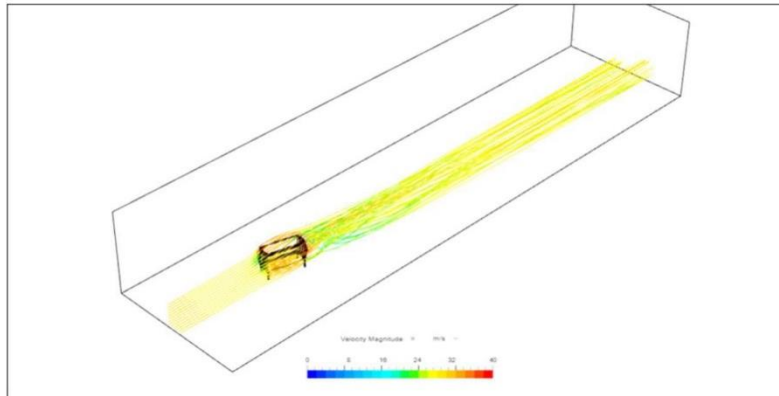
V3 – 15° – Plano XY – Velocity Magnitude



V3 – 15° – Vista YZ – Particle Trace



V3 – 15° – Vista Isométrica – Particle Trace



Corte Plano XZ Vel Mag: [Y=0m] - [rango: 0 - 40 m/s].
Corte Plano XY Vel Mag: [Z=0.15m] - [rango: 0 - 40 m/s].
Vista Plano YZ Particle trace - [rango: 0 - 40 m/s].
Vista Isométrica Particle trace - [rango: 0 - 40 m/s].

Fuente: elaboración propia en base a resultados CFD SimScale.

La incidencia oblicua de 15° produce una penalización respecto del caso normal, principalmente por el aumento de la longitud de recirculación de 0,86 m a 1,46 m y una recuperación de presión menos favorable a sotavento. No obstante, se mantiene la circulación inferior y no se observa una pérdida completa de la organización aerodinámica obtenida para V3 en incidencia normal.

Tabla 11.2. Síntesis de los casos de sensibilidad de V3

Caso V3	Cd	Lr [m]	τ sot [Pa]	τ bajo [Pa]	Q [m³/s]
8 m/s – 0°	0,55	0,86	0,08	0,12	23,29
30 m/s – 0° (referencia)	0,55	0,86	0,92	1,35	87,89
50 m/s – 0°	0,55	1,01	2,41	3,46	148,23
30 m/s – 15°	0,52	1,46	0,86	1,52	92,83

Fuente: elaboración propia a partir de resultados CFD.

En conjunto, los casos de sensibilidad muestran que la organización aerodinámica de V3 presenta una dependencia limitada respecto de la magnitud de la velocidad dentro de los casos evaluados: entre 8 y 50 m/s el coeficiente de arrastre permanece prácticamente constante y la longitud de recirculación presenta variaciones acotadas. En cambio, los indicadores dimensionales asociados al barrido superficial y a la ventilación inferior cambian marcadamente con la velocidad. La incidencia oblicua de 15° introduce una sensibilidad mayor en la extensión de la estela, aunque sin anular la circulación inferior. Estos resultados amplían la evaluación de V3 más allá de la condición principal de 30 m/s, pero no permiten determinar qué velocidad resulta más desfavorable para la deposición real de nieve, ya que el modelo no incorpora transporte de partículas.

11.2 ANEXO B – Procedimiento de extracción y cálculo de los proxies aerodinámicos.

El presente anexo complementa la metodología desarrollada en el Capítulo 6 y documenta el procedimiento utilizado para obtener los proxies aerodinámicos empleados en la comparación entre variantes.

11.2.1 Secuencia de postproceso

Una vez finalizada cada simulación en SimScale, los resultados fueron descargados y abiertos en ParaView. Allí se definieron regiones específicas de evaluación, desde las cuales se exportaron individualmente los datos necesarios para cada indicador.

El procedimiento general fue:

Simulación CFD → Extracción de datos (case.foam) → visualización en ParaView → definición de regiones de evaluación → exportación de datos → procesamiento en planillas de cálculo → obtención de proxies → matriz comparativa.

Las regiones mantuvieron iguales dimensiones y criterios de referencia entre casos comparables, ajustándose su posición a la geometría de cada variante. Los archivos exportados desde ParaView constituyeron los datos crudos de cada caso y fueron procesados posteriormente en planillas individuales. Debido a su extensión, estas tablas de datos no se reproducen en el presente anexo.

11.2.2 Regiones de evaluación

Tabla 11.3. Regiones utilizadas para la extracción de indicadores (proxies) aerodinámicos.

Región de evaluación	Dimensiones	Criterio dimensional	Criterio de ubicación
Caja A – Estela Proxy: L_r	12,12 × 5,49 × 4,90 m	2L x 2,25W x 1,2H _{V1}	Desde la cara de sotavento, aguas abajo
Caja B – Sotavento Proxy: p_{media} , k_{media}	3,03 × 2,44 × 2,00 m	0,5L x W x 2 m	Desde la cara de sotavento
Caja C – Suelo sotavento Proxy: $\tau_{media-sota}$	12,12 × 5,49 m	2L x 2,25W	Sobre el suelo, desde la cara de sotavento
Caja D – Suelo bajo Proxy: $\tau_{media-bajo}$	6,06 × 2,44 m	L x W	Centrada bajo la proyección del módulo
Caja E – Ventana bajo Proxy: Q	2,44 × 1,50 m	W x 1,5	Centro longitudinal del módulo

Para Caja A y Caja C se adoptó un ancho de $(2,25W)$ mediante criterio visual, buscando cubrir adecuadamente la expansión lateral de la estela. La altura de Caja A se definió a partir de la altura total de V1:

$$H_{V1} = 1.5 + 2.59 = 4.09$$

$$1.2H_{V1} \approx 4.91$$

Para la extracción cuantitativa de la longitud de recirculación se consideró como flujo reverso:

$$U_x < -\frac{0,01 \text{ m}}{s}$$

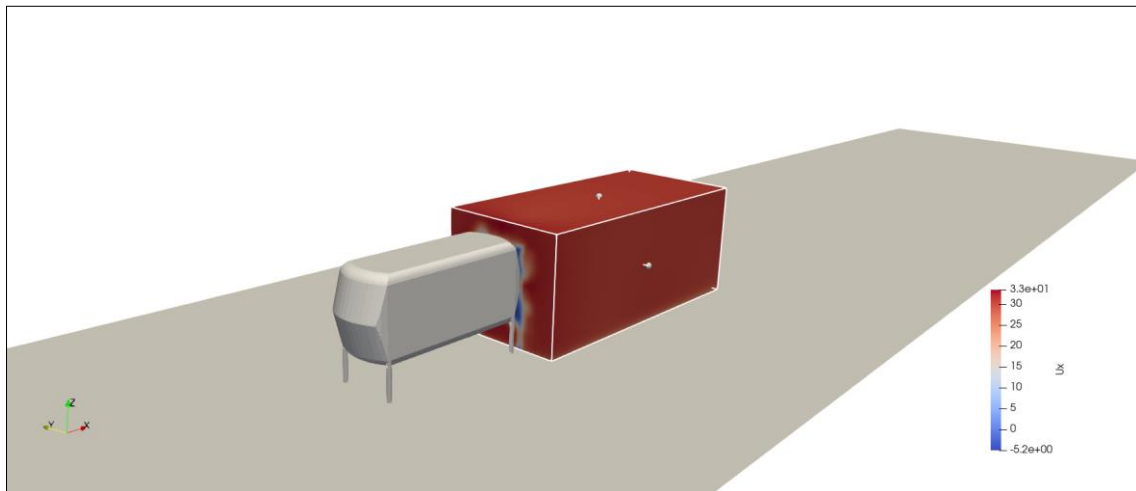


Figura B.1. Región Caja A utilizada para determinar la longitud máxima de recirculación. Fuente: elaboración propia a partir del postproceso en ParaView.

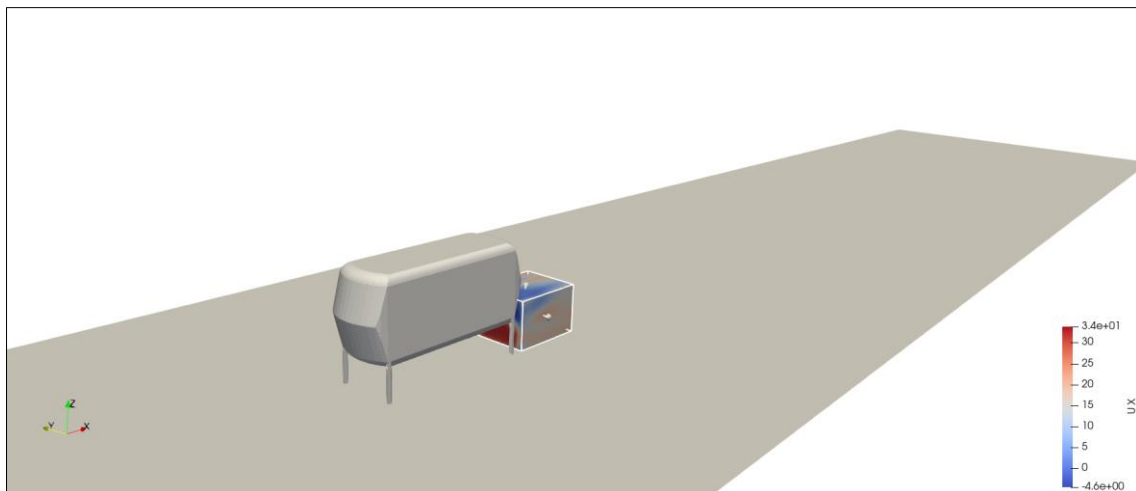


Figura B.2. Región Caja B utilizada para obtener la presión y la energía cinética turbulenta medias a sotavento. Fuente: elaboración propia a partir del postproceso en ParaView.

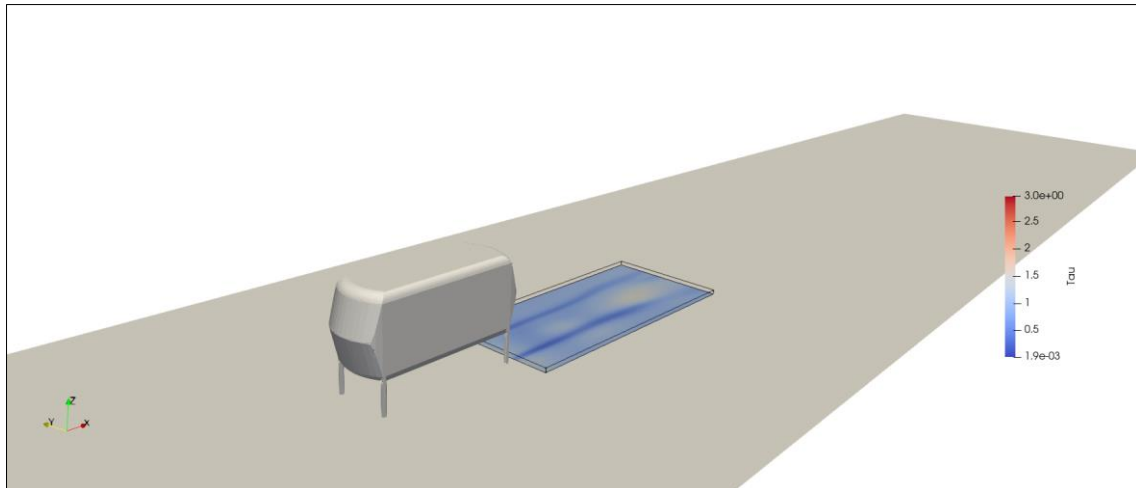


Figura B.3. Región Caja C utilizada para obtener el esfuerzo cortante medio sobre el suelo a sotavento. Fuente: elaboración propia a partir del postproceso en ParaView.

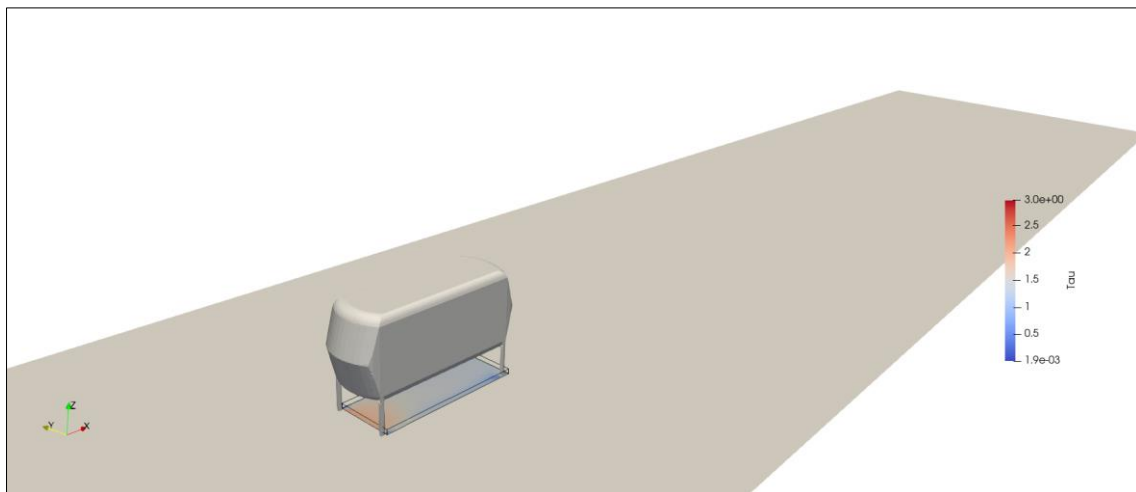


Figura B.4. Región Caja D utilizada para obtener el esfuerzo cortante medio bajo el módulo. Fuente: elaboración propia a partir del postproceso en ParaView.

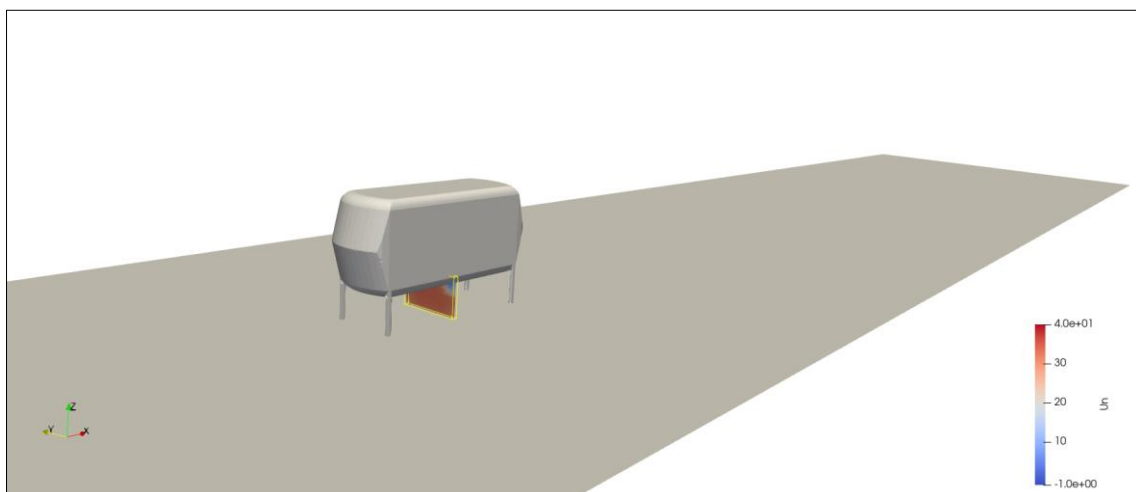


Figura B.5. Sección Caja E utilizada para calcular el caudal de aire bajo el módulo. Fuente: elaboración propia a partir del postproceso en ParaView.

11.2.3 Procesamiento de los datos

Las regiones se delimitaron en ParaView mediante operaciones de Calculator, Clip, Isovolume y Slice, según el indicador considerado. Cada región se exportó individualmente y sus datos fueron procesados en una planilla correspondiente al caso analizado.

Tabla 11.4. Procedimiento de cálculo de los proxies.

Proxy	Procedimiento
F_X	Promedio del 10% final estabilizado de la historia de fuerzas
C_d	$C_d = \frac{ F_X }{\frac{1}{2} \rho U^2 A_{ref}}$
L_r	$L_r = X_{max\ rec} - X_{sot}$, utilizando $U_X < -0,01$ m/s
p_{media}	$\bar{p} = \frac{\sum p_i V_i}{\sum V_i}$
k_{media}	$\bar{k} = \frac{\sum k_i V_i}{\sum V_i}$
τ_{media}	$\tau_{media} = \frac{\sum \tau_i A_i}{\sum A_i}$, con $\tau_i = mag(wallShearStress)$
Q	$Q = \sum U_{ni} A_i$

Los valores de presión y energía cinética turbulenta se ponderaron por volumen, mientras que los esfuerzos cortantes se ponderaron por el área de cada elemento superficial.

El caudal bajo módulo se obtuvo integrando la componente de velocidad normal a Caja E. Para los casos de incidencia normal esta componente coincide con (U_X). En V3 con incidencia de 15° , la componente longitudinal se rotó de acuerdo con la orientación del plano de control.

Las áreas de referencia utilizadas en el cálculo de (C_d) se obtuvieron a partir de la **proyección de cada geometría medida en SketchUp**, considerando la orientación correspondiente frente al flujo.

Tabla 11.5. Áreas de referencia utilizadas para el cálculo de (C_d).

Variante - Condición	A_{ref}
V0 – 0°	6,32 m ²
V1 – 0°	6,59 m ²
V2 – 0°	8,01 m ²
V2B – 0°	8,01 m ²
V3 – 0°	8,01 m ²
V3 – 15°	14,01 m ²

11.3 ANEXO C – Respaldo de cálculos de la estimación económica

11.3.1 Cálculo de superficie de carenados

La superficie neta de los carenados se obtuvo directamente del modelo geométrico desarrollado en SketchUp, a partir de las áreas correspondientes a cada componente.

Tabla 11.6. Cálculo de superficie neta de carenados.

Componente	Superficie
Carenado frontal	9,08 m ²
Carenado posterior	9,08 m ²
Carenados superiores	18,31 m ²
Carenados inferiores	18,47 m ²
Carenados laterales	$15,63 \times 2 = 31,26 \text{ m}^2$
Capuchones de patas	$0,83 \times 4 = 3,32 \text{ m}^2$
Total	89,52 m²

El valor corresponde a la superficie geométrica neta del modelo. Para el cálculo de compra se adicionó posteriormente un 10 % por recortes y pérdidas:

11.3.2 Cálculo de arriostramientos

El sistema preliminar considera ocho diagonales: cuatro sobre los planos longitudinales y cuatro sobre los planos transversales del módulo.

Para las diagonales longitudinales: $L_{long} = \sqrt{6,06^2 + 1,5^2} = 6,24 \text{ m}$

Para las diagonales transversales: $L_{trans} = \sqrt{2,44^2 + 1,5^2} = 2,86 \text{ m}$

La longitud neta resulta: $L_{neta} = 4(6,24) + 4(2,86) = 36,4 \text{ m}$

Incorporando un margen del 10 % para cortes, ajustes y terminales:

$$L_{estimada} = 36,4 \times 1,10 = 40,04 \text{ m}$$

Este valor constituye la base para la adopción económica de un rollo comercial de 50 m.