

UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
ACADEMIA DE CIENCIAS AERONAUTICAS
SANTIAGO – VITACURA



**EVALUACIÓN DEL IMPACTO DE LAS TURBINAS EÓLICAS
SOBRE EL SISTEMA AERONÁUTICO, CASO APLICADO A LOS
AERÓDROMOS DE CALAMA Y VALDIVIA**

FLORENCIA ANDREA JARA SOLARI

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO EN AVIACIÓN COMERCIAL

PROFESOR GUÍA : SRA. ANAMARIA ARPEA IBIETA
PROFESOR CORREFERENTE : SR. JOSE PATRICIO MONTERROSA P.

NOVIEMBRE – 2020



Agradecimientos

Quiero agradecer y dedicar ese trabajo de título a mi familia, por siempre haber estado ahí entregándome su apoyo durante el camino de mis estudios y en los desafíos que aparecían, por motivarme a que siempre diera lo mejor de mí, en todo aspecto de la vida, y aun cuando las cosas se pusieran difíciles y pedirme cada día más porque sabían de lo que era capaz.

Le agradezco a mi profesor correferente por toda la guía entregada durante la realización del trabajo y, por supuesto, a mi profesora guía, jefa de carrera, por todas sus críticas constructivas para que la memoria resultara de la mejor y más clara manera posible.

Agradezco al departamento de matemáticas por permitirme haber sido ayudante, me contribuyó a desarrollar y potenciar habilidades y conocimientos que, para mí como futura profesional van a ser útiles.

Gracias a cada uno de los amigos que hice durante mi etapa universitaria, por los traspases de estudio o para terminar un trabajo, por todas las aclaraciones de alguna materia y por las horas que pasábamos en la sala de computación. Por todos los almuerzos conversados y aquellas sobremesas eternas de risas. Ellos hacían que la espera hasta el bloque 13-14 pasara volando.

RESUMEN EJECUTIVO

El objetivo de este trabajo de título es evaluar el impacto generado por las turbinas eólicas sobre el sistema aeronáutico.

Primeramente, se realizó la identificación de como las turbinas obstaculizan las operaciones de un aeródromo enfocándose en tres componentes fundamentales aeronáuticos, ellos son radares de vigilancia de tráfico aéreo tanto PSR, como SSR, las Superficies Limitadoras de Obstáculos (SLO) y los Procedimientos de Vuelo Instrumentales de un aeródromo. Estas estructuras pueden llegar a causar problemas en la recepción de señal de los equipos, vulnerar el espacio aéreo seguro alrededor de un aeródromo o afectar su operatividad.

En base al análisis de la normativa aeronáutica de dos países y una región -Chile, Estados Unidos y la Unión Europea- se pudo establecer que la norma chilena presenta una brecha puesto que este tema no es muy avanzado y no se manejan estudios de afectación, además, la norma no se refiere a los procedimientos de vuelo.

El análisis se aplica a dos casos, la situación del aeródromo de Calama que en sus alrededores hay un parque eólico y la situación que va a enfrentar el aeródromo de Valdivia cuando el parque eólico en sus cercanías esté completamente instalado y en operación, respecto de las SLO y los Procedimientos de Vuelo que cada uno ha declarado.

Teniendo en cuenta la investigación, se evidencia la posibilidad de implementar un Servicio de Análisis Aeronáutico, que tendría que ponerse en marcha desde un Centro de Estudios de Ciencias Aeronáuticas de la Universidad Federico Santa María, que realice evaluaciones a parques y garantice soluciones eficientes para ambas industrias. Utilizando la herramienta CANVAS, se establecen los lineamientos técnicos y económicos primordiales de él.

Palabras claves: Radares de vigilancia de aeronaves, Superficies limitadoras de obstáculos (SLO), Procedimientos de vuelo instrumentales de salida, Procedimientos de vuelo instrumentales de llegada, Carta de Aproximación por Instrumentos, Espacio aéreo, Turbinas eólicas.

ABSTRACT

The objective of this graduating project is to assess the impact generated by wind turbines on the aeronautical system.

First, the identification of how the turbines obstruct the operations of an aerodrome was carried out, focusing on three fundamental aeronautical components, they are air traffic surveillance radars, both PSR and SSR, Obstacle Limiting Surfaces (SLO) and Instrument Flight Procedures of an aerodrome. These structures can cause problems in the reception of signals, infringe the safe airspace around an aerodrome or affect its operation.

Based on the analysis of the aeronautical regulations of two countries and one region - Chile, United States and European Union- it was possible to establish that the Chilean standard presents a gap since this topic is not very advanced and there are no impact studies. Furthermore, the standard does not refer to flight procedures.

The analysis is applied to both cases, the situation of Calama aerodrome where there is a wind farm in its surroundings and the situation that Valdivia aerodrome will face when the wind farm in its vicinity is fully installed and in operation, with respect to the SLO and the Flight Procedures that each one has declared.

Taking the research into account, the possibility of implementing an Aeronautical Analysis Service is evidenced, which would have to be launched from an Aeronautical Sciences Studies Center of Federico Santa María University, which carries out evaluations of wind farms and guarantees efficient solutions for both industries. Using the CANVAS tool, the main technical and economic guidelines are established.

Keywords: Surveillance radars, Obstacle Limitation Surface (OLS), Standard Instrumental Departure, Standard Instrumental Arrival, Instrument Approach Chart, Airspace, Wind Turbines.



TABLA DE CONTENIDO

Resumen Ejecutivo	3
Abstract	4
Índice de Figuras.....	8
Introducción	10
1 Capítulo I: Antecedentes Generales	12
1.1 Justificación	12
1.2 Objetivos	15
1.3 Metodología	16
1.4 Alcance	17
2 Capítulo II: Estado del Arte.....	18
2.1 Antecedentes	18
2.1.1 Acerca de la energía eólica y aerogeneradores	18
2.1.2 Desarrollo de energía eólica en Chile	19
2.2 Marco Teórico.....	24
2.2.1 Sistemas de Vigilancia de Aeronaves	25
2.2.1.1 Radar de Vigilancia Primaria (PSR)	27
2.2.1.2 Radar de Vigilancia secundaria (SSR).....	32
2.2.2 Superficies Limitadoras de Obstáculos.....	36
2.2.3 Procedimientos Instrumentales de Vuelo	39
2.2.4 Herramienta CANVAS	40
2.3 Propuesta Metodológica.....	43
3 Capítulo III: Desarrollo	45
3.1 Impactos de las turbinas eólicas en el sistema aeronáutico.....	45
3.1.1 Impactos Técnicos.....	45
3.1.1.1 Clutter o desorden en un radar PSR	46
3.1.1.2 Desensibilización de radar PSR	48
3.1.1.3 Pérdida de seguimiento de la aeronave	49
3.1.1.4 Reportes de objetivos falsos debido a reflexión indirecta en radar PSR y SSR.....	50
3.1.1.4.1 PSR Caso 1.....	52
3.1.1.4.2 PSR Caso 2.....	53
3.1.1.4.3 PSR Caso 3.....	54
3.1.1.4.4 PSR Caso 4.....	55



3.1.1.5	SSR: Errores de rumbo de la aeronave	55
3.1.1.6	Sobrecarga del procesador PSR y SSR	57
3.1.1.7	Saturación del receptor del radar PSR	57
3.1.1.8	Efecto de sombreado	58
3.1.2	Impactos Físicos.....	61
3.1.2.1	Superficies Limitadoras de Obstáculos	61
3.1.2.2	Procedimientos Instrumentales	62
3.2	Análisis de normativa	66
3.2.1	Legislación de Chile.....	66
3.2.1.1	Normativa Ambiental.....	66
3.2.1.2	Normativa Aeronáutica	69
3.2.2	Normativa de Federal Aviation Authority	73
3.2.3	Normativa de European Union Aviation Safety Agency	78
3.3	Estado actual de aeródromos.....	87
3.3.1	Aeropuerto de Calama	87
3.3.1.1	Superficies Limitadoras de Obstáculos	89
3.3.1.2	IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 10	91
3.3.1.3	IAC 5 RNAV (GNSS) Y Rwy 28	93
3.3.2	Aeródromo de Valdivia.....	97
3.3.2.1	Superficies Limitadoras de Obstáculos	99
3.3.2.2	IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 17	100
3.4	Propuesta de Servicio de Análisis Aeronáutico	111
3.4.1	Lineamientos Técnicos y Económicos.....	112
4	Conclusiones y recomendaciones.....	122
5	Bibliografía.....	125
6	Anexo	130
6.1	Aerogeneradores	130
6.2	Superficies Limitadoras de Obstáculos.....	134
6.3	Reflexiones multi trayecto en un radar PSR	135
6.4	Dimensiones de la sombra de turbinas eólicas.....	139
6.5	Solicitud Certificado de altura	143
6.6	Formulario FAA 7460-1	144
6.7	Herramientas de evaluación de obstrucción.....	145
6.8	Pronunciamiento al Estudio de Impacto Ambiental.....	146



6.9	Parque eólico Pichilingue, Valdivia.....	148
-----	--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

<i>Figura 0-1: Evolución de las turbinas eólicas a través del tiempo.</i>	10
<i>Figura 1-1: Evolución de la capacidad neta instalada de ERNC en Chile.</i>	12
<i>Figura 1-2: Parque eólico Valle de los Vientos y aeródromo SCCF.</i>	14
<i>Figura 2-1: Intensidad de los vientos en Chile.</i>	20
<i>Figura 2-2: Parques eólicos en Chile.</i>	22
<i>Figura 2-3: Turbina eólica tipo HAWT con 3 aspas.</i>	23
<i>Figura 2-4: Secciones de control del espacio aéreo y cobertura de radar PSR y SSR.</i>	27
<i>Figura 2-5: Problema de resolución de alcance.</i>	30
<i>Figura 2-6: Forma de haz transmitido.</i>	31
<i>Figura 2-7: Patrón de antena graficado en coordenadas polares.</i>	32
<i>Figura 2-8: Interrogación de SSR en modo A y C (no a escala).</i>	33
<i>Figura 2-9: Haz suma y diferencia en un SSR en modo S.</i>	35
<i>Figura 2-10: Superficies Limitadoras de Obstáculos (no a escala).</i>	38
<i>Figura 2-11: Lienzo CANVAS.</i>	41
<i>Figura 2-12: Propuesta metodológica.</i>	44
<i>Figura 3-1: Pantalla PPI de un PSR que muestra el eco de una aeronave y de turbinas eólicas (1) como eco pintura de piel y (2) con símbolos.</i>	47
<i>Figura 3-2: Reflexión caso 1.</i>	52
<i>Figura 3-3: Reflexión caso 2.</i>	53
<i>Figura 3-4: Eco producido por la turbina y aeronave.</i>	54
<i>Figura 3-5: Reflexión caso 3.</i>	55
<i>Figura 3-6: Reflexión caso 4.</i>	55
<i>Figura 3-7: Esquema de la reflexión en la respuesta de un SSR.</i>	56
<i>Figura 3-8: Sombra provocada por el aerogenerador.</i>	59
<i>Figura 3-9: Proceso de evaluación de impacto ambiental.</i>	68
<i>Figura 3-10: Señalamiento e iluminación de las turbinas.</i>	72
<i>Figura 3-11: Clasificaciones de agrupación de turbinas en un parque eólico: a) lineal, b) clúster y c) red.</i>	75
<i>Figura 3-12: Turbinas señalizadas según recomendaciones.</i>	76
<i>Figura 3-13: Documento "How to assess the potential impact of Wind turbines on Surveillance sensors".</i>	83
<i>Figura 3-14: Parque eólico Valle de los vientos.</i>	88
<i>Figura 3-15: Superficies Limitadoras de Obstáculos SCCF.</i>	89
<i>Figura 3-16: Turbinas en estudio – Sup. de aproximación: a) turbinas Grupo I. b) turbina no.6. c) turbina no. 12. d) turbina no. 11. e) turbina no. 15.</i>	91
<i>Figura 3-17: IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 10.</i>	92
<i>Figura 3-18: IAC 5 RNAV (GNSS) Y Rwy 28.</i>	94
<i>Figura 3-19: Áreas de protección de obstáculos aproximación final.</i>	95
<i>Figura 3-20: Aeródromo Pichoy.</i>	97
<i>Figura 3-21: Parque eólico Pichilingue.</i>	98
<i>Figura 3-22: Superficies limitadoras aeródromo SCVD y parque eólico.</i>	99
<i>Figura 3-23: IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 17.</i>	100
<i>Figura 3-24: Área de protección circuito de espera.</i>	101
<i>Figura 3-25: Áreas de protección de obstáculos en transición NENUL.</i>	103
<i>Figura 3-26: Áreas de protección de obstáculos transición PALUR.</i>	105
<i>Figura 3-27: Áreas de protección tramo inicial.</i>	106
<i>Figura 3-28: Áreas de protección tramo intermedio.</i>	108
<i>Figura 3-29: Proceso de Gestión interna del Servicio de Análisis.</i>	117

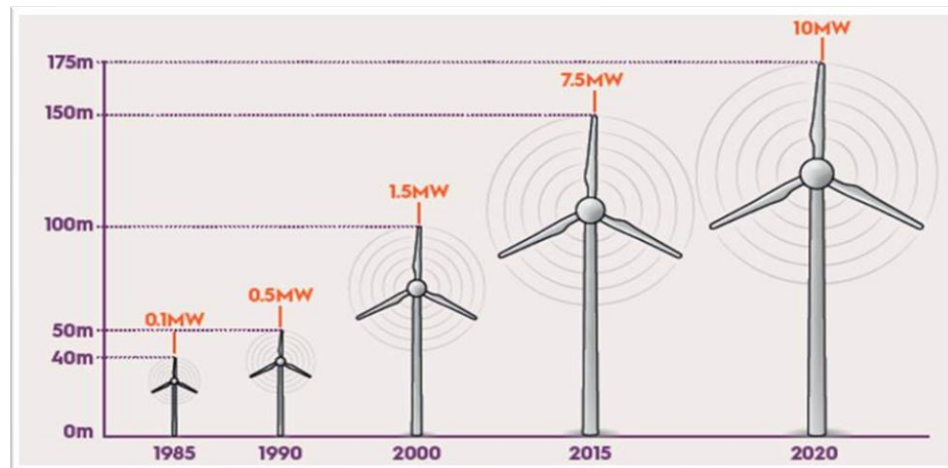


<i>Figura 3-30: Proceso Gestión de Aprobación DGAC.</i>	<i>118</i>
<i>Figura 6-1: Partes de una turbina eólica HAWT.....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 6-2: Dimensiones y pendientes de las superficies limitadoras de obstáculos – Pistas para aproximaciones.</i>	<i>134</i>
<i>Figura 6-3: Esquema reflexión caso 1.</i>	<i>136</i>
<i>Figura 6-4: Esquema reflexión caso 2.</i>	<i>137</i>
<i>Figura 6-5: Esquema reflexión caso 3.</i>	<i>138</i>
<i>Figura 6-6: Esquema reflexión caso 4.</i>	<i>139</i>
<i>Figura 6-7: Geometría de ubicación del radar y la turbina.</i>	<i>141</i>
<i>Figura 6-8: Solicitud para obtener Certificado de alturas.</i>	<i>143</i>
<i>Figura 6-9: Formulario FAA 7460-1.</i>	<i>144</i>
<i>Figura 6-10: : Herramienta Wind Turbine Build Out.....</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6-11: Herramienta DoD Preliminary Screening Tool.</i>	<i>145</i>
<i>Figura 6-12: Herramienta Notice Criteria Tool.</i>	<i>146</i>
<i>Figura 6-13: Pronunciamento de la DGAC ante el EIA del proyecto.</i>	<i>147</i>

INTRODUCCIÓN

En el último tiempo, la producción de energía para las actividades humanas a partir de energías renovables no convencionales (ERNC) ha tomado un rol fundamental, debido a la preocupación por el calentamiento global y el cuidado del medio ambiente. Una de ellas es la energía eólica, producida por el movimiento de masas de aire a través de las aspas de las turbinas eólicas. Gracias a los avances de la tecnología se han desarrollado turbinas cada vez más altas, con más potencia, mayor capacidad de producción de energía y aspas de más longitud, como se observa en la siguiente figura:

Figura 0-1: Evolución de las turbinas eólicas a través del tiempo.



Fuente: Ahlstrom Munksjö Web Site.

La importancia adquirida por la energía eólica ha llevado a la instalación masiva de estos equipos en parques eólicos onshore (en tierra) y offshore (en el mar) en diferentes ciudades alrededor del mundo, los que en 2019 produjeron un total de 650.557 MW (Global Wind Energy Council, 2019).

Las turbinas tienen tres partes principales: la torre, el rotor (donde se ensamblan las aspas) y la góndola. La torre es estática y le da la altura a la turbina para que alcance aire menos turbulento; el rotor posee las aspas, las cuales giran al pasar el aire a través de ellas; y la góndola, a la cual está ensamblado el rotor y mediante el sistema yaw posiciona las aspas en la dirección predominante del viento.

En la legislación aeronáutica chilena, específicamente en el DAR 14¹, se define un obstáculo como “todo objeto fijo o móvil, o parte de él, que esté situado en un área destinada al movimiento de las aeronaves en tierra o que sobresalga de una superficie definida destinada a proteger a las aeronaves en vuelo”, y a pesar de ser las turbinas equipos que permiten generar energía limpia, tienen características que hacen calificarlas como un obstáculo para la aviación, entre ellas están:

1. Altura de la turbina.
2. Longitud de las aspas
3. Sección Transversal de Radar (RCS) de las partes de la turbina.
4. Velocidad de rotación de las aspas.
5. Movimiento de la turbina en la dirección predominante del viento (sistema *yaw*).

Aquellas características hacen que la convivencia entre los aerogeneradores y la aviación se torne compleja, puesto que cuando éstos se instalan en las cercanías de un aeródromo o de equipos de ayuda a la navegación y comunicación aérea pueden llegar a generar complicaciones en los radares de vigilancia de aeronaves, las superficies limitadoras de obstáculos (SLO) de un aeródromo y las restricciones estipuladas para los Procedimientos Instrumentales de Vuelo de salida (SID), llegada (STAR) y aproximación (IAC) declarados del aeródromo.

Es por ello, que se hace una tarea primordial realizar una evaluación de como estos aspectos de la aeronáutica se ven impactados negativamente en su funcionamiento y protección por los aerogeneradores. De igual manera, aquello es útil para determinar soluciones que hagan permitan la navegación aérea segura y un ambiente donde ambas industrias puedan ejecutarse de manera eficiente.

¹ Dirección General de Aeronáutica Civil. DAR 14 - Reglamento de aeródromos.

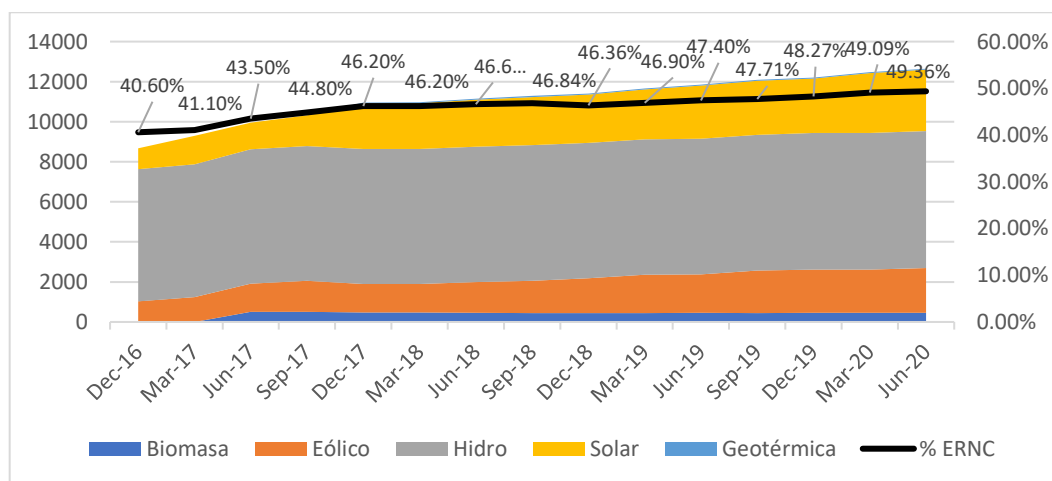
1 CAPÍTULO I: ANTECEDENTES GENERALES

1.1 JUSTIFICACIÓN

Las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) son aquellas fuentes de generación energética en las que no se incurre en el consumo, gasto o agotamiento de su fuente generadora. Entre ellas se puede mencionar la energía hidráulica (agua), energía solar, energía eólica (viento) y la fuente mareomotriz (oleaje de los océanos).

La necesidad de contar con este tipo de energías en Chile, ya que empujan tecnologías limpias, promueven la descarbonización y son amigables con el medio ambiente, ha llevado a privados a instalar una gran cantidad de paneles fotovoltaicos, turbinas eólicas o centrales hidroeléctricas, entre otras, a lo largo del territorio para cooperar a la capacidad energética del país, marcando una clara tendencia ascendente de incorporación en Chile desde a lo menos finales de 2016. Véase a continuación:

Figura 1-1: Evolución de la capacidad neta instalada de ERNC en Chile.



Fuente: Elaboración propia con datos obtenidos de “Boletines Mercado Eléctrico” de Generadoras de Chile.

A junio de 2020, la energía lograda a través de las diferentes ERNC que se muestran en el gráfico anterior fue de 12.645 MW, equivalente a 49,4% de la matriz energética instalada en el Sistema Eléctrico Nacional (SEN). Por ejemplo, en ese mes existen 3.068 MW de instalaciones solares, logrando una penetración de 12% en el sistema, y, también

existen 6.839 MW de capacidad hidroeléctrica, alcanzando cerca de 27% de la capacidad total (Generadoras de Chile, 2020).

Chile tenía propuesta la clara meta de llegar a 2025 con una capacidad energética de ERNC de un 20% de la capacidad neta del SEN (Revista Electricidad, 2019). Sin embargo, esta meta se logró con creces hace años y ya en 2020 a través de las ERNC se genera un 50% de la matriz del país. Estas energías ya son una realidad en la producción energética para abastecer los hogares del territorio y se espera, de acuerdo con la política energética, que al 2050 aproximadamente un 70% de la energía nacional provenga de fuentes renovables.

En lo que respecta a la energía eólica y a las estructuras mediante las cuales se consigue generarla, se está consolidando, adquiriendo una tendencia creciente desde final de 2016, ya que en Chile los costos de la tecnología eólica han disminuido y, por ende, el país ha presentado un aumento constante en la capacidad instalada. Esto se evidencia en datos entregados por el Global Wind Report 2019, el cual muestra que en 2017 existían 1.415 MW totales de instalaciones, mientras que esta cifra aumenta a 1.619 MW para 2018, seguidamente a 2.145 MW para el cierre de 2019 (Global Wind Energy Council, 2019) y a mediados de junio de 2020 se tiene constancia de que existen 2.251 MW de instalaciones de este tipo de energía (Generadoras de Chile, 2020). Esta última cifra logra una penetración de 8,8% en el sistema eléctrico total. A finales de 2019 estaban establecidos 52 parques eólicos que en conjunto suman un total de 1.026 turbinas (Pierrot, 2018), siendo que en 2001 se instalaban las primeras 3.

Las perspectivas de proyectos eólicos que se aprestan a entrar en operación indican que la capacidad instalada de esta tecnología va a superar los 3.000 MW para 2021. Es así como se prevé que entren en operación 920 MW más, de acuerdo con la cartera de proyectos que maneja el Ministerio de Energía.

Chile, a lo largo de su territorio, presenta zonas atractivas donde el viento tiene una velocidad importante que favorece la instalación de aerogeneradores, siendo ellas mayormente zonas elevadas. Sin embargo, al momento de seleccionar el lugar se debe

considerar la orografía del país y la existencia de lugares que, a pesar de tener buen potencial, no son aptos para construir. Esto lleva a que, en algunos casos, la instalación de las estructuras se haga cercano a aeródromos, ya sea en planicie o altura, pudiendo afectar su operatividad.

Con los avances tecnológicos en materia de estructuras, adquisición de mayor conocimiento y nuevos materiales de construcción, se han ido modificando las características físicas de estas estructuras haciéndolas cada vez de más altura o con un diámetro de rotor mayor. Es por ello, que las empresas desarrolladoras de proyectos eólicos se enfrentan a estrictas restricciones de altura en el lugar donde se ubiquen, y sobre todo cuando se localizan en zonas alejadas del círculo urbano en los alrededores de un aeródromo, puesto que por sus cualidades pueden llegar a obstaculizar la seguridad, integridad y fiabilidad de las operaciones aéreas y sistemas de ayuda a la navegación tanto del mismo aeródromo, como de las aeronaves.

Un situación real que incita a evaluar estas estructuras es lo que sucede en el Aeropuerto El Loa (Código OACI: SCCF) en la ciudad de Calama región de Antofagasta, donde el parque eólico Valle de los Vientos cuenta con 45 turbinas, subdivididas en dos grupos, las que se encuentran en completo funcionamiento y están ubicadas a partir de 3,5 [NM] o 6,48 [km] hacia el este desde el DER² de la pista 10, tal como se observa en la figura:

Figura 1-2: Parque eólico Valle de los Vientos y aeródromo SCCF.



Fuente: Geoportal - Visor de mapas.

² DER= Departure End of Runway. El final de pista opuesto al umbral de aterrizaje, a veces referido como al final de la pista”.

Además, hay un proyecto eólico futuro en Valdivia, parque Pichilingue, que ya ha enviado sus estudios para la obtención de los permisos de construcción cercano al Aeródromo Pichoy de la misma ciudad.

Esta situación también la experimentan aeródromos de otros países, lo que ha llevado a sus organizaciones aeronáuticas reguladoras a desarrollar políticas y estudios sobre las turbinas y su efecto en la aviación. Entre ellas se encuentra la organización de Estados Unidos -*Federal Aviation Administration (FAA)*- que ha desarrollado herramientas para tener conocimiento de los impactos que podrían causar las turbinas en determinada ubicación previo a su notificación, Reino Unido -*Civil Aviation Authority (CAA)*- donde NATS entrega un servicio especializado del estudio de parques eólicos, y organismos europeos -*EUROCONTROL (European Organisation for the Safety of Air Navigation)*, la cual incluso cuenta con una guía que evalúa el impacto potencial sobre los radares de vigilancia. De hecho, la FAA ha tenido que impugnar propuestas de aerogeneradores, porque se ubican en la línea de visión del radar perteneciente al aeródromo o no cumplen con la política de instalación (Brenner, 2008).

Con la cantidad de turbinas que hay en nuestro país y el crecimiento que presenta esta industria, aparece la importancia de estudiar el impacto que pueden llegar a producir estas estructuras en el sistema aeronáutico. Y, para complementar el estudio llegar a proponer un Servicio de Análisis Aeronáutico que estudie futuros parques eólicos y los efectos que traen consigo.

1.2 OBJETIVOS

❖ Objetivo General

- Evaluar el impacto de las turbinas eólicas en el sistema aeronáutico nacional.

❖ Objetivos Específicos

- Identificar los impactos potenciales de las turbinas eólicas sobre el sistema aeronáutico a través de la revisión de documentos referidos a su convivencia.
- Analizar la normativa aeronáutica nacional en referencia a la instalación de elementos cercanos a un aeródromo para compararla con la norma de Estados Unidos, Federal Aviation Administration (FAA), y de la Unión Europea, European Union Aviation Safety Agency (EASA).
- Estudiar el caso de los aeródromos de Calama y Valdivia que cuentan con aerogeneradores cercanos a sus inmediaciones.
- Proponer un Servicio de Análisis Aeronáutico para el impacto de las turbinas.

1.3 METODOLOGÍA

La metodología que se ha de utilizar para llevar a cabo el trabajo de titulación corresponde a un levantamiento de información desde diversos documentos elaborados por instituciones aeronáuticas e investigadores, no únicamente en Chile sino en todo el mundo, donde se estudie el comportamiento de aspectos del sistema aeronáutico, en específico los radares de vigilancia, las SLO y los Procedimientos de Vuelo, frente a las turbinas eólicas y los diversos efectos que ellas puedan llegar a ocasionarles.

Esta información previamente recopilada guía la exploración y análisis de la normativa aeronáutica nacional y de otros países, en concreto Estados Unidos y la Unión Europea, respecto del tratamiento que se les da a los aerogeneradores y sus efectos para lograr una convivencia segura con la aviación. En esta oportunidad, se comparan las tres normativas para determinar aspectos favorables que se han implementado en los países extranjeros.

Posteriormente, basándose en lo que establece la normativa DAR 14 sobre las SLO y el documento PANS-OPS no. 8168 sobre la Construcción de Procedimientos de Vuelo, se

estudia la situación del aeródromo El Loa de Calama con un parque eólico ya instalado y en completo funcionamiento, y la situación esperada para el aeródromo Pichoy en Valdivia por la instalación de un parque eólico cercano.

Finalmente, a través de la herramienta CANVAS se establecen los lineamientos iniciales técnicos y económicos para el Servicio de Análisis Aeronáutico que estudie el impacto de las turbinas eólicas futuras sobre los componentes SLO, Procedimientos de Vuelo y radares de vigilancia, y garantice soluciones a ambas industrias.

1.4 ALCANCE

El presente trabajo de título posee un alcance exploratorio y descriptivo, ya que pretende investigar y describir el impacto generado por las turbinas eólicas sobre los radares de vigilancia aérea, las SLO y los Procedimientos de Vuelo Instrumental, reuniendo información de diferentes documentos aeronáuticos o investigaciones que abarquen estos tópicos.

Respecto al alcance temporal, este trabajo de título estudia la situación aeronáutica actual, es decir, hasta lo que va del año 2020 respecto de parques eólicos que se encuentran instalados o se instalarán prontamente en el territorio nacional. Además, de incluir la situación aeronáutica de Estados Unidos y la Unión Europea. La propuesta que se realiza al finalizar el trabajo se proyecta para iniciar sus servicios a comienzos del año 2021.

Por último, el trabajo se acota a lo que ocurre con la navegación aérea civil y los proyectos eólicos únicamente dentro del territorio de Chile, a pesar de analizar la normativa de otros 2 países para determinar aspectos importantes que ellos consideran en su normativa aeronáutica frente a proyectos de este estilo. La propuesta también comprende lo que es el territorio nacional, ya que se entrega desde las dependencias de la USM ubicada en Santiago.

2 CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Acerca de la energía eólica y aerogeneradores

La energía eólica forma parte de las Energías Renovables No Convencionales (ERNC) y es aquella producida por el aprovechamiento de la energía cinética de las masas de aire. El movimiento de las masas de aire es aprovechado por los aerogeneradores o turbinas eólicas para generar electricidad que luego será utilizada para las actividades humanas.

El interés serio por este tipo de energía surgió en el año 1973 cuando ocurre la primera crisis del petróleo, ya que como la fuente de energía fósil presentaba problemas se requería una nueva forma de generar energía para continuar con el abastecimiento de las naciones. Así comienza su desarrollo y el consecuente despegue de la energía eólica como industria. En ese escenario, tanto en Europa como en Estados Unidos, comenzaron a gestarse los primeros aerogeneradores de gran potencia, con tecnologías, que años más tarde, constituirían los estándares de la industria para las próximas turbinas (Cifuentes, octubre de 2013).

En 1978 se logra construir el primer prototipo de gran envergadura de torre eólica en Dinamarca, el cual posee características similares a las actuales y generaba 2 [MW]. Paralelamente, el gobierno de Estados Unidos, a través del Departamento de Energía y la NASA, trabajan en un programa piloto que culminó con el desarrollo de 13 prototipos de aerogeneradores, cuyas cualidades, como torres de acero, materiales compuestos para las aspas, generadores de velocidad variable, características aerodinámicas, estructurales y acústicas, son las cualidades bases de los estándares que utilizan las turbinas eólicas modernas. Para fomentar la instalación de estos equipos, que producían energía limpia, el estado de California en el 1980 comienza a entregar incentivos tributarios a las personas, lo que llevó a la instalación masiva de éstos, llegando a formar parques eólicos. De acuerdo con las características actuales que poseen las turbinas, muchos de los parques, de ese entonces en California, se consideran ineficientes en términos económicos, sin

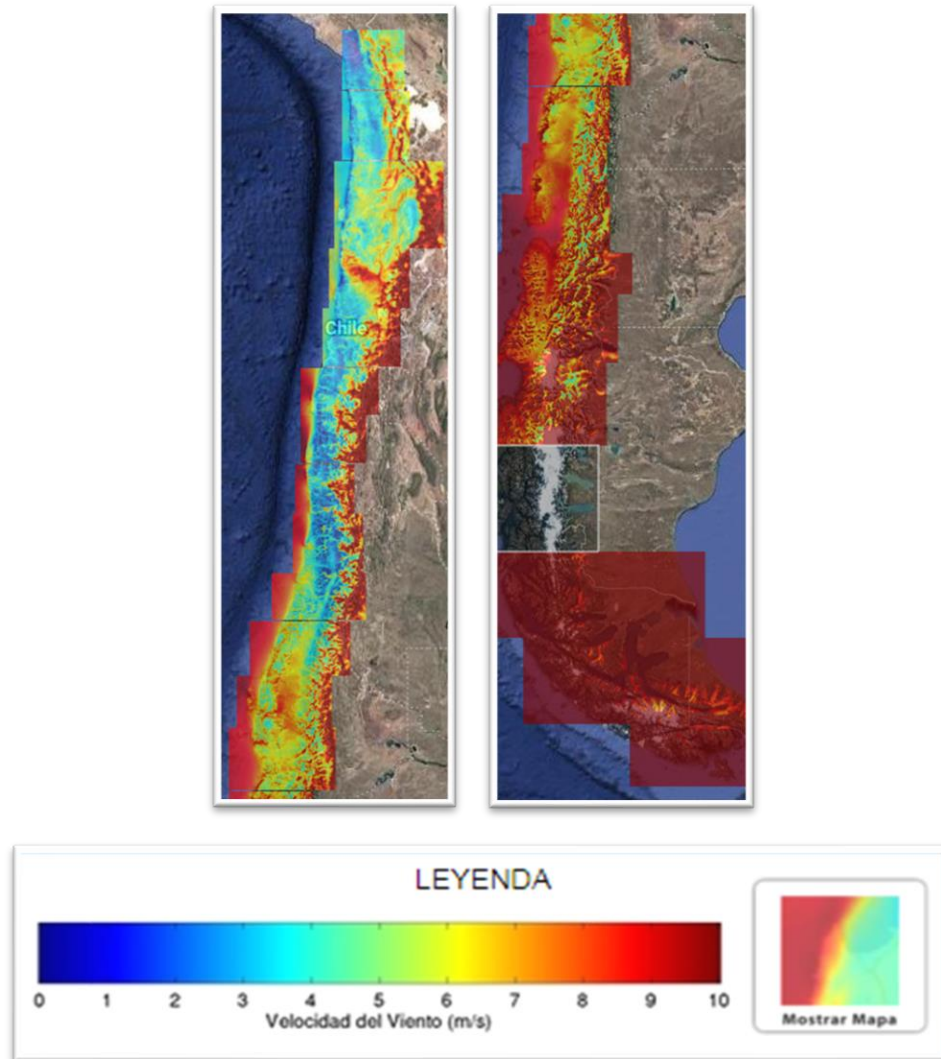
embargo, esto ha generado experiencias respecto del tema, permitiendo la creación de nuevas tecnologías y estándares.

Para el año 2019, la energía eólica onshore y offshore significó la producción de 650.557 MW a nivel mundial, equivalente a un 10% de MW más respecto del año anterior. Los principales aportadores a esta cifra son Estados Unidos, China, India, Alemania, Francia y Reino Unido³.

2.1.2 Desarrollo de energía eólica en Chile

La componente viento posee velocidades diferentes a lo largo de todo el país. Las regiones nortinas con mayor potencial eólico son Antofagasta, Atacama y Coquimbo, mientras que en el sur corresponden a Biobío, La Araucanía, Los Ríos, Los Lagos, Aysén y Magallanes. En la siguiente imagen se observa la velocidad del viento en el país a una altura de 125[m], evidenciando lo anterior:

³ Global Wind Energy Council. Global Wind Report 2019.

Figura 2-1: Intensidad de los vientos en Chile.

Fuente: Geoportal de Chile – Visor de mapas.

Los primeros aerogeneradores se instalaron en las cercanías a la ciudad de Coyhaique, Región de Aysén en noviembre de 2001, siendo éstos de eje horizontal con 3 aspas. Este primer parque eólico, Alto Baguales, contaba con 3 aerogeneradores que, en conjunto, generaban 2MW, abasteciendo a casi 20.000 familias. En 2015 se ejecutó un Proyecto de Ampliación para aquel parque, el cual consistió en añadir 2 nuevas torres eólicas.

Luego en 2007, el primer parque eólico unido al Sistema Interconectado Central (SIC), ubicado en la localidad de Canela, Región de Coquimbo, entraba en operación. El parque Canela I contemplaba la instalación de 11 aerogeneradores, productores 1,65 MW cada



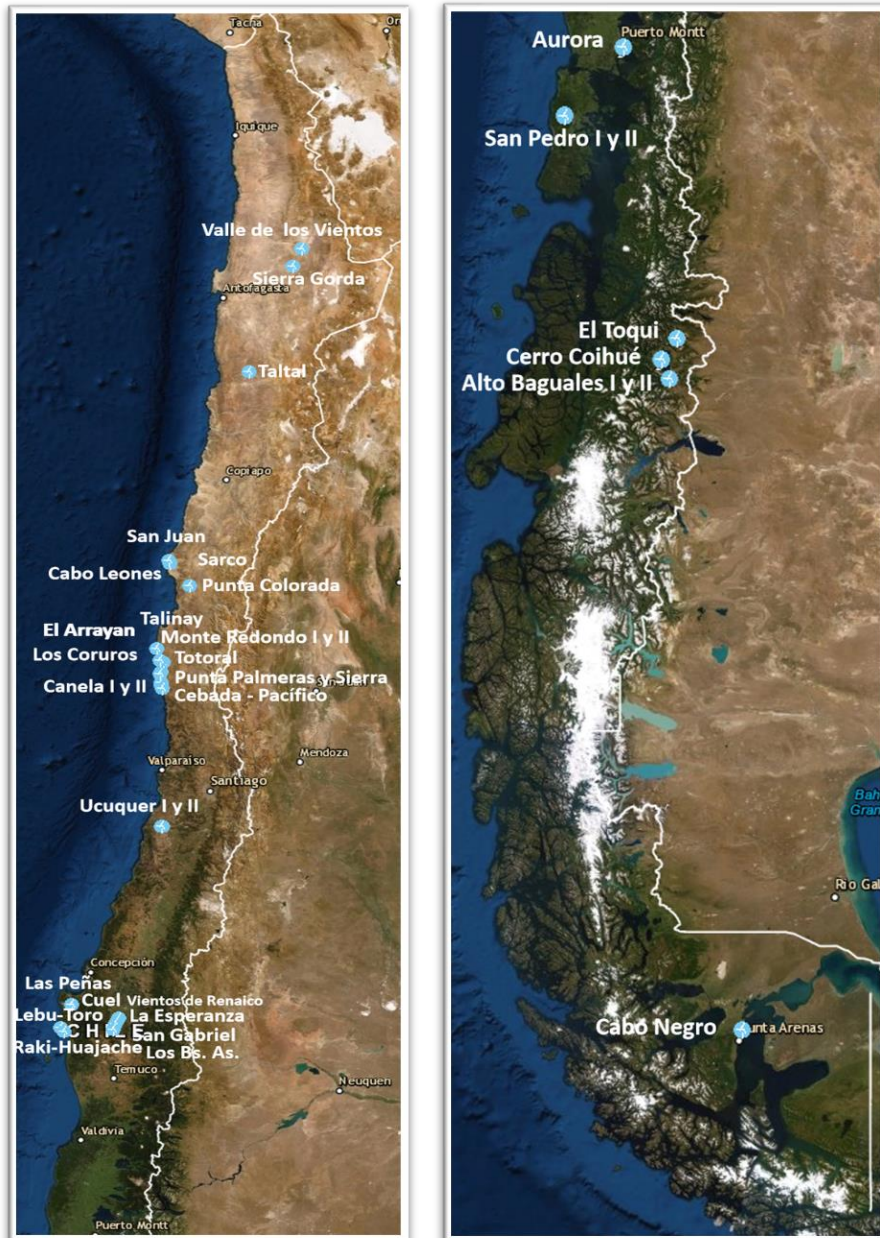
uno, con una generación anual de 46.000 MWh (Pierrot, 2018). *“Este año (por el 2007) marca el boom en la instalación de parques eólicos en el país, principalmente en la costa del Norte Chico, aunque también con presencia en el Biobío”*⁴.

Desde entonces ya se ha instalado un total de 1.026 turbinas eólicas de eje horizontal con 3 aspas a lo largo del país, las que están distribuidas en 52 parques eólicos y pueden llegar a producir un total de 2.378 MW (Pierrot, 2018) cuando trabajan a rendimiento máximo. En 2019, estas turbinas produjeron un total de 2.145 MW de energía (Global Wind Energy Council, 2019).

De acuerdo con la información entregada por la base de datos The Wind Power (Pierrot, 2018), en la siguiente figura se pueden observar los parques eólicos en operación a lo largo del territorio chileno:

⁴ Patricio Lazcano. Diario la Tercera: “Chile ya tiene 651 torres eólicas”.

Figura 2-2: Parques eólicos en Chile.



Fuente: Elaboración propia con datos de The Wind Power.

La ubicación de los parques coincide con las zonas rojizas y anaranjadas de la Figura 2-1, en las cuales la componente velocidad del viento alcanza entre 7 a 8 m/s. Al ser las planicies litorales del Norte Grande angostas por la presencia de Farellón Costero, la instalación de turbinas eólicas no se ve favorecida. No así en sectores cercanos a la Cordillera de la Costa (Taltal) o en la Depresión intermedia (Valle de los Vientos), donde

circulan vientos con dirección W-E que pueden alcanzar 30 km/h o el equivalente a 8,33 m/s. En el Norte Chico las zonas costeras son áreas de gran aptitud que cuentan con vientos apropiados de dirección constante a lo largo del año, potenciando la instalación de aerogeneradores. Por último, vientos del oeste (entre 30° y 60° latitud Sur) favorecen las cumbres de los cerros y las zonas altas en la zona Sur y Austral, debido a que limitan la sección por la cual el viento puede circular provocando que éste adquiera mayor velocidad, pero la orografía y la abundancia de parques nacionales no permite la instalación masiva de aerogeneradores.

La mayoría de los aerogeneradores instalados a lo largo del territorio nacional son las de eje horizontal a la dirección del viento o HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) con 3 aspas, y lucen de la siguiente manera:

Figura 2-3: Turbina eólica tipo HAWT con 3 aspas.



Fuente: Buscador de Google.

Las partes principales de un aerogenerador con eje horizontal son: la torre, la góndola y el rotor. La torre sostiene toda la estructura del aerogenerador y le da elevación al rotor. El rotor está formado por las 3 aspas y el buje (elemento donde se ensamblan las aspas). Por último, la góndola, la cual se ubica en la cima de la torre y es la que alberga los diferentes sistemas que permiten el funcionamiento del aerogenerador.

Cabe mencionar que la propuesta de servicio de análisis para la instalación de turbinas eólicas se enfoque en este tipo de turbina debido a que son las más comunes por ser más

estables que las que tienen 1 aspa o son de eje vertical (VAWT). En el Anexo 6.1 se entrega más información sobre las turbinas.

2.2 MARCO TEÓRICO

Como se ha mencionado anteriormente, un parque eólico corresponde a la instalación de una gran cantidad de turbinas eólicas en un mismo lugar para generar electricidad. Al iniciar un proyecto de estos, se debe tener en consideración los potenciales impactos que puedan generar, tanto físicos, visuales y medio ambientales, contaminación ambiental y acústica, operacionales, hasta técnicos. Para minimizar estos efectos negativos, los parques se localizan en zonas alejadas de la ciudad, al igual que los aeródromos, pero si llegan a ubicarse cercano a ellos o a dispositivos que permitan la navegación segura de aeronaves, en vez de minimizar estos efectos los maximizan, ya que se transforman en obstáculos para las operaciones aéreas. Según la Organización de Aviación Civil Internacional (OACI) un obstáculo se define como “todo objeto fijo o móvil, o partes del mismo, que se encuentre en un área destinada al movimiento de aeronaves en superficie; o que sobresalga de una superficie destinada a proteger el vuelo de las aeronaves; o que se encuentre fuera de las superficies definidas y se considere que pone en peligro la navegación aérea” (OACI, 2016). Es por lo que se debe adoptar un enfoque cauteloso frente a estos proyectos, para garantizar la seguridad de todos los vuelos en todas sus etapas y en todo momento.

Anteriormente se mencionan los potenciales impactos que genera el desarrollo de turbinas eólicas, pero los que se ven reflejados directamente sobre la aviación corresponden a los técnicos y físicos (Airspace & Safety Initiative Windfarm Working Group, 2013).

Las turbinas generan obstrucciones en la transmisión de ondas electromagnéticas de un radar de vigilancia que se traducen en distorsión o reflexión de la información enviada por estos equipos. Los radares primarios y secundarios utilizados por Control de Tráfico Aéreo (ATC por su nombre en inglés) son los que se ven afectados.

Los impactos físicos se dan debido a que las obstrucciones que generan las turbinas en el espacio aéreo circundante a la pista de aterrizaje de un aeródromo afectando la seguridad

de un vuelo cuando éste se encuentra a baja altura durante el aterrizaje y despegue. En este espacio aéreo se elevan superficies imaginarias que limitan la altura de objetos con el fin de garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones aéreas, éstas se conocen como Superficies Limitadoras de Obstáculos (SLO). Además, las características físicas de los generadores eólicos aumentan las exigencias operacionales que un vuelo debe cumplir para las rutas de salida (SID), llegada (STAR) y aproximación (IAC), como gradiente de ascenso o descenso, altitud en un cierto punto o velocidad de ascenso.

2.2.1 Sistemas de Vigilancia de Aeronaves

La Organización de Aviación Civil Internacional (OACI o ICAO por su nombre en inglés) define el sistema de vigilancia de aeronaves como “uno que proporciona la posición de la aeronave y otra información relacionada con la Gestión de Tráfico Aéreo (ATM por su nombre en inglés) y/o de otros usuarios en el espacio aéreo. Este sistema les muestra a los controladores “quienes” están, “donde” y “cuando” estaban en ese lugar”. Además de esta información, puede incluir datos sobre la velocidad vertical y horizontal de la aeronave, y características de ella.

El sistema de vigilancia está conformado por diferentes elementos, los que para su funcionamiento utilizan radares -aquí se encuentran los radares primarios (Primary Surveillance Radar, PRS) y secundarios (Secondary Surveillance Radar, SSR)-, satélites -están los equipos de vigilancia dependiente automática: de transmisión (ADS-B) y de contrato (ADS-C), y balizas, como la Multilateración (WAM). Cada uno de estos elementos de vigilancia basa su funcionamiento en radiación electromagnética, por lo que el espacio que estarán vigilando se encuentra limitado por su línea de visión (LoS por su nombre en inglés). De acuerdo con el Documento 9924 – Aeronautical Surveillance Manual, hay tres técnicas de vigilancia que pueden ejercer estos elementos:

- Vigilancia Independiente No cooperativa: Determina la posición de toda aeronave sin depender de la aviónica de ella, la única interfaz es la energía electromagnética reflejada por el cuerpo de la aeronave. Esta vigilancia la provee el PSR, el que provee posición sin identificar y entregar otro tipo de datos.

- **Vigilancia Independiente Cooperativa:** La posición se deriva de las mediciones realizadas por un equipo de vigilancia local que se encuentra a bordo de la aeronave, un transpondedor, utilizando transmisiones de la aeronave a un equipo en tierra. También, entrega información sobre la altitud barométrica e identificación de la aeronave. El radar SSR en los modos A/C/S y Multilateración proveen esta técnica de vigilancia.
- **Vigilancia Dependiente Cooperativa:** El sistema GNSS incorporado en la aeronave determina la posición de ella, altitud, presión, identidad y otra información, y se la provee al transpondedor, el que transmite la información al equipo en tierra. Esta técnica la proveen los equipos de vigilancia dependiente automática de transmisión (ADS-B) y de contrato (ADS-C).

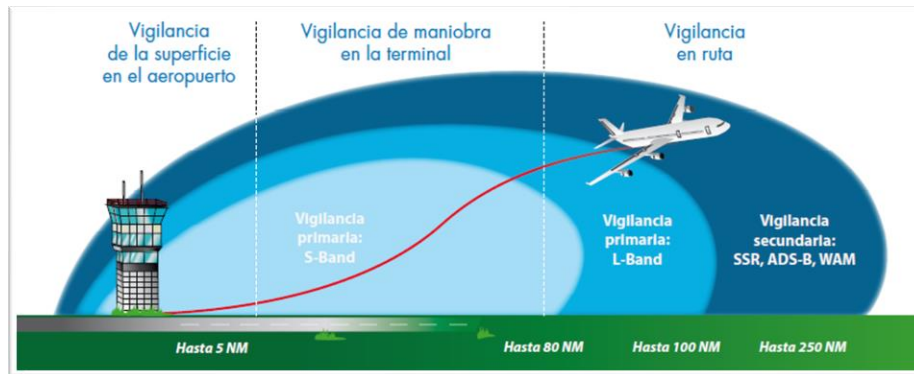
El sistema de vigilancia aeronáutico se ha diseñado con el fin de que el Servicio de Tráfico Aéreo (ATS por su nombre en inglés) regule el espacio aéreo para prevenir colisiones entre aeronaves y con obstáculos ubicados en tierra, aumente la capacidad, acelere y mantenga ordenado el flujo aéreo, y mejore la seguridad. El espacio aéreo controlado por el ATS se divide en las tres partes siguientes:

- **TWR (Torre de Control)**
Control y vigilancia ejercida sobre la superficie del aeródromo y aeronaves en vuelo en un rango de 5 NM alrededor de él. Un equipo de detección no cooperativo puede ser necesario. Los equipos adecuados para ejercer este control incluyen PSR, WAM y ADS-B.
- **APP (Control de aproximación)**
Control de aeronaves que se encuentran en fase de despegue o aterrizaje. Cubre un rango hasta de 80 NM alrededor del aeródromo. Equipos de vigilancia adecuados para control de aproximación incluye PSR, SSR, WAM y ADS-B.
- **ACC (Centro de Control de Área)**
Control y vigilancia de las aeronaves que están operando vuelos por instrumentos en un espacio aéreo controlado, principalmente en la fase en ruta del vuelo, hasta un rango de 250 NM del aeródromo. Los equipos adecuados para control de área

son ADS-C, para áreas remotas u oceánicas, SSR, WAM y ADS-B. Cabe mencionar, que en algunas instalaciones los PSR de largo alcance trabajan junto con los SSR.

En la figura que sigue se observan las tres secciones del espacio aéreo y la cobertura entregada por los radares primarios y secundarios:

Figura 2-4: Secciones de control del espacio aéreo y cobertura de radar PSR y SSR.



Fuente: OACI [1].

La vigilancia de las aeronaves en espacio aéreo controlado es proporcionada por el conjunto de equipos, pero principalmente por los radares primarios y secundarios debido al nivel de exactitud que poseen (OACI [1], 2014). Éstos emiten pulsos electromagnéticos a la aeronave, que retornan a la estación procesadora de información que se encuentra en tierra para determinar la posición. Este pulso puede ser reflejado no solo por la aeronave, sino que también por turbinas eólicas que se encuentran en el camino del patrón de radiación de la antena, y cuando esto ocurre el rendimiento de los radares se puede ver afectado, puesto que las turbinas reflejan el pulso enviado y no permiten captar el objetivo de interés, la aeronave.

2.2.1.1 Radar de Vigilancia Primaria (PSR)

El radar de vigilancia primaria está clasificado como un equipo de vigilancia independiente no cooperativa, el cual utiliza señales electromagnéticas reflejadas para conocer la posición de la aeronave.

La estación en tierra de un PSR consiste en un transmisor, receptor, duplexor y una antena parabólica que sigue un patrón de escaneo de 360° a una velocidad angular constante. Es habitual que los PSR sean monoestáticos, lo que quiere decir que la energía es enviada y recibida por una misma antena. El principio de funcionamiento de estos radares consiste en la emisión de un pulso de energía que viaja a la velocidad de la luz, el cual al tocar a la aeronave se refleja hasta el radar, conocido como eco, y la estación lo procesa para determinar la posición. La posición es determinada al conocer la posición de la antena giratoria cuando el pulso reflejado es recibido (conocido como rumbo) y al medir el tiempo que tarda en recibir el pulso reflejado (conocido como rango) mediante la siguiente fórmula, donde c es la velocidad de la luz en el vacío y t el tiempo que demora en volver la señal al radar:

$$D_{obj} = \frac{c * t}{2} \quad (1)$$

Los objetivos útiles para los PSR son aquellos que se encuentran sobre un cierto nivel de movimiento relativo al radar, entonces utilizando el modo de operación Indicador de Objetivo en Movimiento (MTI por su nombre en inglés), el cual basa su funcionamiento en el efecto Doppler de los objetos, los radares pueden suprimir de la pantalla los ecos devueltos por objetos estacionarios y por objetos no deseados en movimiento, conocidos como “clutter” o “desorden”, como edificios, la torre de los aerogeneradores, colinas o autos en una vía.

El rendimiento de un PSR depende del Radar Cross Section (RCS) de los objetos a detectar, el cual corresponde a la habilidad de los objetos para reflejar las señales enviadas por el radar (OACI, 2011). Depende del tamaño del objeto, su forma, la reflectividad de la superficie del objeto y las direcciones de las señales recibidas y reflejadas. Mientras mayor sea el RCS más detectable es el objeto.

Existen dos tipos de PSR, los que operan en banda larga y en banda corta. La propagación y recepción casi inmediata del pulso emitido hace que estos radares operen a altas frecuencias, siendo diferentes dependiendo del tipo de PSR (OACI, 2011):

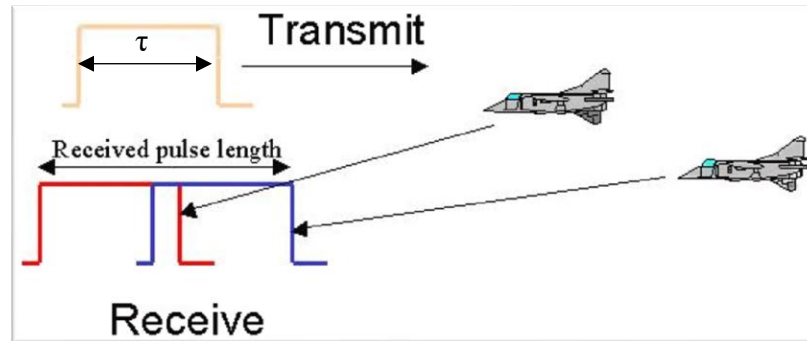
- Banda “L” (banda larga): [1.215 – 1.350] MHz y un rango de onda (λ^5) entre [22 – 24] cm. La velocidad de rotación de la antena está entre 6–10 revoluciones por minuto (rpm) y el rango de detección va desde 120 NM hasta 200 NM. Generalmente es usada para vigilancia de área.
- Banda “S” (banda corta): [2.700 – 3.500] MHz y un rango de onda (λ) entre [8 – 11] cm. La velocidad de rotación de la antena está entre 12–15 (rpm) y el rango de detección está entre 60-80 NM. Generalmente es usada para vigilancia de aproximación y en superficie.

Los PSR cuentan con un interruptor que conecta alternativamente el transmisor y receptor a la antena, conocido como duplexor. En la emisión de un pulso el duplexor está alineado con el transmisor durante el tiempo que dura el pulso, y luego, el duplexor se alinea con el receptor para procesar el pulso reflejado, y así sucesivamente para enviar y recibir los siguientes pulsos. Cuando el radar está operando, durante el tiempo de transmisión de pulso -conocido como ancho de pulso (τ)- no puede procesar ningún eco, haciéndose necesario que el pulso “deje” la antena completamente para que el duplexor cambie al receptor y reciba el eco. Esto determina la “distancia ciega” del radar, por debajo de ella el radar no va a procesar el pulso reflejado y no logrará identificar el objetivo con éxito. Esta distancia viene dada por:

$$r_{ciega} = \frac{c * \tau}{2} \quad , \text{donde } c = 3 * 10^8 [m/s] \quad (2)$$

Los radares pueden transmitir pulsos cortos y largos, siendo la diferencia entre ambos el ancho de pulso. La resolución de alcance del radar corresponde a la capacidad del sistema para discriminar entre 2 o más objetivos que están próximos entre sí, pero diferente rango, la cual se ve impactada por el τ debido a que los pulsos reflejados se superponen provocando que el receptor reciba solo un pulso, más largo, sin poder distinguir que, de hecho, eran 2 objetos en el retorno, como se ve en la siguiente figura:

⁵ Longitud de onda está dada por la velocidad de la luz y la frecuencia del radar tal como sigue: $\frac{c}{f_{radar}}$ y su unidad de medida es el metro.

Figura 2-5: Problema de resolución de alcance.

Fuente: Butler & Johnson.

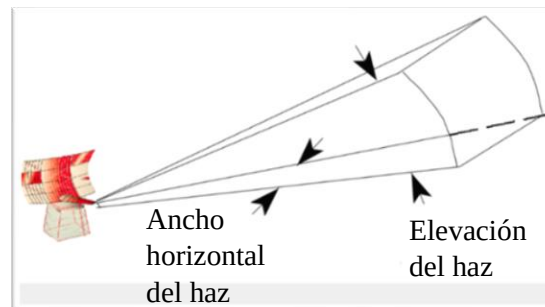
Un sistema de radar diseñado con componentes a máxima eficiencia debe ser capaz de distinguir objetivos que están separados, como mínimo, por la mitad del tiempo de ancho de pulso (Full Afterburner: Choudhari, Karthikeyan, & Madhavan, 2017). El ancho de pulso de un pulso corto, usualmente, es $1 \mu\text{s}$ y entre $50\text{-}100 \mu\text{s}$ en un pulso largo (Indra Company, 2009).

La cantidad de energía que se puede enviar al objetivo en un pulso es el producto de dos cosas: la potencia del transmisor y la duración de la transmisión (τ). Los pulsos cortos transmiten menos energía porque la intensidad reflejada en objetos a corto rango será alta, entonces para detectar objetos que se encuentran a rangos cortos se transmitirán pulsos cortos. En cambio, los pulsos largos transmiten mayor energía para que los objetivos que se encuentran a mayor rango puedan ser captados. Estos pulsos son transmitidos a intervalos de tiempo, conocido como tiempo de repetición de pulso (TRP), durante el cual se esperan los ecos de la aeronave. El TRP es el recíproco de la frecuencia de repetición de pulso (FRP), siendo FRP la cantidad de pulsos emitidos durante 1 segundo. Los PSR de banda “L” tienen un FRP de 300 Hz, mientras que los de banda “S” una de 800 Hz (De Angelis, Fantacci, Menci, & Rinaldi., 2005), sin embargo, hay radares de banda “S” donde la FRP puede variar entre 735 – 1.300 Hz (Indra Company, 2009).

La antena giratoria es la encargada de concentrar la energía transmitida radiada al espacio en un haz directivo, que alcanza los objetivos en la dirección deseada alrededor de ella permitiendo determinar el rumbo que llevan. Este haz, conocido con el nombre de lóbulo por su forma curva, es angosto respecto del ancho horizontal (azimuth) para tener una

mayor precisión de la posición del objetivo y amplio respecto del ancho de elevación para iluminar el espacio ocupado por las aeronaves. Típicamente, el ancho horizontal del haz para la detección de aeronaves está entre 1° o 2° (Skolnik, 1990), mientras más angosto, la detección de las aeronaves será más exacta, ya que, si hay dos aeronaves cercanas lateralmente el haz pasará entre ellas sin enviar ningún reflejo al radar, permitiendo que se muestren 2 objetivos en la pantalla. El ancho de elevación puede estar entre 3° y $5,5^\circ$ cosecante cuadrada $+40^\circ$ (ASC Signal, 2020), (Indra Company, 2009). En la siguiente figura se observa el haz:

Figura 2-6: Forma de haz transmitido.



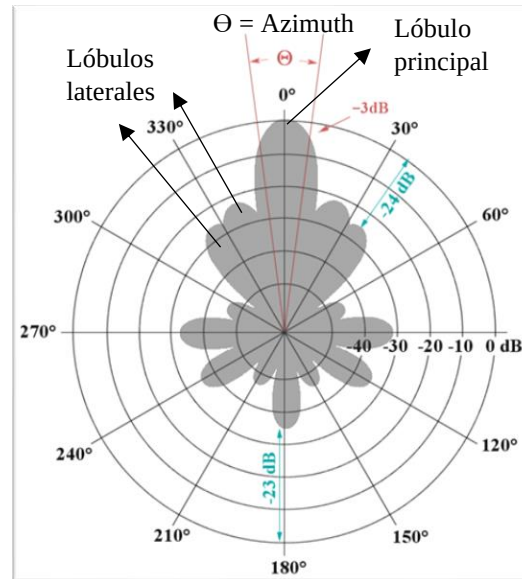
Fuente: Elaboración propia.

Las antenas actuales de PSR siguen un patrón con características de cosecante al cuadrado que le permite una distribución de la radiación en el haz causando un escaneo espacial más ideal (Radartutorial, s.f.). Este patrón se puede conseguir por la instalación de 2 o más bocinas que transmitan las ondas a la antena.

El patrón de radiación de una antena PSR contiene un lóbulo principal, el cual tiene la mayor cantidad de potencia y se dirige a lo largo del eje de propagación cada vez que la antena barre entre 1° o 2° horizontalmente, y varios lóbulos más pequeños alrededor del principal que tienen una menor densidad de potencia, pero pueden recibir energía reflectada. Cabe mencionar que el azimuth del haz corresponde al ancho del lóbulo principal entre los puntos donde la densidad de potencia cae a la mitad de su valor en el centro del haz, o lo que es lo mismo a cuando estos puntos están 3 dB⁶ por debajo de la ganancia máxima. Véase en la siguiente figura:

⁶ Hace referencia a decibelios.

Figura 2-7: Patrón de antena graficado en coordenadas polares.



Fuente: Radartutorial.

Para radares de banda “S” este patrón de radiación le permite a la antena una ganancia, que de hecho corresponde a la potencia que se irradia en una dirección determinada (lóbulo principal), de 32 dB o 34 dB, dependiendo si se trata de un haz alto o bajo. Mientras que la ganancia para PSR de banda “L” es de 33 dB o 36 dB si se trata de un haz alto o bajo, respectivamente, (De Angelis, Fantacci, Menci, & Rinaldi., 2005); (Indra Company, 2009); (ASC Signal, 2020).

2.2.1.2 Radar de Vigilancia secundaria (SSR)

El SSR está clasificado como un equipo de vigilancia independiente cooperativa, el cual se utiliza para vigilancia en aproximación y en ruta. Para este tipo de radar se requiere que la aeronave este equipada con un transpondedor⁷. Los SSR pueden tener la capacidad de:

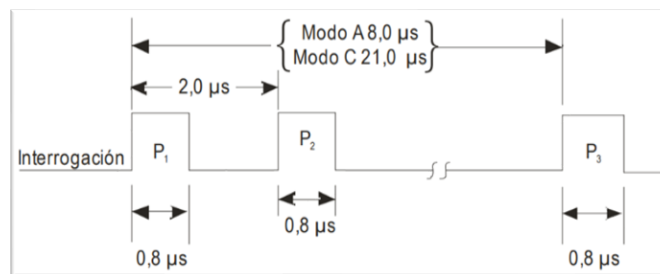
- Modo A/C
- Modo S

⁷ Transpondedor es un dispositivo electrónico que produce una respuesta al recibir una llamada de radiofrecuencia (interrogación desde el radar).

Un SSR con capacidad de modo A/C únicamente, con su antena giratoria transmite constantemente pulsos de interrogación en 1.030 MHz para activar el transpondedor de las aeronaves que se encuentren dentro de su LoS, el cual va a enviar una respuesta codificada de 1.090 MHz al radar que contiene información sobre la identificación de la aeronave (modo A) y la altitud de presión (modo C). Por lo tanto, el SSR va a conocer la posición en 3 dimensiones de la aeronave: su rango (medido por el tiempo que tarda en responder la interrogación), rumbo (medido por la dirección de donde proviene la respuesta) y la altitud barométrica. El rumbo de la aeronave se calcula registrando el rumbo de donde comienza y donde se detiene la respuesta, y tomando el centro de la respuesta como el rumbo que ésta lleva, lo que se conoce como método de ventana deslizante.

Las interrogaciones del modo A se envían para solicitar el código de identificación de la aeronave y las del modo C para solicitar informes de altitud, haciendo que se envíen 2 pulsos como respuesta a la estación. La interrogación consiste en la transmisión de 2 impulsos desde la antena direccional denominados P_1 y P_3 . Se transmitirá un impulso de control P_2 a los 2 μ s de enviado el pulso de interrogación P_1 (OACI, 2014) desde una antena omnidireccional. Cada modo de interrogación se caracteriza por el tiempo de separación entre P_1 y P_3 , como se observa a continuación:

Figura 2-8: Interrogación de SSR en modo A y C (no a escala).



Fuente: Adaptado de Anexo 10 OACI.

El patrón de radiación de un SSR, al igual que un PSR, consta de un lóbulo principal y lóbulos laterales, y si el transpondedor diera respuesta a una interrogación hecha por un lóbulo lateral indicaría una ubicación falsa de la aeronave en un rumbo erróneo. Entonces, para conocer de cual lóbulo proviene la interrogación, y así suprimir la respuesta a un

lóbulo lateral (ISLS por *supresión de lóbulos laterales de interrogación*) se emite el pulso P_2 de la Figura 2-8. Este pulso tiene una ganancia mayor que los lóbulos laterales, pero menor que el principal, y si la aeronave lo detecta más fuerte que P_1 , no va a responder. En ambos modos, el transpondedor responde solo si P_1 es al menos 9 dB⁸ más fuerte que P_2 . Cuando la aeronave se encuentra dentro del alcance de los lóbulos laterales y recibe una interrogación de ellos, su transpondedor se quedará suprimido durante $35 \pm 10 \mu s$.

La respuesta que entrega el transpondedor en modo A/C está compuesta por una serie de pulsos divididos en 4 grupos etiquetados con las letras A, B, C y D, y cada grupo contiene 3 pulsos que llevan asignado el número 1, 2 o 4 para indicar el peso binario de cada uno. Estos pulsos tienen un ancho de $0,45 \mu s$ cada uno y se encuentran entre 2 pulsos, F_1 y F_2 , denominados “impulsos de trama”, los cuales están espaciados por $20,3 \mu s$.

La respuesta a una interrogación en modo A está compuesta por una serie de 12 pulsos que indican el número de identificación de la aeronave. Por ejemplo, si se desea enviar el código 7777 se generan todos los pulsos y si fuera el código 0000 no habría pulsos entre los pulsos de trama. Por otro lado, la respuesta enviada en modo C está compuesta de 11 pulsos (pulso D_1 no se utiliza) e indica la altitud de presión de la aeronave como lo indica su altímetro por variaciones de 100 pies, información que se muestra directamente en la pantalla PPI de los controladores ATC.

Todas las aeronaves responden en la misma frecuencia a las interrogaciones, pero no distinguen a qué estación en tierra de SSR se la están enviando, provocando que una estación en tierra reciba respuestas de aeronaves que han sido interrogadas por otra estación, lo que se conoce como Respuestas Falsas No sincronizadas con Transmisores del Interrogador (FRUIT por su nombre en inglés). Al no conocer el momento en que fue enviada la interrogación, el cálculo del rango de la aeronave lo más probable es que sea erróneo, y como consecuencia se tendría un objeto falso en la pantalla. Una respuesta FRUIT se puede superponer con una respuesta deseada por la estación en tierra, lo que causaría errores al extraer la información.

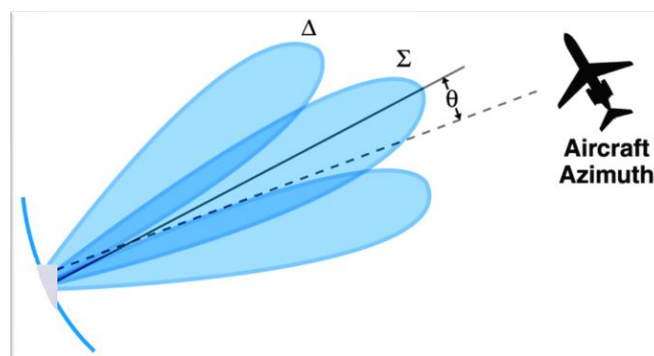
⁸ 2014. OACI. Anexo 10 Telecomunicaciones aeronáuticas - Volumen IV Sistemas de vigilancia y anticollisión.

El modo S es un sistema mejorado para superar las deficiencias de los modos A y C, el cual está diseñado para operar con una sola interrogación/respuesta y no con 2 como en los modos antes mencionados, técnica que se conoce como monopolso. El modo S permite la interrogación selectiva de una aeronave de acuerdo con la dirección única de 24 bits que se le ha sido asignada, lo que quiere decir que se puede seleccionar la aeronave que se desea interrogar para que envíe información, sin que ninguna otra aeronave responda.

Las estaciones terrestres de modo S están ampliamente equipadas con una antena de gran apertura vertical (LVA por su nombre en inglés), ya que para lograr la técnica de monopolso se requiere que la antena tenga capacidad de monopolso, y ésta la tiene. Con esta técnica la transmisión también se realiza a través de pulsos con la misma frecuencia ascendente y descendente de los métodos anteriores (1.030 y 1.090 MHz), lo que cambia es cómo se determina el rumbo de la aeronave.

La antena se divide eléctricamente en dos mitades. La combinación de las dos mitades de salida conectadas en fase a un puerto de salida emite el lóbulo principal llamado “suma (Σ)”, el cual interroga, y conectadas en anti-fase a un segundo puerto de salida radia el haz de diferencia (Δ). Este último haz produce señales de salida que son sensibles al ángulo de incidencia de las señales recibidas, permitiendo que sea posible determinar el ángulo de desviación (θ) de la aeronave respecto del eje del lóbulo principal. La descripción gráfica es como sigue:

Figura 2-9: Haz suma y diferencia en un SSR en modo S.



Fuente: OACI, 2010.

Dado que el ángulo θ se determina a partir de los niveles de amplitud recibidos por los haces, cuando una señal llega a la antena justo por el eje del haz principal produce un máximo de energía en éste, pero una señal nula en el haz Δ , no así cuando la señal recibida es a un ángulo θ de la línea de la antena, ya que la señal del haz Σ será menor y no nula en el haz Δ . De esta manera es posible conocer si la aeronave se encuentre sobre, bajo o justo en el eje del haz principal.

La interrogación que se envía a la aeronave seleccionada, al igual que en modo A/C, consta de un pulso de control para suprimir las respuestas de la aeronave en los lóbulos laterales.

Por otro lado, la respuesta enviada por el transpondedor consta de un bloque de datos que puede ser de 56 o 112 bits de información, y es sometido a una modulación binaria de datos (OACI, 2014). La estación terrestre de modo S puede recibir la información que proveen los modos A/C más el código de 24 bits de la aeronave, la altitud de presión con variaciones de 25 ft, el ID de la aeronave u otra información.

*“El uso de un transpondedor a bordo permite que éste responda en una frecuencia diferente a la enviada desde tierra, evitando así los problemas de desorden que experimenta el PSR”*⁹. Los radares PSR y SSR trabajaran en conjunto para detectar aquellas aeronaves que se encuentren en el espacio aéreo y no tengan transpondedor, y mostrar la información recopilada por ambos en las pantallas de los controladores aéreos.

2.2.2 Superficies Limitadoras de Obstáculos

El espacio aéreo circundante a la pista de aterrizaje de un aeródromo, que se requiere para el ascenso o descenso de las aeronaves, debe encontrarse libre de cualquier obstáculo para garantizar la seguridad y eficiencia de las operaciones aéreas que sucedan en él, ya que pueden dar lugar a mayor altitud o altura de franqueamiento de obstáculos. Para esto, al igual que un obstáculo estático, como edificios, torres de alta tensión o chimeneas de empresas, los aerogeneradores deben mantenerse dentro de los límites hasta donde es

⁹ Beason, Ronnie. A new multilateration optimization technique for air traffic management and surveillance.

aceptable que los objetos cercanos a un aeródromo puedan proyectarse desde el suelo al espacio aéreo.

Para dar cumplimiento a ello se definen superficies imaginarias, con diferentes elevaciones, alrededor de la pista que van a proteger aquel espacio aéreo, las que se conocen con el nombre de Superficies Limitadoras de Obstáculos (SLO). La Organización de Aeronáutica Civil Internacional (OACI) en el Anexo 14 establece 8 SLO y Chile, siendo consignatario del Convenio sobre aviación civil internacional, ha adoptado lo que dispone dicho anexo mediante la normativa aeronáutica DAR 14, y en él se establece lo siguiente respecto de cada SLO:

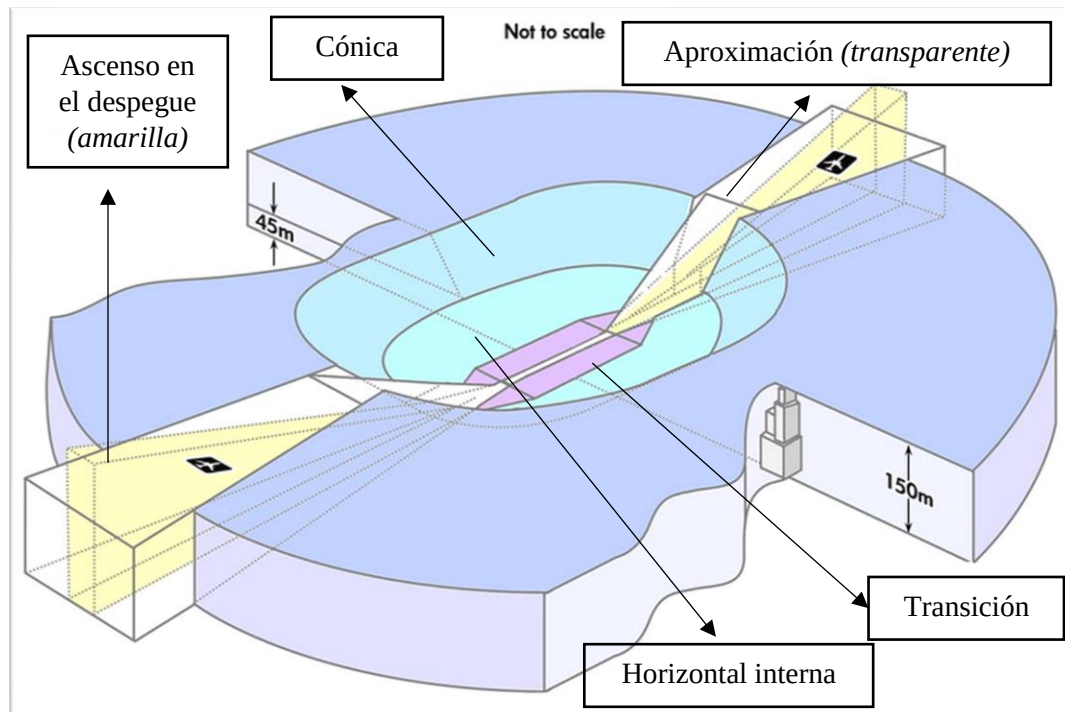
1. Horizontal Interna: Es una superficie situada en un plano horizontal sobre el aeródromo y sus alrededores. Su radio es medido desde el punto de referencia que se fije con aquel fin, pudiendo fijarse en el extremo de la pista. Debe ser de 45m de altura y tener un radio de 2.000m, 3.500m o 4.000m.
2. Cónica: Es una superficie de pendiente ascendente y hacia afuera que se extiende desde la periferia de la superficie horizontal interna. Su altura va desde los 35m a 100 m, con una pendiente de 5%.
3. Aproximación: Plano inclinado anterior al umbral de pista. Esta superficie está limitada por un borde interior de longitud especificada y perpendicular al eje de pista, dos lados que parten de los extremos del borde interior y divergen un 10% o 15% hasta el borde exterior, el cual está ubicado a 30m o 60m desde el umbral.
4. Transición: Superficie que se extiende a lo largo de la franja de pista y parte del borde de aproximación, con una pendiente que puede ser 14,3% o 20%, dependiendo del número de clave de la pista. Su altura será igual a la altura de la superficie horizontal interna.
5. Ascenso en el despegue: Corresponde a un plano inclinado situado más allá del extremo de una pista o zona libre de obstáculos. Proporciona protección a las

aeronaves durante el despegue, indicando que obstáculos deben iluminarse o señalizarse.

6. Aproximación interna: Porción rectangular de la superficie de aproximación inmediatamente anterior al umbral.
7. Transición interna: Su finalidad es servir de SLO para ayudas a la navegación, las aeronaves y otros vehículos que deban hallarse en las proximidades de la pista. La pendiente puede ser de $33,3^\circ$ o 40° , dependiendo el número de clave en una pista de aproximación de precisión, y su altura está determinada por la superficie horizontal interna.
8. Aterrizaje interrumpido: Plano inclinado situado próximo al umbral, que se extiende entre las superficies de transición.

Las longitudes y pendientes de cada superficie se muestran en el **anexo 6.2**. Véase a continuación una figura de las SLO:

Figura 2-10: Superficies Limitadoras de Obstáculos (no a escala).



Fuente: CAA.

Los requisitos respectivos a cada SLO se determinan en función de la utilización prevista de la pista (despegue o aterrizaje, o ambas, y tipo de aproximación) y se han de aplicar dependiendo el modo en que se utilice la pista. En el caso de que se realicen operaciones en las dos direcciones de la pista, cabe la posibilidad de que ciertas superficies queden anuladas debido a los requisitos más rigurosos a que se ajustan otras superficies más bajas (OACI, 2016).

Si la pista se utiliza para procedimientos visuales y para aproximaciones de no precisión solo las cinco primeras superficies serán establecidas. Si la pista se utiliza para procedimientos de precisión de Categoría I se establecen las cinco primeras superficies y las tres superficies restantes se recomiendan. Por último, si es para procedimientos de precisión de Categoría II y III se establecerán las ocho superficies limitadoras.

2.2.3 Procedimientos Instrumentales de Vuelo

Para que las aeronaves se trasladen de un punto a otro por el espacio aéreo deben seguir rutas predeterminadas que han sido diseñadas para gestionar el tráfico aéreo y proveer servicios de tráfico aéreo en un espacio aéreo controlado, denominadas rutas ATS. Estas rutas están definidas por especificaciones que incluyen un designador de ruta, dirección de la ruta (en grados) entre puntos llamados “Waypoints”, distancia entre waypoints, requerimientos y altitudes mínimas de seguridad. Forman parte de estas rutas:

- Standard Instrumental Departure (SID);
- Standard Instrumental Arrival (STAR); y
- Instrument Approach Chart (IAC).

SID corresponde a una ruta identificada en un procedimiento de despegue de instrumentos a través del cual la aeronave pasa de la fase de despegue a la fase en ruta, donde alcanza la aerovía. STAR es una ruta designada de llegada normalizada de vuelo por instrumentos desde la fase en ruta hasta la fase de aproximación inicial. Por último, IAC, llamada carta de aproximación, en ella muestra el recorrido de la aeronave desde que comienza la aproximación inicial hasta que alcanza la pista del aeródromo, incluye también el aterrizaje frustrado.

Estas rutas se producen con el objeto de acelerar el flujo seguro y eficiente del tráfico aéreo que opera desde y hacia la o las pistas de un aeródromo, mediante el uso de rutas específicas, niveles de altitud mínima y gradiente de ascenso o descenso, dependiendo cual sea el caso. Aquellas son restricciones que la tripulación debe cumplir para garantizar la seguridad del vuelo en las fases de salida y aproximación, y se definen como sigue:

- Niveles de altitud: La OACI define la altitud como “la distancia vertical entre un punto o un objeto considerado como punto y el nivel medio del mar (MSL)”¹⁰. En las cartas de navegación aparece estipulada la altitud mínima que se debe cumplir en una zona o en un punto específico del espacio aéreo para que en todo momento del vuelo y en cada tramo definido se conserve el margen de franqueamiento de obstáculos requerido, permitiendo operaciones seguras.
- Gradiente de ascenso o descenso: El ángulo de ascenso de la aeronave corresponde al ángulo formado por la trayectoria de la aeronave respecto del plano horizontal. Mientras que el gradiente significa lo mismo, pero medido en porcentaje. El gradiente determina que tanta distancia vertical se gana con respecto a lo que recorre horizontalmente. Cuando la operación aérea se enfrenta a obstáculos, para mantener y cumplir con los niveles de altitud mínima mencionados la aeronave debe aumentar su gradiente.

Para dar cumplimiento al gradiente especificado y así a los niveles de altitud determinados en las cartas de navegación, la aeronave debe cumplir cierta velocidad vertical de ascenso/descenso, la que también se ve afectada si el gradiente aumenta.

2.2.4 Herramienta CANVAS

Esta herramienta será de gran utilidad para establecer los lineamientos de la eventual propuesta del Servicio de Análisis Aeronáutico (impacto de las turbinas eólicas).

¹⁰ Organización de Aviación Civil Internacional (OACI). Doc 8168 – Operación de aeronaves (Vol. I).

Este modelo fue creado y diseñado por Alexander Osterwalder e Yves Pigneur, donde lo que se busca con este modelo es analizar y crear modelos de negocios de una manera simplificada.

En el libro “Generación de modelos de negocio”, autoría de ambos, se define un modelo de negocio como “*uno que describe las bases sobre las cuales una empresa crea, proporciona y capta valor*”. Es en base a esta definición que se realiza una propuesta de modelo negocio para el Servicio de Análisis Aeronáutico, definiendo los lineamientos que éste tendría.

Para lograr una mejor descripción de un modelo de negocio, éste se divide en nueve módulos básicos que reflejan la lógica de una empresa para conseguir ingresos. Se ve de la siguiente manera y posteriormente se establece cada módulo:

Figura 2-11: Lienzo CANVAS.



Fuente: Buscador Google.

1. **Segmento de clientes:** Aquí se definen los diferentes grupos, ya sea de personas o entidades a los que está dirigida la empresa para detectar sus necesidades. En este punto se debe dar respuesta a:
 - “¿Para quién se está creando valor?”

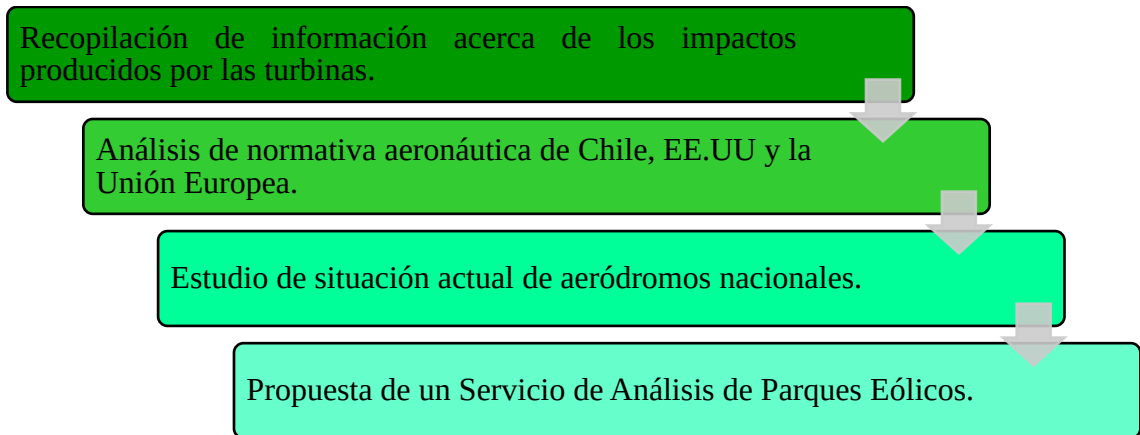
- “¿Quiénes son nuestros clientes más importantes?”
2. **Propuesta de valor:** Esta es la pieza clave de todo modelo de negocio, ya que corresponde al conjunto de productos que satisfacen los requerimientos del segmento clientes. Se da respuesta a:
 - “¿Qué valor se está entregando a los clientes?”
 - “¿Qué problema resolvemos?”
 - “¿Qué necesidad de los clientes satisfacemos?”
 3. **Canales:** En este módulo se explica el modo en que una empresa se comunica con los diferentes segmentos de mercado para llegar a ellos y entregarles la propuesta de valor. Se encargan de dar a conocer a conocer los productos o servicios de la empresa. Se da respuesta a preguntas como:
 - “¿Qué canales prefieren nuestros segmentos de mercado?”
 - “¿Cómo establecemos actualmente el contacto con los clientes?”
 - “¿Cuáles tienen mejores resultados?”
 4. **Relaciones con clientes:** Hace referencia a los diferentes tipos de relaciones que establece una empresa con cada segmento de mercado objetivo, en términos de estimulación de las ventas y capacitación y fidelización de clientes. En este módulo se da respuesta a preguntas como:
 - “¿Qué tipo de relación esperan los diferentes segmentos de mercado?”
 - “¿Qué tipo de relaciones hemos establecido?”
 - “¿Cuál es su coste?”
 5. **Fuente de ingresos:** Lo primordial del presente módulo es establecer el valor que está dispuesto a pagar cada segmento de cliente, ya que así la empresa podrá crear diferentes fuentes de ingresos desde los diversos segmentos de mercado a los que apunta. Debe responder a preguntas como:
 - “¿Por qué valor están dispuestos a pagar nuestros clientes?”
 - “¿Por qué pagan actualmente?”
 - “¿Cómo les gustaría pagar?”
 6. **Recursos claves:** Este módulo describe los activos más importantes que una empresa requiere para establecer su plan de negocios, es decir, crear y ofrecer la

propuesta de valor, llegar a los mercados y percibir los ingresos. Este tipo de recursos pueden ser del tipo físico, económicos, intelectuales o humanos. Debe responder a preguntas como:

- “¿Qué recursos claves requieren nuestras propuestas de valor, canales de distribución, relaciones con clientes y fuentes de ingresos?”
7. **Actividades clave:** Para que el modelo de negocio funcione y sea exitoso, una empresa debe llevar a cabo acciones importantes necesarias para crear y ofrecer la propuesta de valor, llegar a clientes y establecer relaciones con ellos. Este módulo responde a:
- “¿Qué actividades requieren nuestras propuestas de valor, canales, relaciones con clientes y fuente de ingresos?”
8. **Asociaciones clave:** Este módulo describe las asociaciones con proveedores y socios o colaboradores que cooperan para el correcto funcionamiento del modelo de negocios propuesto. Se pueden crear alianzas con otras empresas, joint Ventures o relaciones cliente-proveedor. Aquí se da respuesta a:
- “¿Quiénes son nuestros socios claves?”
 - “¿Quiénes son nuestros proveedores clave?”
 - “¿Qué recursos clave adquirimos a nuestros socios?”
9. **Estructura de costes:** Este último módulo se describen todos los costes que implica la puesta en marcha del modelo de negocios. Los costos deben ser minimizados en todos los modelos de negocio. Se da respuesta a:
- “¿Cuáles son los costes más importantes inherentes a nuestro modelo de negocio?”
 - “¿Cuáles son los recursos y actividades clave más caros?”

2.3 PROPUESTA METODOLÓGICA

Respecto a los antecedentes presentados y lo planteado en el marco teórico, a continuación, se muestra la propuesta metodológica que sigue el trabajo, la cual está relacionada con los cuatro capítulos principales del desarrollo de éste.

Figura 2-12: Propuesta metodológica.

Fuente: Elaboración propia.

En primera instancia, se recopila información de diversas fuentes de investigación tanto aeronáuticas, como elaboradas por profesionales, para establecer y definir los impactos negativos generados por las turbinas sobre la aviación. Se encuentran efectos técnicos, reflejados sobre los radares de vigilancia, y físicos, manifestados sobre las Superficies Limitadoras de Obstáculos (SLO) y los Procedimientos de Vuelo.

Posteriormente, se estudia la normativa aeronáutica correspondiente a Chile, Estados Unidos y la Unión Europa para establecer el tratamiento que en ella se les da a los aerogeneradores cuando se han de instalar. De esta manera se determinan aspectos relevantes que se han de comparar entre ellas.

En tercera instancia, se realiza un estudio respecto a las SLO y los Procedimientos de Vuelo del aeropuerto El Loa de Calama donde en las cercanías se localiza el parque eólico Valle de los Vientos. Este estudio también se realiza para el aeródromo Picho de Valdivia, el cual para el 2021 tendrá en las cercanías el parque eólico Pichilingue operativo.

Finalmente, con la información encontrada sobre el impacto que generan los aerogeneradores se evidencia la posibilidad de entregar un servicio de evaluación, que se dedique a estudiar futuros proyectos eólicos dentro de Chile para evaluar el efecto que producen sobre el espacio aéreo y garantizar soluciones eficaces para ambas industrias, permitiendo una navegación aérea segura.

3 CAPÍTULO III: DESARROLLO

3.1 IMPACTOS DE LAS TURBINAS EÓLICAS EN EL SISTEMA AERONÁUTICO

Para llevar a cabo la propuesta de un servicio de análisis se hace necesario conocer los impactos que las turbinas eólicas puedan llegar a causar en el sistema aeronáutico. Esto aporta a la determinación de viabilidad de cualquier proyecto eólico en una etapa temprana antes de enviar los estudios pertinentes a las autoridades para su aprobación.

Las turbinas eólicas son equipos de grandes dimensiones tanto en altura, como en el diámetro de su rotor, que poseen características, a parte de las dos mencionadas, que las hacen ser consideradas como un obstáculo dentro del ámbito aeronáutico. La ubicación de este obstáculo móvil ya sea que se instale solo, en un grupo pequeño o en un parque eólico, hace que la convivencia entre él y el aeródromo se torne compleja debido a que tiene implicaciones directas técnicas y físicas sobre el sistema aeronáutico.

Las implicancias técnicas se ven reflejadas en el funcionamiento de los equipos de vigilancia aérea, siendo éstos los radares primarios y secundarios. Mientras que las físicas se manifiestan en el espacio aéreo circundante a un aeródromo que debe estar libre de obstáculos para asegurar operaciones seguras. Por último, las implicancias operacionales se ven reflejadas en las rutas de vuelo de las aeronaves y en las exigencias de aquellos procedimientos. Sin embargo, respecto a las últimas dos implicancias, no significa que estructuras no puedan ubicarse cerca de un aeródromo, sino más bien que éstas deben estar en el lugar correcto, su altura debe ser controlada y deben estar señalizadas para ser distinguidas.

3.1.1 Impactos Técnicos

Los sistemas de radares de vigilancia aeronáutica basan su funcionamiento en la transmisión de ondas de radio y cuando un objeto, en este caso las turbinas eólicas, se encuentra dentro de su línea de vista (LoS) el funcionamiento de ellos se puede ver

significativamente degradado. Dadas las características físicas de la turbina y que poseen un RCS¹¹ mayor al de una aeronave, las turbinas se transforman en obstáculos que afectan el flujo normal de la transmisión y recepción de las ondas, y la visión del radar detrás de un objeto sólido. Por lo tanto, afectan negativamente estos equipos.

Los radares primarios PSR al ejercer vigilancia no cooperativa son los que se ven más afectados por las turbinas eólicas, ya que interpretan todo movimiento dentro de su rango como un objeto y lo procesan para mostrarlo. En cambio, el SSR no se ve afectado en la misma medida que el PSR, pero cabe la posibilidad de que la energía transmitida se desvíe y se entregue una información incorrecta.

Los aerogeneradores pueden llegar a causar objetivos falsos en los radares, provocar que las aeronaves de interés sean perdidas y no se logren detectar o que se muestre una ubicación incorrecta de las aeronaves. Además de que los aerogeneradores se encuentren en la LoS del radar, la interferencia se incrementa si se encuentran en un parque eólico, a una distancia cercana al radar o dentro del rango que cubren los sistemas de vigilancia.

A continuación, se describen de forma teórica, de acuerdo con lo rescatado de estudios y documentos, los impactos técnicos producidos por las turbinas en los radares nombrados.

3.1.1.1 Clutter o desorden en un radar PSR

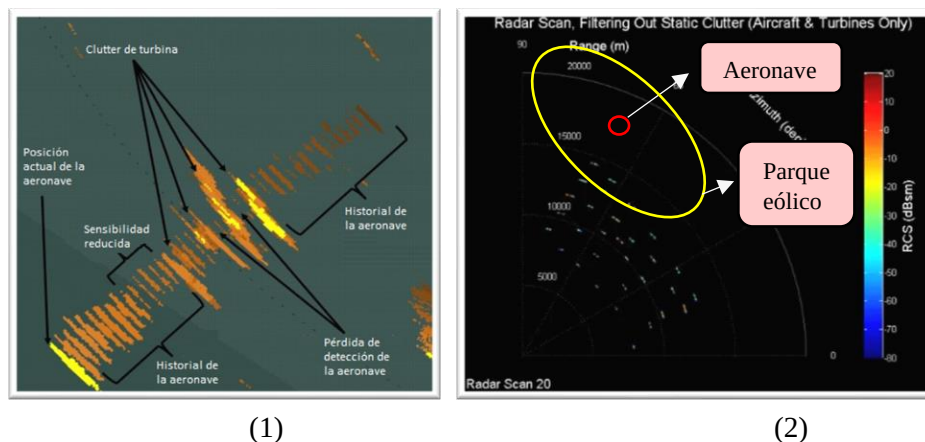
Todas las superficies (mar o tierra), condiciones atmosféricas (lluvia, tormentas) y objetos, tanto estáticos como en movimiento (vehículos, pájaros, aerogeneradores) que se encuentren en la vecindad de cobertura de un radar pueden producir un eco a las señales que éste envía, pero cada tipo de radar, meteorológico o de vigilancia aérea, se va a enfocar en el retorno de objetos que sean de su interés, es decir, los ecos de lluvias o tormentas y los de aeronaves, respectivamente.

¹¹ Radar Cross Section (RCS) corresponde a la medida de cuán detectable es un objeto por un radar, dependiendo del material que está hecho, tamaño y forma. Una aeronave jumbo tiene un RCS entre 10 – 20 dBsm igual a $10 - 100 \text{ m}^2$, mientras que una turbina puede alcanzar un RCS entre 40 – 60 dBsm equivalente a $10.000 - 1.000.000 \text{ m}^2$.

Cuando un radar recibe retornos de objetos no deseados éstos pasan a ser retornos falsos (Civil Aviation Authority, 2016), conocidos como “clutter” o “desorden”, su funcionamiento puede degradarse, ya que éstos pueden afectarlos de dos maneras, pueden (1) esconder o confundirse con aquellos ecos de objetos de interés y (2) elevar el umbral de detección (Air Warfare Center, 2005). El segundo problema también se conoce con el nombre de desensibilización (de la Vega, Matthews, Norin, & Angulo, 2013).

En este caso, un PSR se enfoca en los retornos producidos por las aeronaves y al implementar la función del MTI puede eliminar las respuestas producidas por objetos estáticos, como la torre. Sin embargo, las turbinas eólicas, a pesar de ser objetos que no son de interés para un radar de vigilancia aérea, poseen componentes móviles que alcanzan una velocidad cercana a la de despegue o aterrizaje de las aeronaves originando que el radar las declare como objetos en movimiento, considerado como una falsa alarma, y las muestre en las pantallas (Butler & Johnson, 2003). Al recibir el retorno en la estación y procesarlo, la aeronave y turbina se pueden mostrar en la pantalla como una “mancha de color”, conocido como “eco pintura de piel”, o mediante símbolos, lo que se muestra en la siguiente figura:

Figura 3-1: Pantalla PPI de un PSR que muestra el eco de una aeronave y de turbinas eólicas (1) como eco pintura de piel y (2) con símbolos.



Fuente: Artículo de Clive Jackson y Remcom Software.

En la figura (1) la mancha referente a la turbina se superpone a la correspondiente de la aeronave, produciendo que esta última quede escondida y no se observe su mancha hasta

que se aleja del parque eólico. Esto corresponde al enmascaramiento producido por el clutter recurrente de las turbinas cuando la aeronave está moviéndose dentro del parque eólico. En la figura (2) se observa que el eco reportado por la aeronave y el parque eólico (clutter) puede ser similar, incluso tener la misma intensidad, asimismo, que la aeronave se esconde entre las turbinas y si no fuera porque se va moviendo a través del parque eólico, a diferencia de las turbinas que están en la misma posición girando, su distinción se tornaría difícil.

En el video elaborado por Remcom Software, Figura 3-1 (2), el clutter de cada turbina se muestra como símbolo, el cual cambia ligeramente de posición en cada barrido que hace la antena, pues las aspas están rotando y en cada barrido se ilumina otra sección de ella. Como consecuencia se produce una apariencia llamada “twinkling” (parpadeo) o “efecto flash del aspa” (Civil Aviation Authority, 2016).

El problema de clutter primordialmente es un problema para los operadores de radar de aeropuerto porque a menudo ocurre a bajas altitudes (Novák, 2009) y se puede agravar mientras exista una mayor cantidad de turbinas, ya que generarían áreas y densidades mayores de desorden (Civil Aviation Authority, 2016).

3.1.1.2 Desensibilización de radar PSR

Como se menciona en la sección directamente anterior, el clutter de las turbinas va a elevar el umbral de detección del radar, conduciendo a una disminución de que el eco de una aeronave real sea detectado por el radar.

El radar PSR cuenta con un umbral de detección (U_{det}) que va a determinar el límite de señal bajo el cual el retorno de un objeto será detectado o no y mostrado al operador, estando este umbral ajustado a un nivel que permita la mejor relación entre la probabilidad de detección (P_d) y la tasa de falsas alarmas (T_{fa}). El radar utiliza un filtro, llamado CFAR, en el procesamiento de la señal del radar que intenta mantener una tasa de falsas alarmas controlada mediante ajustes en el U_{det} para que no se vea afectada la detección de aeronaves, pero no siempre se consigue debido a los cambios en la señal reflectada al radar.

La técnica de aquel filtro es el CFAR (tasa de falsas alarmas constante), también conocida como “promedio de fondo” de acuerdo con el documento elaborado por Butler & Johnson, la cual es bajo el principio que se decide la existencia de algún objeto en la celda de resolución del radar comparando la intensidad de la señal recibida con un conjunto de umbrales relativo al fondo local. Haciendo uso del nombre, para lograr una T_{fa} constante se usa un promedio de fondo, el cual se consigue promediando la potencia que se registra en cada celda vecina a la celda que está bajo evaluación (celda donde se sea determinar si existe un objeto). Así, se determina el fondo local a la celda de prueba y, por ende, el umbral de detección.

Cuando una sección de la aeronave se encuentra en la celda a evaluar y las turbinas en aquellas celdas de referencia, debido a la gran RCS de las turbinas -importante recordar que es mayor al RCS de una aeronave- la potencia dispersada por el clutter es bastante alta (por fórmula de potencia generada por el clutter¹²) dando un promedio igualmente alto, lo que resulta en un fondo local alto que elevará el umbral de detección y reducirá la probabilidad de detección de objetivos reales alrededor del parque eólico (de la Vega, Matthews, Norin, & Angulo, 2013); (Butler & Johnson, 2003); (Airspace & Safety Initiative Windfarm Working Group, 2013). Aquello significa que las señales más altas a dicho umbral serán procesadas por el radar y las bajas se perderán.

Lo contrario ocurre si el radar determina que en celdas vecinas no hay secciones de turbinas, las señales son más bajas y esto contribuye a reducir el umbral y, como consecuencia, se reducen las pérdidas de detección de aeronaves en las proximidades de las turbinas eólicas (Butler & Johnson, 2003).

3.1.1.3 Pérdida de seguimiento de la aeronave

De acuerdo con el documento preparado por el Airspace & Safety Initiative Windfarm Group de Reino Unido, otro efecto posible producido por los aerogeneradores corresponde

¹² La potencia dispersada en la turbina de vuelta es radar está dada por la fórmula: $P_{ref} = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4}$, siendo σ el RCS de ella. Esta fórmula es solo cuando no se produce reflexión multi trayecto, sino que el lóbulo principal se enfrente al objeto que se desea localizar.

a la actualización del track (pistas) de la aeronave utilizando un retorno falso. Este efecto predomina en los PSR debido a su calidad de vigilancia no cooperativa que recibe retornos de todos los elementos que reflejen su señal.

Los procesadores de radares PSR y SSR modernos están diseñados con la capacidad de vincular los retornos primarios y secundarios a una misma aeronave, lo que significa que el operador puede ver una respuesta combinada en sus pantallas y llevar un seguimiento de la ubicación que ha tenido la aeronave en el espacio aéreo controlado.

Cuando existe una densidad significativa de clutter ocasionado por varios aerogeneradores y la aeronave ingresa a esta zona, no literal, sino que, visto desde la pantalla del operador, ambas van a producir una respuesta primaria, pero existe la posibilidad que el procesador del radar no pueda asignar la respuesta secundaria emitida por la aeronave a su retorno original primario y, en su lugar, la vincule a una respuesta generada por un objeto falso que viene siendo el aerogenerador. Debido a la pérdida de la aeronave por la desensibilización, se va a generar y mostrar un track erróneo de la aeronave y no el que está siguiendo realmente, lo que es bastante crítico ya que, el controlador ATC está recibiendo información engañosa y falsa.

En un documento elaborado por la Civil Aviation Authority¹³ también se aborda esta pérdida de seguimiento y se expresa lo siguiente respecto de ella *“Los falsos retornos de PSR también pueden “seducir” las pistas de aviones reales lejos de sus verdaderos retornos a medida que el radar intenta actualizar una pista de avión usando el retorno falso. Esto puede conducir a la degradación de la capacidad de seguimiento por radar”*.

3.1.1.4 Reportes de objetivos falsos debido a reflexión indirecta en radar PSR y SSR

En los 3 impactos mencionados anteriormente se ha mencionado que el clutter directo de las turbinas eólicas genera objetivos falsos que son percibidos por el radar y afectan su funcionamiento, además, de que el operador los puede interpretar como objetivos reales.

¹³ 2016. Civil Aviation Authority. CAP 764 - Policy and Guidelines on Wind Turbines.

Estos falsos dependen de la ubicación que tenga la turbina, características técnicas del radar y condiciones de la superficie donde se refleja la señal. Pero al estar las turbinas agrupadas en un parque eólico la señal transmitida por el radar puede reflejarse en ellas antes de alcanzar el objetivo real y regresar al radar. Aquello se conoce como reflexiones indirectas y dichos falsos son producidos por la dispersión multi trayecto de las turbinas para la energía transmitida desde el radar y la señal dispersada por la aeronave. Las reflexiones multi trayecto afectan a ambos radares, pero de una manera diferente.

Este tipo de reflexiones provocan problemas graves de seguridad ya que, si existe una pequeña diferencia entre la señal directa y la reflejada multi trayecto, la señal que recibe el radar es una combinación de ambas, lo que puede llegar a causar errores en la determinación del rumbo que ella lleva (En el caso del radar SSR este tópico se aborda en la sección 3.1.1.5: “SSR: Errores de rumbo de la aeronave”). Y en el caso que exista una gran diferencia entre ambas señales, éstas pueden ser separadas lo que provoca reportes de objetivos falsos que no corresponden a una aeronave, sino a las turbinas eólicas, y problemas en los códigos de respuesta.

En el caso de un SSR, éste emite una señal de interrogación y la aeronave una señal de respuesta a dicha interrogación, pero cuando una turbina eólica de un parque eólico se interpone en el camino de una de las señales o en ambas puede ocasionar que la energía de la señal sufra una reflexión en ellas y la señal reflejada pueda ser separada de la señal directa, causando reportes de objetivos falsos.

El reporte de un objetivo falsos o de respuestas falsas se deben a la implementación de la supresión de lóbulos laterales de interrogación (SLLI), el radar utiliza el pulso P2 para suprimir que se interroge mediante lóbulos laterales, y si llega a suceder el transpondedor de la aeronave queda suspendido durante 35 μ s. El problema aparece cuando la señal del pulso P1 de la interrogación multi trayecto reflectada en la turbina eólica llega al transpondedor después del pulso P2 de la interrogación directa, ya que la interrogación desde el lóbulo principal puede interpretarse como una interrogación realizada por un lóbulo lateral. Además de reportes falsos, la SLLI en conjunto con la superposición de pulsos de la señal reflejada y directa, pueden cambiar la forma de la onda y distorsionarla,

provocando que el SSR no pueda reconocerla y se pierda la detección del objetivo (reducción de la probabilidad de detección).

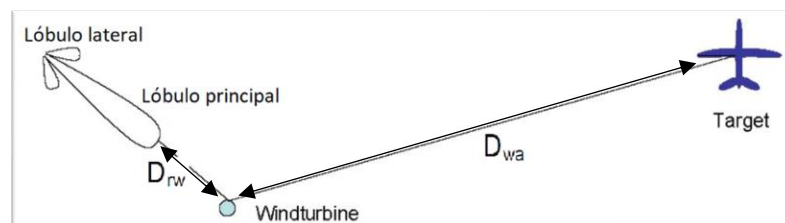
Asimismo, la decodificación del código de respuesta en modo A y C puede verse afectado al contener pulsos de menor amplitud producidos por la reflexión de la señal en un objeto, ya que el procesador del radar no es capaz de discriminarlos contra los pulsos que verdaderamente el transpondedor excitó para enviar su respuesta (tienen una amplitud diferente) y los toma como parte de la respuesta.

Por otro lado, en el caso de un PSR, el documento elaborado por EUROCONTROL¹⁴ establece 4 escenarios donde puedan surgir reflexiones multi trayecto, los que son tratados a continuación. Las reflexiones mencionadas se pueden dar porque los ecos reales de las aeronaves se reflejan desde la turbina (caso 1 y 2) o los ecos de la turbina (objetos falsos) se reflejan en la aeronave (caso 3 y 4). En el **Anexo 6.3** se entrega más detalle sobre la potencia reflejada y la distancia entre la aeronave y turbina para que los objetivos falsos aparezcan, dependiendo de cada caso.

3.1.1.4.1 PSR Caso 1

En esta situación, la aeronave se encuentra más lejos que el aerogenerador del radar. El principio de esta reflexión es que la señal transmitida por el radar se refleja en la turbina en dirección hacia el objetivo real y regresa al radar por el mismo camino, es decir, la turbina se interpone en el eco real de la aeronave. La señal reflejada se recibe a través del lóbulo principal de la radiación. Este caso se muestra en el siguiente esquema:

Figura 3-2: Reflexión caso 1.



Fuente: Adaptada de Arne Theil & Lucas J. van Ewijk.

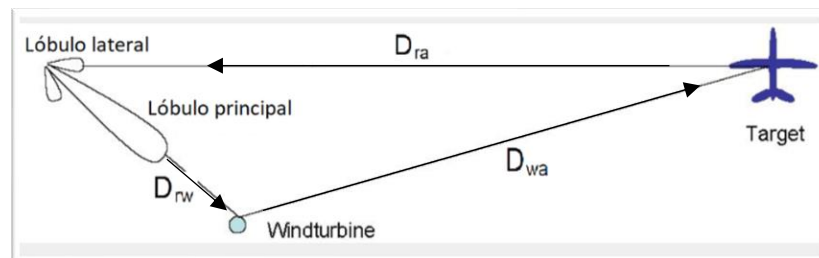
¹⁴ EUROCONTROL. How to assess the potential impact of wind turbines – Surveillance Sensors.

El radar determina la ubicación de la aeronave según el tiempo que demora en retornar el eco de la aeronave, para este caso la señal enviada viaja la misma distancia que el eco de retorno. Entonces, como el eco real de la aeronave se refleja desde la turbina hacia el radar, la aeronave va a producir un informe de objetivo real en la posición real que tiene, pero ella misma puede producir un informe de objetivo reflejado, que viene siendo el objetivo falso, en el rumbo de la turbina (debido a la reflexión del eco). Además, puede producir un cambio en el rumbo real que lleva la aeronave y determinarlo como si fuera en el mismo rumbo que la turbina.

3.1.1.4.2 PSR Caso 2

En este caso, al igual que el anterior, la aeronave se encuentra más lejos del radar que la misma turbina. El principio de esta reflexión indirecta es que la señal transmitida por el radar desde su lóbulo principal alcanza el aerogenerador, en vez de éste reflejarse de vuelta al radar, se refleja hacia la aeronave y su retorno real es reflejado directamente al radar, sin que la turbina se interponga nuevamente en él como en el caso anterior. A diferencia del caso 1, el retorno real de la aeronave es recibido por el lóbulo lateral de la radiación. Véase el esquema a continuación:

Figura 3-3: Reflexión caso 2.

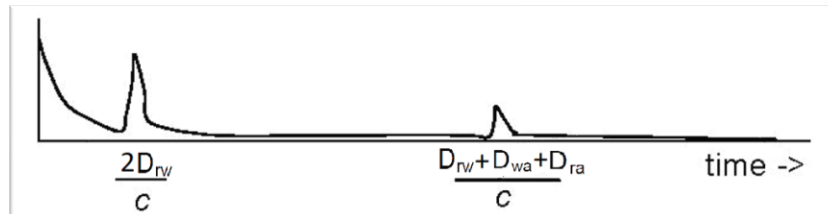


Fuente: Adaptada de Arne Theil & Lucas J. van Ewijk.

Anteriormente, se dijo que la señal se refleja hacia la aeronave, pero no por completo porque una parte de esta energía se debe reflejar en la turbina de vuelta al radar PSR, así éste la puede procesar y mostrar al operador, pero siempre y cuando la turbina respete la distancia ciega dada por la ecuación (1). Al estar la turbina más cerca del radar el tiempo que transcurre hasta que el radar recibe la señal refleja es poco, lo contrario, a cuando recibe el eco real, ya que la señal reflejada debe recorrer $D_{rw} + D_{wa} + D_{ra}$, y además, la

potencia que va a reflejar el objetivo va a ser menor (véase la Figura 3-4). En la Figura 3-4, el eje vertical corresponde a la potencia de señal recibida por el radar, el horizontal al tiempo hasta que se recibe la señal reflejada y c es la velocidad de la luz.

Figura 3-4: Eco producido por la turbina y aeronave.



Fuente: Arne Theil & Lucas J. van Ewijk.

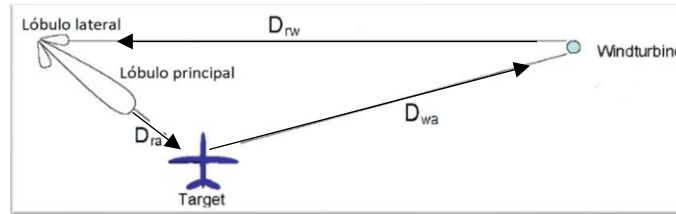
En este caso, la reflexión de la señal en la turbina crea el informe de un objetivo reflejado, que viene siendo el objetivo falso, en el rumbo de la turbina. El tiempo t de la ecuación (1) corresponde a $\frac{D_{rw} + D_{wa} + D_{ra}}{c}$ y esa misma fórmula arroja que la D_{obj} es $\frac{D_{rw} + D_{wa} + D_{ra}}{2}$, pero esta distancia puede que no concuerde con la distancia a la que realmente está la aeronave del radar (D_{ra}), afectando el rango de la aeronave. *Un objeto falso también puede aparecer cuando la antena apunta a la turbina eólica* (Theil & van Ewijk, 2007). De igual manera esta reflexión puede afectar el rumbo real que lleva la aeronave al recibir el eco reflejado por el lóbulo lateral.

3.1.1.4.3 PSR Caso 3

En este caso y el siguiente, a diferencia de los dos casos anteriores, es la aeronave la que se encuentra en las cercanías del radar y la turbina está más alejada. Es la aeronave la que en ambos casos se encuentra en la dirección del radar principal de la radiación.

El principio del tercer caso de reflexión indirecta es que la señal transmitida por el radar desde su lóbulo principal alcanza a la aeronave, y en vez éste reflejarse de vuelta al radar, se refleja hacia la turbina y su eco se refleja directo al radar. La señal reflejada en la turbina viaja D_{rw} metros y es recibida por los lóbulos laterales de la antena. Véase a continuación:

Figura 3-5: Reflexión caso 3.



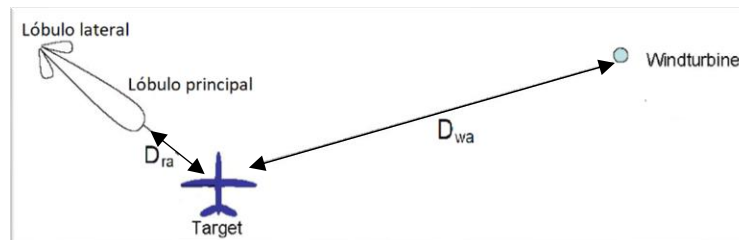
Fuente: Elaboración propia.

Los ecos de la turbina se reflejan en la aeronave y esta última produce un reporte de objetivo real en su posición actual (por estar en el lóbulo principal), pero puede llegar a producir un segundo reporte de objetivo reflejado en el mismo rumbo que lleva.

3.1.1.4.4 PSR Caso 4

En este caso la reflexión, la señal transmitida por el radar desde su lóbulo principal se refleja en la aeronave en dirección hacia la turbina y regresa al radar por el mismo camino, es decir, la aeronave se interpone en el eco producido por la turbina. La señal reflejada se recibe a través del lóbulo principal de la radiación. Este caso se muestra en el siguiente esquema:

Figura 3-6: Reflexión caso 4.



Fuente: Elaboración propia.

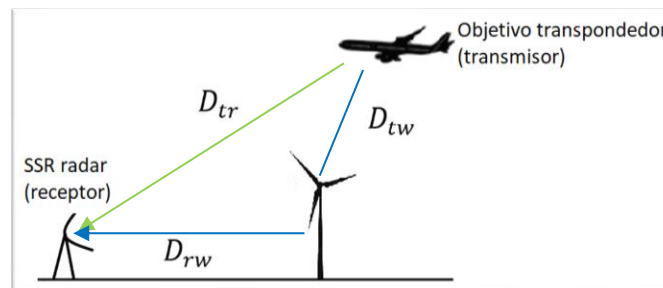
Al igual que el caso anterior, el eco real de la aeronave se recibe desde el lóbulo principal de la radiación, por lo que la aeronave producirá un informe de objeto real en la posición verdadera que tiene, pero puede producir un segundo informe de objetivo reflejado (objetivo falso) en el rumbo que se encuentra la aeronave.

3.1.1.5 SSR: Errores de rumbo de la aeronave

Como se ha mencionado en la sección directamente anterior, las reflexiones multi trayecto pueden causar errores en la determinación real del rumbo de la aeronave cuando existe

una pequeña diferencia (menos de $0,25 \mu s$ lo que es equivalente a 75 m) entre la señal de respuesta directa y la reflejada multi trayecto, ya que la señal recibida por el radar es una combinación de ambas. A continuación, se muestra un esquema de la reflexión ocurrida, donde D_{tr} es la distancia entre el transmisor, que viene siendo la aeronave, y el radar SSR; D_{tw} es la distancia entre la aeronave y la turbina; y D_{rw} es la distancia entre la turbina y el radar (señal reflejada):

Figura 3-7: Esquema de la reflexión en la respuesta de un SSR.



Fuente: Elaboración propia.

Por lo tanto, este problema de rumbo ocurre si el ratio portadora-interferencia (CIR por su nombre en inglés) entre la señal directa (C-portadora) y la señal reflejada en la turbina (I-interferencia) es menor a un umbral dado de ratio CIR requerido en el receptor.

Ahora bien, este es un problema que puede estar presente en los radares SSR modo A/C (mediante el método de ventana deslizante) y modo S (bajo la técnica de monopolso).

En el modo S el sistema calcula el rumbo que lleva la aeronave usando la orientación de la onda electromagnética de respuesta cuando alcanza la antena, en su señal de suma y diferencia. Las reflexiones que le ocurran a la señal de respuesta enviada por el transpondedor de la aeronave desde objetos como las turbinas eólicas provocan que uno de los 2 haces cambie, y cuando la señal directa y reflejada alcanzan la antena se combinan de tal manera que el frente de onda está distorsionado y, por ende, también lo está el ángulo de rumbo de la aeronave.

En el caso del modo A/C que funcionan bajo el método de ventana deslizante, la energía enviada como respuesta desde el transpondedor se refleja en las turbinas eólicas que estén

en su paso y esta energía reflejada que llega de vuelta a la antena posee información dispersa del rumbo real que lleva la aeronave.

Este problema, además de afectar a ambos sistemas de radar SSR, ocurre a los objetivos que se localizan bastante lejos de las turbinas y en su mismo rumbo. Se ha reportado que los errores de rumbo son generalmente menos de 2° (Lemmon, Carroll, Sanders, & Turner, 2008).

3.1.1.6 Sobrecarga del procesador PSR y SSR

Antes de la explicación, es importante mencionar que para este caso las áreas afectadas no dependen de la ubicación que tengan las turbinas, sino de los ecos falsos que puedan llegar a generar y que fueron tratados anteriormente y del diseño interno con el que cuente el sistema del PSR.

Cuando el radar PSR incluye un plot extractor¹⁵ y/o un rastreador de radar único (mono-radar tracker) tendrá limitaciones en cuanto al número de entradas que sea capaz de procesar. Si el número de ecos PSR tanto los producidos por las aeronaves, como por las turbinas eólicas (ecos falsos producidos por clutter y reflexiones) es demasiado alto, el procesador del plot extractor puede necesitar aplicar técnicas contra la sobrecarga. Los dos asuntos mencionados pueden impactar operativamente en el radar, ya que se reduce la capacidad que tiene el equipo para el procesamiento de información y al sobrecargarse puede dejar de percibir información realmente importante proveniente de las aeronaves en el espacio aéreo.

En el caso de un SSR, su procesador también se ve sobrecargado cuando existe una cantidad significativa de objetivos falsos presentes.

3.1.1.7 Saturación del receptor del radar PSR

Cuando la turbina está dentro de la LoS del radar PSR, teniendo también en consideración el terreno que pueda estar dentro de la LoS y que éste no esconda a la turbina, es posible

¹⁵ Plot extractor corresponde a un algoritmo incorporado en los radares que procesa los datos obtenidos de las “plots”, las que corresponden a informes de los objetivos resultantes de ambos sensores de vigilancia (PSR y SSR).

que la energía dispersada por una turbina afecte el funcionamiento y rendimiento del receptor del radar aumentando su nivel de ruido efectivo¹⁶ (N_{ruido}), el cual corresponde al nivel mínimo que debe tener la señal para comenzar a ser percibida y está por debajo del umbral de detección. La ocurrencia de ese aumento llega a causar que las aeronaves deseadas de detectar se pierdan o incluso causen reportes de objetivos falsos (Lemmon, Carroll, Sanders, & Turner, 2008). El N_{ruido} viene dado por la ecuación que sigue:

$$N_{ruido} [dBm] = -174 + 10 \log(B_{radar}) + NF \quad (3)$$

Donde B_{radar} es el ancho de banda del receptor en [Hz] y NF el ruido de figura en [dB].

Los aerogeneradores, siendo objetos no deseados para el radar, tienen una RCS bastante alta por lo que, la potencia que dispersan (calculada con la ecuación básica de radar) de vuelta al radar y es recibida por él también es alta y mayor al umbral de detección (U_{det}). Como consecuencia de esa potencia dispersada se tiene que el ruido de la figura NF es alto. Sumado a ello, se tiene que en un radar PSR el nivel de potencia dispersada por la turbina debe ser mayor a -9 dB como mínimo en relación con el N_{ruido} para que comience a causar problemas (un nivel de interferencia a ruido I/N que es mayor a -9 dB) (Lemmon, Carroll, Sanders, & Turner, 2008). Este nivel se relaciona con el U_{det} del receptor mediante la siguiente ecuación:

$$U_{det} [dBm] = N_{ruido} - 9 \quad (4)$$

Entonces como el N_{ruido} aumenta debido a la energía dispersada por las turbinas eólicas, el umbral de detección al que los objetos son detectados y mostrados también aumenta, provocando lo que ya se ha mencionado, que objetos que reflejen una señal más débil que el U_{det} se pierdan.

3.1.1.8 Efecto de sombreado

Las turbinas eólicas son equipos de grandes dimensiones, lo que puede crear un bloqueo del lóbulo principal del radar cuando éste está apuntando en la dirección de la turbina y

¹⁶ También se conoce como Señal Discernible Mínima (SDM).

ellas se ubican dentro de la línea de visión del radar (LoS), al igual que lo haría un edificio, un árbol o cualquier otro obstáculo, provocando una reducción del rendimiento del radar. Dicho bloqueo se ve reflejado en la formación de una región sombreada que queda bloqueada o escondida para el radar directamente detrás de la turbina o del componente que se trate, tal como se observa en la siguiente figura:

Figura 3-8: Sombra provocada por el aerogenerador.



Fuente: Artículo “Software tool for the analysis of potential impact of wind farms on radiocommunication services”.

El artículo de donde fue extraída la imagen anterior ha sido publicado y trata sobre el estudio de esta sombra formada a través de herramientas de software computacional. Cuando se trata de una sola turbina, la región sombreada es menor a cuando es sobre un parque eólico, ya que en éste la región afectada corresponde a sombra provocada por cada una de las turbinas. Véase el **anexo 6.4** para conocer las dimensiones que tiene la región sombreada.

Los pulsos enviados por el radar tienen una longitud de onda (λ) en un rango de centímetros, y las turbinas tienen dimensiones físicas de metros, lo cual permite decir que D y λ son aproximadamente del mismo orden (lo contrario a como ocurre con la luz solar y un objeto, donde $\lambda \ll D$). Esto sumado al fenómeno de la difracción, el cual ocasiona que al chocar el frente de onda con la turbina éste cambie su dirección y se introduzca parcialmente en la región de la sombra, resulta en una región sombreada atrás de la turbina que al ojo humano no es visible y que posee una energía mayor a lo esperado, por ejemplo de la sombra producida por la luz visible (Butler & Johnson, 2003). De igual manera,

habrá energía que al alcanzar la turbina se va a reflejar en otras direcciones, incluso hacia el radar, perdiéndose sin ingresar a esta región.

Cuando el lóbulo principal emitido por la antena alcanza la turbina se produce una interferencia en el patrón de radiación del radar, causando que la detección de aeronaves que se encuentren dentro de la región sombreada se vea degradada debido a una disminución en la intensidad de campo de la señal que se refleja en la aeronave y que recibe el radar (EUROCONTROL, 2014).

El impacto en la intensidad de campo de la señal del radar transmitida en una dirección, tanto la transmisión enviado como el retorno, para un objeto que se encuentra dentro de la región sombreada a una distancia D_{ro} del radar puede ser determinada mediante la siguiente ecuación (Lemmon, Carroll, Sanders, & Turner, 2008):

$$\text{Intensidad de campo relativa} = 1 - \sqrt{\frac{D_{ro} * S^2}{D_{rw} * D_{wo} * \lambda}} \quad (5)$$

Donde:

- D_{ro} es la distancia entre el radar y el objetivo (aeronave) [m].
- D_{rw} es la distancia entre el radar y el aerogenerador [m].
- D_{wo} es la distancia entre la turbina y el objetivo [m].
- S es el ancho más grande de la torre de la turbina [m].
- λ es la longitud de onda del radar [m].

Al tratarse de un radar PSR la fórmula anterior debe ser elevada a 2 para tener en cuenta la transmisión de la señal en ida y vuelta, mientras que para un radar SSR la ecuación se mantiene tal cual. La ecuación

(5) entrega un resultado adimensional, el que para llevarlo a dB y conocer la reducción de poder en el retorno de la señal se utiliza la ecuación de más arriba con una modificación, siempre teniendo en cuenta que se trata de un PSR o SSR, véase a continuación:

$$R_{poder}[dB] = 40 * \log \left(1 - \sqrt{\frac{D_{ro} * S^2}{D_{rw} * D_{wo} * \lambda}} \right) \quad (6)$$

Ahora bien, la posibilidad de perder objetos dentro de región sombreada existe si esta reducción de poder reduce la intensidad de la señal, que regresa al radar (P_R) luego de alcanzar la aeronave, a un nivel más bajo que el nivel de ruido (N_{ruido}) o sensibilidad del radar (ecuación (3)) (Lemmon, Carroll, Sanders, & Turner, 2008). Por lo tanto, es deseable que $P_R + R_{poder} \geq N_{ruido}$ para que la aeronave objetivo tenga más posibilidades de ser detectada por el radar.

Debido a esta región sombreada, que afecta las ondas transmitidas por el radar, y a la ecuación (6), aumentar la distancia entre la aeronave y la turbina D_{wo} reduce la severidad de la pérdida de poder en el retorno de la señal. Incrementar la distancia entre el radar y la turbina también reduce R_{poder} .

En el caso de un radar SSR, la sombra provocada por un obstáculo en el camino de la respuesta transmitida por el transpondedor se forma desde la turbina hacia atrás, en la dirección donde se ubica el radar. Entonces, se genera una obstrucción o sombra que “oscurece” el radar y provoca que la estimación de rumbo en modo A/C de la aeronave pueda estar sesgado y se estime uno erróneo (véase capítulo 3.1.1.5) (Theil & van Ewijk, 2007). Los errores en el rumbo de la aeronave que han sido reportados son generalmente menos de 2° (Lemmon, Carroll, Sanders, & Turner, 2008).

3.1.2 Impactos Físicos

Se han detallado los efectos producidos por las turbinas eólicas en los sistemas de vigilancia aeronáutica primaria y secundaria usados por los controladores de tráfico aéreo para mantener un espacio aéreo vigilado. Se ha mencionado que la ubicación de turbinas eólicas también puede tener implicancias físicas en el espacio aéreo circundante a un aeródromo a causa de sus dimensiones, éstas se manifiestan sobre las SLO y los procedimientos instrumentales de vuelo.

3.1.2.1 Superficies Limitadoras de Obstáculos

Las turbinas eólicas por su altura provocan una obstrucción física a la seguridad del vuelo de una aeronave. Ellas no tienen una altura exageradamente alta como para afectar el vuelo crucero de una aeronave, pero sí para afectar cuando las aeronaves se encuentran más cercanas al terreno, que viene siendo durante la fase de despegue o aterrizaje desde o hacia un aeródromo, o cuando aeronaves militares se encuentran realizando actividades a bajas alturas, pero esto último no es tema de este trabajo de título.

Para dar continuidad a la seguridad que un vuelo debe tener en todas sus fases, sobre todo en las mencionadas, en la normativa aeronáutica chilena DAR 14 titulado “Reglamento de aeródromos” de 2005, de carácter mandatorio, se han establecido las 8 superficies limitadoras de obstáculos (SLO) que fueron detalladas anteriormente. Estas superficies no pueden ser vulneradas por ningún objeto nuevo o preexistente que se desea agrandar verticalmente, ya sea que se trate de una pista de vuelo visual o aproximaciones de o de no precisión. Como consecuencia, la altura máxima de la turbina (altura de torre más longitud del aspa) debe ser controlada y no vulnerar ninguna de estas superficies de seguridad para el aeródromo.

Se conoce que mayormente los aerogeneradores son instalados en grupo para producir mayor electricidad, es decir, en parques eólicos. Instalar más de una turbina conlleva a que se ocupe una mayor área de terreno y espacio aéreo cercano al aeródromo, lo que reduce el espacio que las aeronaves que se encuentren en las fases de despegue o aterrizaje pueden utilizar si se encuentran con problemas técnicos y requieren aterrizar de emergencia en un lugar que no es la pista de aterrizaje/despegue porque no la van a alcanzar.

3.1.2.2 Procedimientos Instrumentales

Por la ubicación de las turbinas eólicas en el camino que la aeronave sigue en el espacio aéreo para lograr el aterrizaje o despegue seguro, los procedimientos de vuelo SID, STAR e IAC al aeródromo del que se trate pueden verse afectados debido a la existencia de este obstáculo no natural, pero los más afectados son la SID e IAC por su cercanía al terreno,

ya se verá el por qué. La aeronave cuando se encuentra en fase de despegue y aterrizaje debe cumplir con niveles mínimos de altitud para obedecer el franqueamiento de obstáculos, lo cual es primordial para la seguridad operacional.

A diferencia de las superficies limitadoras, donde se debe cumplir a cabalidad lo estipulado por el reglamento DAR 14, las especificaciones de los procedimientos instrumentales no están estipulados en un reglamento, sino que lo están en el Documento 8168 denominado “Operación de aeronaves”, elaborado por la OACI (Organización de Aviación Civil Internacional), el cual es un manual de diseño para los procedimientos mencionados. En este sentido, los estados contratantes, en este caso Chile, debe tener en cuenta las condiciones locales de terreno alrededor del aeródromo al establecer las áreas y márgenes de franqueamiento de obstáculos para los procedimientos mencionados.

- **SID**

En un procedimiento de salida, se tiene una superficie de identificación de obstáculos (OIS) con una pendiente de 2,5%, la que trata de entregar una plano que no sea vulnerado por ningún obstáculo, tanto en el recorrido de la aeronave, como a cierta distancia lateral de la línea central de pista, y cuando esto no se logra, se debe aumentar la pendiente de la OIS¹⁷, lo que trae como consecuencia una promulgación de un gradiente de diseño de procedimientos (PDG) más pronunciado que 3,3%¹⁸ para obedecer el espacio mínimo libre de obstáculos (MOC) de 0,8% la distancia a la que se encuentre dicho obstáculo desde el DER. Al cumplir sobrepasar el objeto crítico de la superficie una distancia vertical segura y es posible que ésta se mantenga, la aeronave puede continuar en un gradiente de ascenso de 3,3%.

Un aumento del gradiente que debe operar la aeronave es causante de que la aeronave tenga que aumentar la velocidad para cumplir con los niveles de altitud requeridos sobre el obstáculo y en determinados waypoints para lograr alcanzar la altitud/altura mínima autorizada para la fase de vuelo siguiente que puede ser en ruta, espera o aproximación.

¹⁷ Se entregará la posición y altura/altitud de los objetos más próximos que penetren la OIS.

¹⁸ En el Doc 8168 de la OACI se establece como mínimo PDG para una operación de salida. Equivale a 200 ft/nm.

Por otro lado, un ascenso más empinado desencadena en restricciones para el despegue y por ende en la ruta, ya que para lograr un gradiente así la aeronave va a presentar limitaciones de peso máximo, lo que significa transportar menos pasajeros o menos kilos de carga hacia otros aeródromos. Claramente, la rentabilidad de determinadas rutas puede disminuir y llevar a una baja en frecuencias o, en el caso más drástico, el cierre de ella.

- **STAR**

Como fue mencionado, las STAR son las rutas que conectan la aerovía con el inicio de la aproximación de la aeronave y donde ella comienza el descenso para iniciar la aproximación. Tienen lugar a mayores altitudes comparado con las altitudes cuando la aeronave está despegando o aterrizando, por lo que son las rutas que se ven menos afectadas por obstáculos, a menos que se tratara de colinas. Durante este procedimiento la aeronave debe cumplir con los márgenes de separación mínimos para franquear obstáculos (1.000 ft), lo que puede llegar a causar que se incrementen las altitudes durante el trayecto si se encuentran turbinas. A su vez, esto puede generar que la aproximación inicie a una altitud mayor, siempre manteniendo el gradiente de descenso dentro de criterio.

Para que la aeronave no se exponga a áreas que pueden presentar clutter debido al parque eólico, puede que sean desviadas por otro camino, más largo a que si no estuvieran estas estructuras, y generar un aumento en la cantidad de millas recorridas y de combustible quemado. En sí mismo, se está generando mayores costos financieros que la empresa debe cubrir, o los traspasa a los consumidores aumentando el valor del viaje. En este caso, también es importante tener en cuenta la huella del sonido que se deje con la operación de una aeronave y, es más, al derivar a una aeronave se debe considerar a las personas que no están envueltas en la actividad aeronáutica y se ven expuestas al indeseado sonido que producen.

El impacto ambiental que ello provoca por el incremento de emisiones de CO₂ al ambiente también se debe tener en cuenta, lo cual es contrario a lo que se busca con la producción de energía a verde a través de la instalación de turbinas eólicas.

- **IAC**

En el caso de la aproximación, también se debe mantener un margen de seguridad por sobre los obstáculos en la trayectoria de vuelo (en un procedimiento instrumental es de 1.000 ft tramo inicial, 500 ft intermedio y 250 ft en el final), lo que calcula la altitud/altura de franqueamiento de obstáculos (OCA/OCH), por debajo de la cual la aeronave no puede descender a menos que no se esté vulnerando el franqueamiento de obstáculos.

Las dimensiones de cualquier obstáculo que se encuentre provocan que la OCA/H pueda aumentar y como consecuencia, afectar los mínimos operacionales altitud/altura de decisión DA/H (caso de aproximación de precisión) o la altitud/altura mínima de descenso MDA/H (caso de aproximación de no precisión).

En referencia a ello, la operatividad del aeródromo puede verse en desmedro por la imposición de restricciones al aterrizaje, por el ejemplo que no es posible aterrizar con guía vertical o directamente el MOC se ve afectado, ya que solo pueden operar en dicho aeródromo las aeronaves que reúnan las especificaciones técnicas que el procedimiento exige.

Cabe agregar que, en todo momento en estos 3 procedimientos, y también en la fase en ruta, la aeronave está protegida por un área simétrica a cada lado de la derrota de vuelo que sigue (área primaria y secundaria), en la que se debe garantizar el franqueamiento de obstáculos, es decir, los objetos no las pueden penetrar.

En conclusión, la presencia de turbinas eólicas en las cercanías de un aeródromo, siempre que ellas no vulneren las superficies de seguridad que fueron mencionadas, pueden generar problemas físicos que aumentan las exigencias operacionales que debe seguir la aeronave en los diferentes procedimientos de vuelo.

3.2 ANÁLISIS DE NORMATIVA

En el siguiente capítulo se realiza un análisis a la normativa aeronáutica y ambiental, si fuera el caso, de 3 países; Chile, Estados Unidos y la región Europea; con la finalidad de conocer el tratamiento que se les da a los proyectos eólicos en el sistema aeronáutico de cada uno de ellos. En el caso de Chile, el ente aeronáutico normativo es la Dirección General de Aviación Civil (DGAC), en Estados Unidos es la Federal Aviation Authority (FAA), y, por último, el ente que rige toda la región europea es la European Union Aviation Safety Agency (EASA).

Al final del capítulo se realiza una comparación para conocer semejanzas y diferencias entre cada una de ellas, que luego van a ser de utilidad para desarrollar la propuesta del Servicio de análisis.

3.2.1 Legislación de Chile

En esta sección, para el caso de normativa se analiza la normativa ambiental respecto de los proyectos eólicos para luego conectarla con lo que está estipulado en la normativa aeronáutica chilena, que, por cierto, la autoridad aeronáutica competente que vela por ella y por la aviación civil dentro del territorio nacional, solamente sobre el alcance de sus competencias, corresponde a la Dirección General de Aviación Civil (DGAC).

Primeramente, se ha mencionado en ocasiones anteriores que las turbinas eólicas tienen dimensiones de altura significativas, que hace calificarlas como un obstáculo para la aviación civil. Además, de impactar la navegación aérea, las turbinas también son susceptibles de generar un impacto negativo sobre el medio ambiente, pudiendo ser por el tipo de suelo donde se instalan, o porque utilizan un recurso natural, aunque renovable, entre otras causas.

3.2.1.1 Normativa Ambiental

En Chile, existe un organismo público llamado Servicio de Evaluación Ambiental (SEA) que tiene la central función de administrar y tecnificar el instrumento de gestión llamado

Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), cuya gestión está basada en la evaluación ambiental de proyectos ajustada a lo establecido en la norma vigente, mientras que la tecnificación del sistema apunta a establecer criterios homogéneos para evaluar proyectos con el objetivo principal de proteger el medio ambiente de efectos adversos que éstos puedan provocar. El SEA oficia a todos los Órganos de la Administración del Estado con Competencia Ambiental (OAECA) que participan de la evaluación ambiental del proyecto.

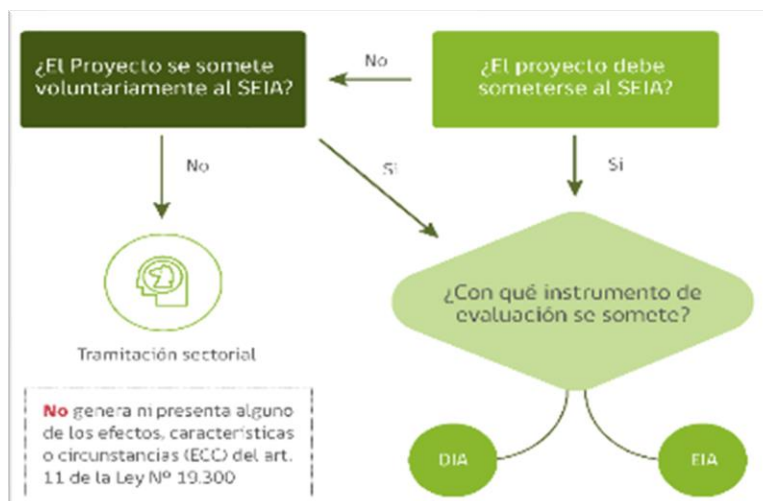
Todo proyecto o actividad, cuales sean sus características, susceptible de generar un impacto negativo sobre el ambiente debe someterse a una evaluación de impacto ambiental a cargo del SEA, aunque puede hacerlo voluntariamente. Los proyectos de generadores eólicos que produzcan más de 3 MW de energía deben someterse a dicha evaluación, de acuerdo con lo estipulado en el artículo 10 de la Ley N° 19.300, sobre Bases Generales del Medio Ambiente, y en el artículo 3 del Decreto Supremo N° 40¹⁹. En el caso de tratarse de un proyecto eólico que no califica dentro de la ley aún debe ser estudiado por el posible impacto ambiental que significa el proyecto²⁰ e iniciar una tramitación sectorial. En este caso, el titular del proyecto debe presentar una Consulta de pertinencia para saber si es necesario que el proyecto se someta obligatoriamente al SEIA.

El titular del proyecto que se somete al SEIA lo hace presentando una Declaración de Impacto Ambiental (DIA), salvo que dicho proyecto presente alguno de los efectos (ECC) enumerados en el artículo 11 de la Ley 19.300 o equivalente al artículo 5, 6, 7, 8, 9 y 10 del DS 40, caso en el cual deberá realizar un Estudio de Impacto Ambiental (EIA). En la siguiente figura se muestra el proceso de evaluación que han de seguir los proyectos:

¹⁹ Este decreto crea el reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA).

²⁰ Evaluar un proyecto debido a que clasifica en lo establecido en el DS 40 se conoce como “por tipología”, mientras que si no califica en dicho decreto se evalúa por su “impacto ambiental”, por ejemplo, el parque eólico pretende ubicarse en un santuario natural.

Figura 3-9: Proceso de evaluación de impacto ambiental.



Fuente: Sitio web del SEA²¹.

Como se menciona anteriormente, el SEA evalúa sobre sus competencias ambientales únicamente proyectos que generan un impacto significativo al medio ambiente, puesto que pueden desarrollarse proyectos de similar tipología, pero que no ingresan al SEIA por no calzar dentro de lo definido en dicho artículo, caso en el que se lleva a cabo la tramitación sectorial. En esta última, el SEA ya ha estimado que el proyecto no sea sometido al SEIA, pero el organismo sectorial debe otorgarle Permisos sectoriales (PS) para la construcción, las obras de funcionamiento, el lugar donde se va a ubicar, entre otros, y claro debe cumplir con la legislación vigente relativa a él.

Los contenidos mínimos comunes que han de contener las DIA o EIA están estipulados desde el artículo 12 al 17 del DS 40 y los contenidos mínimos de cada uno aparecen en el artículo 19 y 18 del mismo decreto, respectivamente. La descripción del proyecto la deben contener ambas y en ella se identifica la normativa respectiva, los Permisos Ambientales Sectoriales (PAS) de contenidos únicamente ambientales, y los PAS mixtos²² que son aplicables al proyecto, teniendo en cuenta que en los PAS mixtos en el SEIA solo se revisa el contenido enmarcado dentro del objeto ambiental. Ambos permisos son otorgados por parte de los organismos OAECA bajo las condiciones que se expresen en la Resolución

²¹ <https://www.sea.gob.cl/>

²² Los PAS se encuentran detallados desde el artículo 111 al 130, mientras que los PAS mixtos están detallados desde el artículo 131 al 160, ambos en el DS 40.

de Calificación Ambiental. SEA maneja una “*Guía para la descripción de centrales eólicas de generación eléctrica en el SEIA*”²³ con la que se pretende orientar al titular de un proyecto eólico y facilitar la labor de los diferentes OAECA, y se espera que contribuya a perfeccionar los procesos de evaluación de proyectos de esta índole en el SEIA.

3.2.1.2 Normativa Aeronáutica

Se ha mencionado a lo largo de este trabajo de título que para mantener la seguridad de las operaciones en un aeródromo hay requisitos sobre la limitación de los obstáculos en el espacio alrededor del aeródromo, en este caso el generador eólico es el obstáculo bajo estudio, los cuales se estipulan en la normativa DAR 14 – Reglamento de aeródromos. Esta normativa fue aprobada por Decreto Supremo N° 173 “Aprueba reglamento de aeródromos”, octubre de 2004 del Ministerio de Defensa Nacional.

Las ocho SLO no pueden ser vulneradas y se han de eliminar los objetos nuevos o existentes que las sobrepasan, exceptuando el caso de la superficie de transición interna donde solo pueden sobresalir objetos frangibles²⁴, como por ejemplo ayudas a la navegación o iluminación. También se excluye el caso en que determine que el objeto nuevo está delante de otro existente e inamovible que actúa como pantalla. Cuando se trata de una pista de aproximaciones de precisión categoría II y III, no se permiten objetos móviles, como las turbinas, que sobrepasen la superficie de aproximación interna, superficie de transición interna o superficie de aterrizaje interrumpido mientras la pista se esté utilizando para aterrizajes. Se exceptúa aquellos objetos que por su función deban estar allí y sobrepasen las superficies mencionadas.

La construcción dentro de estas zonas o en terrenos circundantes a las instalaciones de ayuda a la navegación aérea, requieren siempre, de acuerdo con el artículo 5 de la Ley 16.752, la autorización previa de la Dirección General de Aviación Civil. La DGAC evalúa solo sobre el alcance de sus competencias aeronáuticas, ya que no tiene

²³ Servicio de Evaluación Ambiental (SEA). Guía para la descripción de centrales eólicas de generación eléctrica en el SEIA.

²⁴ Frangibilidad es la característica de un objeto que consiste en conservar su integridad estructural y rigidez hasta una carga máxima conveniente, deformándose, quebrándose o cediendo con el impacto de una carga mayor.

competencias medio ambientales. Pese a esto último, la DGAC se pronuncia directamente respecto de esta área cuando el proyecto eólico ha de ubicarse en una zona de protección con restricción por posible atracción de aves.

Cuando el desarrollador del proyecto eólico envía la documentación al SEA para que sea evaluado, esta institución le consulta a la DGAC sobre el proyecto para que tenga constancia de él. A ello, la DGAC remite el pronunciamiento del estudio señalando deberes y recomendaciones al titular. Por ejemplo, señala la existencia de vulneración a los procedimientos instrumentales y lo que sería pertinente para evitarla, indica que se debe señalar y, lo más importante, indica que el desarrollador del proyecto requiere siempre la autorización de la DGAC para la instalación y construcción de las obras.

El último aspecto mencionado, relacionado con la autorización, se refiere a que el Municipio respectivo al lugar de emplazamiento le solicita al titular del proyecto el Certificado de Altura otorgado por la DGAC como requerimiento para otorgar el permiso de construcción. Para obtener este certificado se debe llenar una solicitud (véase anexo 6.5) y entregarla en el Departamento Aeródromos y Servicios Aeronáuticos, donde el área técnica especializada llamada Sección de Fiscalización de Aeródromos y Proyectos Aeronáuticos de la DGAC, una vez recibida la solicitud y el pago²⁵ de ella procede a realizar el estudio aeronáutico del proyecto con todos los antecedentes adjuntados por el titular (coordenadas más un archivo de mapa para visualizar el parque eólico), para determinar que las turbinas eólicas no afecten las SLO ni las zonas de protección de las radio ayudas. Al no estar normados los procedimientos instrumentales la DGAC no tiene autoridad para obligar al titular del proyecto a un cambio, solo se pronuncia en lo que es pertinente para ellos.

El cuerpo legal que regula el sistema aeronáutico en Chile corresponde al Código Aeronáutico, Ley 18.916. En él se establece (artículo 26) que la autoridad aeronáutica, en este caso la DGAC, ordenará el señalamiento y balizaje de todos los objetos que constituyan un obstáculo y peligro para la navegación aérea, además, de todo objeto que

²⁵ Este Certificado tiene un valor de \$119.265. Aunque éste puede aumentar si se requiere que un profesional haga una visita en terreno.

se ubique fuera de las áreas determinadas por las SLO y mide más de 150 m o 492 ft sobre el terreno alrededor del aeródromo. La turbina eólica mide en promedio 500 ft, por lo tanto, debe cumplir con el señalamiento.

Las recomendaciones de señalamiento están descritas en el DAN²⁶ 14 154 y sobre las turbinas eólicas estipula qué las aspas, la góndola y los 2/3 superiores de la torre de la turbina deben ser de color blanco, y el tercio restante de la torre será anaranjado o rojo, aunque si se requiere mejorar la visualización la parte superior de las aspas deben tener franjas de color rojo o anaranjado y la torre a 6 m bajo la góndola. Para la iluminación necesaria de las turbinas, que les permiten ser visibles a las aeronaves que aproximan desde cualquier dirección, se han de utilizar luces de obstáculos de mediana intensidad con una configuración diferente dependiendo la altura total de la turbina (altura vertical del aspa más la altura de la góndola):

- Turbinas de menos de 150 m: la luz deberá proporcionarse en la góndola y una segunda luz que sirva de alternativa en caso de falla.
- Turbinas con altura entre 150 m y 315 m: la luz de mediana intensidad deberá ubicarse en la góndola y una segunda luz que sirva de alternativa en caso de falla de la luz que funciona. Además, a mitad de la altura de la torre deberá tener a lo menos 3 luces de baja intensidad de Tipo E, pudiendo determinarse que se utilicen luces de Tipo A o B.

De todas maneras, se debe tener en cuenta que las características de iluminación antes mencionadas varían en función de la altura del aerogenerador y de su localización respecto de las Servidumbres Aeronáuticas, pudiendo utilizarse sistemas de iluminación duales (blancas para el día y rojas para la noche), véase la siguiente tabla informativa:

²⁶ Las DAN son normas aeronáuticas emitidas por la DGAC, de acuerdo con las atribuciones que le otorga la ley, para regular materias de orden técnico u operacional, tendientes a resguardar la seguridad aérea.

Tabla 1: Tipos de iluminación.

Altura de la turbina (h)	Turbina dentro de zona afectada por Serv. Aeronáuticas	Turbina fuera de zona afectada por Serv. Aeronáuticas
$h \leq 45$ m	Luz de baja intensidad Tipo B en la góndola.	• Para $h \leq 80$ m, se recomiendas luces de baja intensidad Tipo B las 24 hrs del día. • Para $80 \leq h \leq 100$ se recomiendan luces Dual
$45 < h \leq 100$ m	Luz Dual Media A/Media B	
$100 < h \leq 150$ m	Luz Dual Media A/Media B	
$h > 150$ m	Luz Dual Media A/B más mínimo 3 luces de baja intensidad tipo B ubicadas a la mitad de la torre funcionando las 24 hrs del día	

Fuente: DAN 14 154.

Las turbinas señalizadas y balizadas pueden llegar a verse de la siguiente manera:

Figura 3-10: Señalamiento e iluminación de las turbinas.



Fuente: Buscador de imágenes de Google.

Un parque eólico se considera un objeto extenso y se han de instalar luces en cada turbina como se indica anteriormente más luces de baja o mediana intensidad, que posiblemente emitan destellos, para definir la forma y extensión general de éste, respetando la distancia requerida de separación según el tipo de luz y la simultaneidad de los destellos.

3.2.2 Normativa de Federal Aviation Authority

Análogamente a Chile, Estados Unidos (EEUU) tiene una entidad aeronáutica gubernamental llamada Federal Aviation Authority (FAA) responsable de la regulación y supervisión de todos los aspectos de la aviación civil dentro de su país. El Título 14 del Código de Regulaciones Federales de Estados Unidos es el que representa el área de la “Aeronáutica y del Espacio” y contiene las reglas prescritas por esta institución.

Para evaluar el efecto de nuevas construcciones o alteraciones a estructuras ya instaladas sobre el espacio aéreo navegable, se detalla en la parte 77 titulada “*Uso seguro, eficiente y preservación del espacio aéreo navegable*” del Título 14 que el titular de un proyecto tiene la obligación de notificar, previo a la etapa de construcción, a la FAA mediante el Formulario FAA 7460-1 “Notice of Proposed Construction or Alteration” (anexo 6.6) si su proyecto tiene las siguientes características:

- Cualquier estructura nueva o preexistente que supere los 200 ft o 61 m sobre el nivel del suelo (AGL) en el sitio donde se erija.
- Cualquier objeto que exceda una superficie imaginaria que se extienda hacia afuera y hacia arriba:
 - en una pendiente 100 a 1 para una distancia horizontal de 6.096 m desde el punto más cercano de la pista más cercana de un aeródromo de uso público o militar con su pista de más de 3.200 ft.
 - en una pendiente 50 a 1 para una distancia horizontal de 3.048 m desde el punto más cercano de la pista más cercana de un aeródromo público o militar con su pista de no más de 3.200 ft.
- Si la estructura propuesta estará cerca de una instalación de navegación y puede afectar la garantía de recepción de señal.
- Cuando el objeto esté en un área de aproximación incluyendo en ruta y despegue, y provoque que entre el objeto y la altitud mínima el franqueamiento de obstáculos sea menor a la requerida.

Por el contrario, en el caso de que el objeto está protegido por otro existente de carácter permanente o por terreno natural, o se tratase de una instalación para la navegación aérea que cumple los requisitos de ubicación interpuestos por la FAA, no es necesario presentar un aviso.

A través de la notificación, la FAA comienza el estudio de la estructura para determinar el impacto sobre los procedimientos que operan bajo reglas de vuelo visual y por instrumentos, los radares ATC, sistemas de comunicación o aeropuertos públicos existentes, y si ésta se transforma en un obstáculo para la navegación aérea. Esta institución califica un objeto como un **obstáculo** para la navegación aérea si

- Mide más de 499 ft o 153 m AGL en el sitio donde se erija;
- Provoca un aumento de la altitud mínima de franqueamiento de obstáculos, afecta el margen de franqueamiento de obstáculos o sobrepasa una superficie imaginaria establecida para el aeródromo;
- Mide más de 200 ft AGL o por sobre la elevación del aeródromo en un radio de 3 NM desde el punto de referencia.

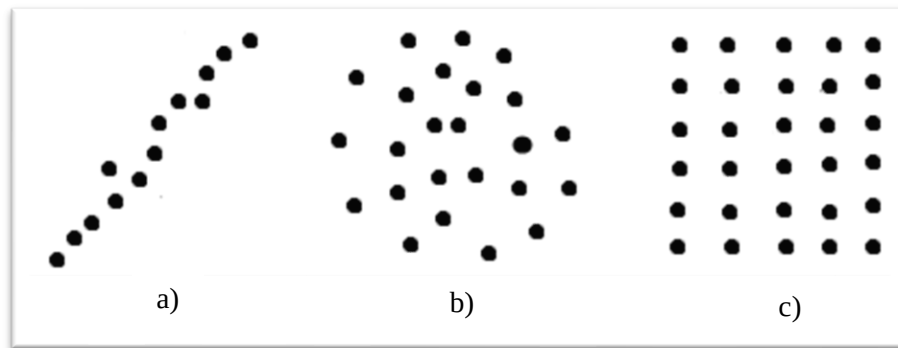
De esta forma, se asegura que, en todo estudio aeronáutico el espacio aéreo sobre 500 ft AGL sea abordado y esté protegido frente a obstrucciones.

De acuerdo con lo mencionado, las turbinas son objetos que requieren notificación y el respectivo estudio aeronáutico, y que pueden ser calificados como obstáculos para la navegación si se ubican en las cercanías de un aeródromo. Y al igual que en Chile, a pesar de que cada parque eólico es único y el desarrollo es dinámico, en la Advisory Circular (AC) No. 70/7460 – 1L de 2015, la FAA establece las recomendaciones de señalización y balizaje para las turbinas eólicas, permitiendo la visibilidad de ellas desde cualquier dirección a los pilotos durante el día y la noche.

La primera aclaración dispuesta por la FAA en mencionada AC corresponde a que existen 3 principales clasificaciones de configuración para los parques eólicos y cada una tiene un estándar de iluminación. La primera es *lineal*, la cual corresponde a la ubicación de los aerogeneradores consecutivamente en línea recta, aunque periódicamente esta línea puede

romperse. La turbina de cada extremo debe estar iluminada y la distancia entre turbinas con iluminación no puede ser mayor a 805 m, a menos que en el segmento final las luces queden muy cerca y no sea tenga una cadena de iluminación equilibrada. Una segunda es *clúster*, correspondiente a una configuración dispuesta en un perímetro circular, sin que las turbinas sigan un patrón determinado. Las turbinas a lo largo del perímetro deben estar iluminadas con una separación máxima de 805 m y solo algunas de c) para no tener brechas sin iluminación. Por último, *red*, donde las turbinas están organizadas como un cuadrado a una distancia constante entre ellas. Aquí, las turbinas de las esquinas deben estar iluminadas para demarcar el perímetro (con separación máx. de 805 m) y algunas del interior. En las 3 clasificaciones de parques eólicos no es necesario que todas las turbinas estén iluminadas, aunque si hay turbinas que sobrepasen en o más de 100 ft a otras deben quedar iluminadas, independiente de la distancia con otra turbina iluminada. Véase de manera gráfica la distribución de las turbinas respectiva a cada clasificación de configuración en un parque eólico:

Figura 3-11: Clasificaciones de agrupación de turbinas en un parque eólico: a) lineal, b) clúster y c) red.



Fuente: Elaboración propia.

Una segunda aclaración realizada establece que las turbinas deben ser de color blanco (RAL²⁷ 9010) o gris claro (RAL 7035) completas, siendo estos colores los que han demostrado entregar una mayor visibilidad durante el día, por lo que no es requerida la iluminación. Como en EEUU cae nieve, para entregar un mayor contraste a las turbinas frente a ella, éstas pueden tener la torre pintada alternando franjas de color naranja de

²⁷ Corresponde a un sistema de combinación de colores europeo conocido como el Estándar de color RAL.

aviación con blanco, siempre manteniendo la góndola, las aspas y la punta de las aspas de uno de los 2 colores mencionados al inicio de este párrafo. La iluminación nocturna consta, independiente de si la torre tiene franjas naranjas o es blanca completa, de luces rojas intermitentes de mediana intensidad L-864 y puede requerir luces rojas constante L-810, pero estas últimas dependen de la altura AGL que tengan, véase la siguiente tabla:

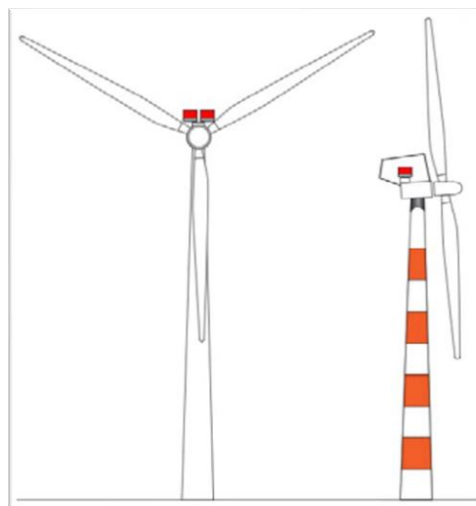
Tabla 2: Requerimientos de iluminación según FAA.

Altura de la turbina (h)	Requerimientos de iluminación
$h \leq 499 \text{ ft}$	1 luz L-864 funcional ubicada en la góndola. La configuración de iluminación depende de la clasificación del parque eólico.
$499 \text{ ft} < h < 699 \text{ ft}$	2 luces L-864 funcionales con intermitencia simultánea ubicadas en la góndola. Todas las turbinas deben estar iluminadas independiente su posición en el parque.
$699 \text{ ft (213 m)} \leq h$	2 luces L-864 funcionales con intermitencia simultánea en la góndola más mínimo 3 luces L-810 ubicadas a la mitad de la torre que destellen en sincronía con las otras 2. Todas las turbinas deben estar iluminadas independiente su posición en el parque.

Fuente: Advisory Circular No. 70/7460 – 1L.

Las turbinas han de verse como se muestra en la siguiente imagen con las recomendaciones mencionadas:

Figura 3-12: Turbinas señalizadas según recomendaciones.



Fuente: Advisory Circular No. 70/7460 – 1L.

Los aerogeneradores tienen diversas alturas y puede tomar varios días completar su construcción, lo que no excluye que durante este tiempo la turbina no sea iluminada para conocimiento de los pilotos. Al sobrepasar los 200 ft y cada vez que la altura de la turbina se incrementa el titular ha de instalar temporalmente una luz L-810 lo más alto posible, si aún no ha sido instalada la luz intermitente definitiva.

En Estados Unidos, el desarrollo de proyectos eólicos avanza a una velocidad más rápida que en Chile, por lo que la interacción entre el sistema aeronáutico y ellos ha sido estudiada más en detalle y profundidad por la FAA. Los tópicos anteriormente tratados, normativa aeronáutica y recomendaciones de señalamiento propuestas por la FAA para las turbinas, está dirigido más para garantizar que estos proyectos energéticos sean compatibles con la seguridad de la aviación y evaluar los potenciales impactos físicos que generan, pero se debe considerar que también pueden afectar los sistemas de radar de vigilancia civiles incluso los radares meteorológicos, lo que, de igual manera, requiere una evaluación previa. En EEUU hay instituciones encargadas de velar por el correcto funcionamiento de los radares y en determinadas ocasiones, propone propuestas de mitigación para ciertos proyectos que ocasionan un mayor impacto.

Como parte del estudio iniciado por la FAA luego del aviso hecho por el desarrollador, la institución notifica a otras instituciones federales –como la *Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA)*, el *Departamento de Seguridad Nacional (DHS)* y el *Departamento de Defensa (DoD)*– que tengan activos de radar cerca del proyecto propuesto para que puedan iniciar una evaluación sobre los impactos que sus equipos puedan presentar. La NOAA, por parte de Centro de Operaciones de Radar (ROC), cuenta con su propio proceso de revisión temprana para estudiar el impacto generado por los proyectos eólicos notificados sobre los radares meteorológicos ubicados dentro del territorio, lo cual se puede observar en una herramienta del DoD que se describe enseguida (Wind Energy Technologies Office, 2020).

El DoD ha desarrollado un centro llamado “*Military Aviation and Installation Assurance Siting Clearinghouse*” que realiza estudios para evaluar los impactos de turbinas eólicas en radares militares y en misiones militares, sin embargo, la actividad militar no es parte

de este trabajo de título, por lo que no se entregan más detalles. Asimismo, ha desarrollado la herramientas en línea²⁸ **DoD Preliminary Screening Tool** (véase anexo 6.7), la cual entrega una visión preliminar de los impactos generados por el proyecto eólico sobre los radares de vigilancia de largo alcance estando a cargo de DHS, radares meteorológicos (NEXRAD) siendo recurso de NOAA y operaciones militares, recurso de DoD.

Igualmente, la FAA maneja en su sitio web²⁹ un canal con preguntas frecuentes sobre los proyectos eólicos, los documentos a entregar y las notificaciones pertinentes que debe hacer el titular del proyecto eólico, además, incluye la herramienta mencionada anteriormente y otras 2 (véase anexo 6.7) que muestran a lo que se enfrenta el proyecto eólico y los impactos que pueda tener, éstas son:

1. **Wind Turbine Build Out**, que ayuda al titular del proyecto a identificar áreas donde el impacto puede convertirse en un factor en el proceso del estudio aeronáutico. Muestra proyectos establecidos, que están en proceso de evaluación y casos de peligro.
2. **Notice Criteria Tool**, indica los pies que tiene la estructura por sobre los criterios para realizar la notificación, incluyendo si se necesitase un estudio aeronáutico para determinar si es un obstáculo.

3.2.3 Normativa de European Union Aviation Safety Agency

La Unión Europea (UE) es una comunidad económica y política nacida para propiciar y acoger la integración y gobernanza de los estados y pueblos europeos. Tiene agencias encargadas de temas específicos y entre ellas se encuentra la European Union Aviation Safety Agency (EASA), la cual fue creada bajo Reglamento (CE) no. 1592/2002 del Parlamento Europeo y del Consejo, de 2002, siendo su función principal la de unificar los estándares comunes de aeronavegabilidad en los Estados Miembros (EM) de la UE (son

²⁸ Extraídas de: Obstruction Evaluation / Airport Airspace Analysis (OE/AAA)
<https://oeaaa.faa.gov/oeaaa/external/portal.jsp>

²⁹ Wind Turbine FAQs (latest revision 04/02/2018) disponible en:
<https://oeaaa.faa.gov/oeaaa/external/searchAction.jsp?action=showWindTurbineFAQs>

27), así como velar por la protección medioambiental en la aviación civil. En la actualidad, esta primera regulación ha sido derogada por el Reglamento (CE) no. 216/2008, el cual fue también derogado en 2018 por el Reglamento (UE) 2018/1139 del Parlamento Europeo y del Consejo, siendo el último aprobado.

El Reglamento 2018/1139 es mandatorio para y aplicable a todos los EM, y estipula que el espacio alrededor de los aeródromos debe estar protegido de cualquier obstáculo para mantener la seguridad de las operaciones y que éstas no se vean afectadas innecesariamente, por lo que, los EM deben cumplir con controles estrictos a las SLO para detectar estos objetos. Al ser éstas superficies invadidas se lleva a cabo una evaluación para determinar el riesgo que provoca el objeto y si debe ser eliminado, o si se han de adoptar medidas de mitigación para proteger a las aeronaves. Si permanece el obstáculo se hace público y será señalizado.

Asimismo, explicita que para realizar operaciones aéreas dentro del territorio (artículo 29 al 32) el operador debe ser portador de un certificado AOC que lo autoriza, siempre y cuando haya cumplido determinados requisitos esenciales especificados en el Anexo V. Uno de ellos, inciso 3 (d), manifiesta lo siguiente:

“los vuelos se realizarán de forma tal que se mantenga siempre la debida separación con respecto a otras aeronaves y que se asegure un adecuado espacio libre de obstáculos durante todas las fases del vuelo. Esta separación debe ser como mínimo la especificada en las reglas del aire aplicables, según convenga al tipo de operación”

Aquí aparece el Reglamento (UE) 965/2012 de la Comisión por el que se establecen requisitos técnicos y procedimientos administrativos en relación con las operaciones aéreas en virtud del Reglamento 216/2008. Y, al igual que el anterior, es mandatorio y aplica a todos los EM. Sin embargo, en él aparecen “Materiales de orientación” los que interpretan y explican cómo lograr los requisitos interpuesto en el Reglamento, y ellos recomiendan aspectos para desarrollar operaciones seguras y asegurar espacio libre de obstáculos. Pero sobre los Procedimientos Instrumentales no establece regulaciones mandatorias.

Otro reglamento que merece atención respecto de la aviación europea corresponde al Reglamento UE no. 139/2014 de la Comisión del 2014, oficialmente conocido como IR-ADR (Normas de ejecución - Aeródromos) y comúnmente como EASA ADR, por el cual se establecen los requisitos y procedimientos administrativos relacionados con los aeródromos en el territorio de los EM, de conformidad con el reglamento 216/2008 (2018/1139). Está dividido en 4 anexos, donde:

- Anexo I establece las definiciones de los términos a utilizar en los demás anexos;
- Anexo II corresponde a la parte de requisitos de la autoridad – Aeródromos (ADR.AR) y en él se estipulan los requerimientos de la autoridad aeronáutica competente de cada estado miembro que tratan sobre los aeródromos;
- Anexo III es la parte sobre los requerimientos de la organización – Operadores de aeródromos (ADR.OR), es decir, informa los requerimientos a seguir por un operador de aeródromo y el proveedor de servicios de plataforma; y
- Anexo IV sobre requisitos de operaciones – Aeródromos (ADR.OPS) estipula los requerimientos a seguir respecto de las operaciones que tengan lugar en el aeródromo.

Mencionado reglamento tiene en cuenta las normas, métodos y recomendaciones realizadas por la OACI para los aeródromos, específicamente provenientes del Anexo 14, que los implementa en la ley aeronáutica de cada EM, con la finalidad de garantizar un nivel alto de seguridad de la aviación civil dentro de la UE. En su artículo 3 está establecido que cada estado miembro designa una autoridad nacional de aviación civil encargada de los aeródromos, como también de personal y organizaciones, y temas asociados a la gestión de obstáculos en los alrededores del aeródromo o fuera de ellos para mantener una aviación segura dentro de su territorio. Por ejemplo, en España la autoridad aeronáutica es la Agencia Estatal de Seguridad Aérea (AESA) o en Alemania es Luftfahrt-Bundesamt.

Por otro lado, los EM de la Agencia van a velar por que dentro de su territorio los desarrolladores de cualquier tipo de proyecto que deseen construirlo dentro o fuera de los límites de las SLO, así como en otras superficies asociadas al aeródromo, lleven a cabo

consultas con la autoridad aeronáutica nacional respecto a los potenciales impactos en la seguridad aeronáutica que ello pueda significar, incluyendo la posible interferencia al funcionamiento de los sistemas de vigilancia, navegación y comunicación aérea (artículo 8 “*Safeguarding of aerodrome surroundings*” del reglamento 139/2014). Como consecuencia, cada autoridad nacional tiene un proceso establecido para evaluar la convivencia entre el proyecto y el sistema aeronáutico, inicia la evaluación y decide la aprobación del proyecto en cuestión.

Para garantizar la aplicación uniforme de los requisitos comunes establecidos en el Reglamento básico (2018/1139) la Agencia ha desarrollado y adoptado la normativa técnica y material llamada Especificaciones de Certificación (CS), las cuales “proponen medios para demostrar el cumplimiento del Reglamento y sus disposiciones de aplicación, y que pueden ser usadas por las organizaciones a efectos de certificación”.

Una de las CS adoptadas corresponde a la CS ADR-DSN.H.405, la cual trata sobre las SLO. El tratamiento que se les da es el mismo que ocurre en la normativa chilena, a excepción de que la EASA define una superficie extra la Horizontal Externa³⁰, en la cual las estructuras que se extiendan a más de 30 m sobre el nivel del suelo local y más de 150 m sobre la elevación del aeródromo en un radio de 15 km del centro del aeródromo es considerado un objeto con posible significancia negativa que debe ser estudiado.

Otra CS importante de referirse corresponde a la ADR-DSN.Q.851, la cual trata sobre la señalización e iluminación de turbinas eólicas, basándose ésta en lo que aparece en el Anexo 14 sobre las recomendaciones específicas para los aerogeneradores, el mismo caso de Chile. Sin embargo, Chile en sus recomendaciones (DAN 14 154) hace la distinción entre si la turbina está dentro o fuera de servidumbres aeronáuticas y EASA no.

Se considera parque eólico al grupo de más de 2 turbinas y cuando se trate de uno, éste debe tener instaladas luces para indicar su extensión, debe respetar la separación máxima entre turbinas iluminadas (CS ADR-DSN.Q.846) que puede ser 45 m, luces de baja intensidad, o 900 m, cuando se trate de luces de mediana intensidad. Y, cuando una turbina

³⁰ Esta superficie es un plano horizontal alrededor del aeródromo más allá de los límites de la Superficie Cónica.

sea significativamente más alta que las otras (no especifica cuanta diferencia de altura AGL), donde quiera que este ubicada, ésta debe ser iluminada según los criterios.

Las recomendaciones de pintura estipulan que las aspas, la góndola y los 2/3 superiores de la torre deben ser de color blanco, a menos que los resultados de un estudio indiquen que otro color aumenta la visibilidad de ella. Respecto de la iluminación individual, ésta depende de la altura AGL total (altura góndola más la altura vertical del aspa) que tenga la turbina, los detalles se ven en la siguiente tabla:

Tabla 3: Requerimientos de iluminación EASA.

Altura de la turbina (h)	Requerimientos de iluminación
$h < 150 \text{ m}$	1 luz de mediana intensidad ubicada en la góndola.
$150 \leq h \leq 315 \text{ m}$	2 luces de mediana intensidad ubicadas en la góndola, pero una funcional y la otra queda de apoyo en caso de falla. Además, mínimo 3 luces destellantes de baja intensidad ubicadas en la mitad de la torre, pudiendo ser cambiadas por luces de baja intensidad tipo A o B.

Fuente: EASA.

Al tratarse de turbinas con una altura mayor a 315 m, se estudia el caso a caso, ninguno es igual a otro, pudiendo determinarse que se requieren sistemas de iluminación y marcas de pintura adicionales.

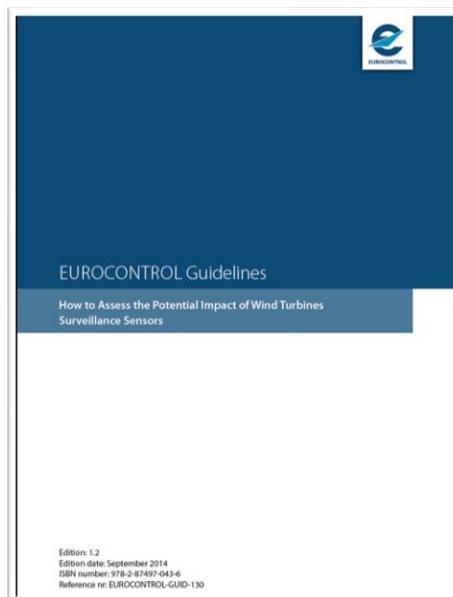
Debido a que las regulaciones sobre marcado e iluminado de turbinas provenientes del Anexo 14 son solo recomendaciones, nada normativo, los estados miembros no están en la obligación de implementarlas en su regulación aeronáutica nacional, pudiendo cada estado determinar las regulaciones de marcado que estimen más convenientes para mantener la seguridad de la aviación en su territorio. Como resultado, pueden surgir diferencias significativas sobre ello entre los mismos estados europeos o, por ejemplo, con Chile o Estados Unidos.

Por ejemplo, la Ley de Energías Renovables de Alemania (EGG) promulga la séptima enmienda al EGG, la cual introduce la obligación de instalar luces de identificación nocturna controladas por necesidad en las turbinas a partir de julio de 2020, lo que quiere decir, que las luces de las turbinas ya no van a ser intermitentes permanente, sino, que van

a comenzar a destellar cuando una aeronave se acerque (Henrich, 2019). Otros países, Bélgica y Dinamarca, establecen que para la visibilidad de las turbinas durante el día basta con la pintura, no se requieren luces como es el caso de Francia. Se puede incluir en estas diferencias que hay países, como Alemania y Bélgica, que son más estrictos en cuanto a la pintura de la turbina y exigen que ellas tengan franjas naranjas o rojas en las aspas, góndola y torre.

Al igual que en Estados Unidos, en los países de Europa el desarrollo de proyectos eólicos avanza rápido, lo que ha llevado a una institución en particular a desarrollar directrices sobre la evaluación del impacto potencial de turbinas eólicas en el sistema aeronáutico. Este es el caso de EUROCONTROL, organización dedicada a apoyar la aviación europea, donde sus estados miembros y partes interesadas, en un esfuerzo por hacerla más segura, eficiente, rentable y ambientalmente sostenible, ha desarrollado el documento “*How to assess the potential impact of Wind turbines on Surveillance sensors*” versión 2014 (véase la Figura 3-13), el cual proporciona pautas para los proveedores de servicios de navegación aérea (ANSP) y los desarrolladores de proyectos eólicos, para conocer si la ubicación propuesta de sus estructuras llega a causar o no problemas en los radares de vigilancia instalados en territorio europeo e identifica algunas propuestas de mitigación.

Figura 3-13: Documento “*How to assess the potential impact of Wind turbines on Surveillance sensors*”.



Fuente: EUROCONTROL.

Este es el documento más actual y su aplicación no es obligatoria, pero por ello está establecido que se lleven a cabo consultas con la autoridad aeronáutica para que ésta someta el proyecto a evaluación y determine el impacto. Con él no se busca ir en desmedro del desarrollo de la energía eólica, sino, hacer posible la convivencia entre los aerogeneradores y los sistemas de vigilancia aérea para que estos últimos mantengan el nivel necesario de seguridad, recepción de señal y eficiencia que requieren y que demanda el tráfico aéreo.

En los párrafos sobre cómo realizar la evaluación de impacto en los radares, establece que primeramente se debe conocer si la turbina o alguna parte de ella se encuentra dentro de la línea de vista del radar y para facilitar este proceso es que EUROCONTROL ha definido diferentes zonas correspondientes a diferentes niveles de evaluación de equipos PSR y SSR, ellas se resumen a continuación:

Tabla 4: Rangos de evaluación PSR. **Fuente:** Documento EUROCONTROL.

Zona	Zona 1	Zona 2	Zona 3	Zona 4
Descripción	0 – 500 m	500 m – 15 km y la LoS del radar	Más de 15 km, pero dentro del rango máximo instrumental y en la LoS	En cualquier lugar dentro del rango máximo instrumental, pero no en la LoS o fuera de su rango máximo
Requerimientos de evaluación	Salvaguardar / Protección	Evaluación detallada	Evaluación simple	Sin evaluación

Estas cifras son válidas para las turbinas diseñadas con 3 aspas, entre 20 – 200 m de altura total y eje horizontal, es decir, las más comunes en la actualidad. La zona 1 se desprende de las recomendaciones del Documento ICAO EUR 015, el cual aplica para cualquier obstáculo, y en ella no puede ser construido ningún objeto para que no se vea mermada la calidad del funcionamiento de las ayudas a la navegación, incluido radares. La zona 2 no prohíbe instalación de turbinas, pero si deben ser tomadas consideraciones más profundas

en comparación con la zona 3, y en ambas pueden instalarse turbinas siempre que el impacto sea tolerable y no afecte la vigilancia de las aeronaves en el espacio aéreo.

En el caso de los SSR, también establece zonas de evaluación para turbinas de 3 aspas, pero no existe la zona 3 para ellos. Véase a continuación:

Tabla 5: Rangos de evaluación SSR. **Fuente:** Documento EUROCONTROL.

Zona	Zona 1	Zona 2	Zona 4
Descripción	0 – 500 m	500 m – 16 km dentro del rango máximo del radar y la LoS	Más allá de 16 km o fuera de la LoS del radar
Requerimientos de evaluación	Salvaguardar / Protección	Evaluación detallada	Sin evaluación

En el caso de la evaluación simple para PSR están comprendidos los siguientes análisis:

- La probabilidad de detección debido a la región sombreada ocasionada por la turbina.
- Reportes falsos producidos por los ecos de las turbinas.
- Sobrecarga del procesador del radar.

Y, en el caso de una evaluación detallada (zona 2) para ambos tipos de radares se incluyen:

- Atenuación en la región sombreada y el impacto en el rendimiento y funcionamiento del radar.
- Reportes falsos producidos por los ecos de las turbinas y por reflexiones indirectas en las turbinas.
- Problemas de rango y rumbo debido a diferencias entre la señal directa y la reflejada.

Como cierre a este capítulo, a continuación, se comparan los aspectos más significativos que cada autoridad aeronáutica de los 3 países analizados ha establecido desde el punto de vista de la aviación frente a los aerogeneradores, véase la siguiente tabla:

Tabla 6: Aspectos a comparar entre las normativas. **Fuente:** Elaboración propia.

Aspecto	DGAC - Chile	FAA – Estados Unidos	EASA – Unión Europea
Conocimiento de la autoridad aeronáutica	SÍ. Él SEA le comunica sobre el proyecto eólico.	SÍ. Obligación notificarla si mide más de 200 ft AGL.	SÍ. El titular debe consultarle para que se evalúen los impactos del proyecto.
Estudio de las turbinas	SÍ	SÍ. Incluye estudio de impacto sobre los radares.	SÍ. Cada Estado miembro tiene su proceso de evaluación.
Tratamiento para las turbinas	SÍ. Plantea lo mismo que el Anexo 14.	SÍ. Establece lo recomendado en el Anexo 14, pero adaptado.	SÍ. Establece lo del Anexo 14.
Certificado de altura	SÍ	SÍ	SÍ. Aunque cada Estado miembro tiene el propio.
Estudio de radares	NO	SÍ	SÍ
Herramientas para visión preliminar de impactos	NO	SÍ	NO

En la tabla anterior, se puede observar que, si bien las 3 normativas analizadas cuentan con un proceso interno para realizar un estudio aeronáutico de los aerogeneradores y determinar su impacto en la aviación civil, y dedican recomendaciones de señalamiento para ellas, Chile está en desventaja frente a Estado Unidos y Europa porque no posee estudios de impacto o instituciones que se dediquen a evaluar el proyecto para determinar los impactos que las turbinas generan sobre los sistemas de radares de vigilancia aeronáutica.

3.3 ESTADO ACTUAL DE AERÓDROMOS

En Chile existen 344 aeródromos públicos y 7 aeropuertos distribuidos en diferentes lugares a lo largo del país incluyendo la zona insular habilitados para tener operaciones aéreas, independiente si son pocas o muchas. La red aeroportuaria nacional se divide en primaria y secundaria, donde la diferencia radica en que los pertenecientes a la primaria son los más importantes del país y los complementan los aeródromos de la red secundaria. La Red Primaria está compuesta por 16 aeródromos/aeropuertos los que permiten la conectividad nacional y 7 aeropuertos, que además de tener operaciones en el territorio, tienen conectividad internacional.

De los aeródromos que componen la Red Primaria, hay 2 que merecen un estudio respecto de las turbinas de un parque eólico, uno corresponde al aeropuerto El Loa de Calama que actualmente, en sus alrededores, se ubica el parque Valle de los Vientos y el segundo es el aeródromo Pichoy en la ciudad de Valdivia, el cual en sus cercanías se va a emplazar el parque eólico Pichilingue con un inicio de obras el 2019 y término el 2021. Por ello, este último parque no aparece declarado en los procedimientos de vuelo del aeródromo, a diferencia de El Loa.

Para el desarrollo de este capítulo, ambos aeródromos son detallados y analizados en cuanto al impacto negativo, si es que sufren, tanto las Superficies Limitadoras de Obstáculos, como los procedimientos instrumentales RNAV declarados de acuerdo con la ubicación de las turbinas.

3.3.1 Aeropuerto de Calama

El aeropuerto El Loa de la ciudad de Calama región de Antofagasta (ARP³¹: 22°30'00''S, 68°54'11''W), con código OACI: SCCF e IATA: CJC, es un aeropuerto de categoría 4D de uso público concesionado y bajo la administración de la DGAC que tiene una altitud de 7.631 ft o 2.326 m sobre el nivel del mar. Cuenta con una pista de dimensiones 3.040 m de largo y 45 m de ancho teniendo ésta una orientación 10/28, donde en la pista 10 los aterrizajes/despagues tienen dirección al este y en la pista 28 los procedimientos son en

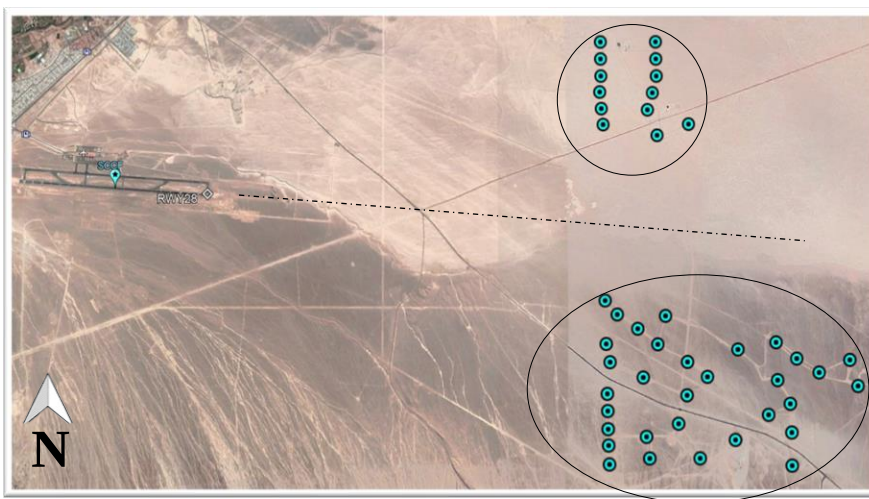
³¹ ARP = Airport Reference Point o Punto de referencia del aeródromo.

dirección al oeste. La pista no es perfectamente perpendicular al norte, sino que está desviada $4,2^\circ$, y posee una franja de pista es 3.160m x 300 m.

Cuenta con 17 procedimientos instrumentales, entre STAR, SID e IAC, donde 7 de ellos corresponden a aproximaciones instrumentales (IAC). Por motivo del parque eólico que está en sus alrededores, 2 procedimientos IAC se ven afectados y merecen el respectivo análisis.

Mencionado parque tiene el nombre de Valle de los vientos con un total de 45 turbinas eólicas con una altura total de 130 m o 426,51 ft donde el rotor tiene un diámetro de 100 m, las cuales están declaradas en todas las cartas de aproximación que tiene desarrolladas el aeródromo. Los aerogeneradores comienzan a ubicarse a 4,27 NM o 7,9 km del ARP en el eje de aproximación a pista 28 y están divididas en 2 grupos, uno al norte (lo llamaremos “Grupo I”) de la extensión de la línea central de la pista 10 con 13 aerogeneradores y el grupo al sur (de aquí en adelante “Grupo II”) de la línea central con 32 turbinas tal como se observa en la siguiente figura:

Figura 3-14: Parque eólico Valle de los vientos.



Fuente: Elaboración propia.

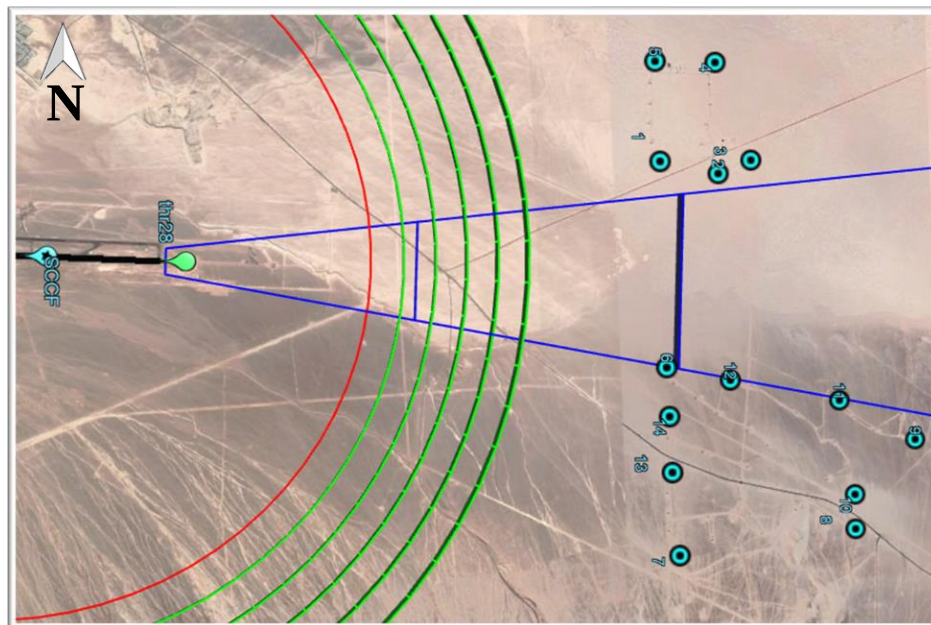
Como se menciona al inicio del capítulo, el análisis del aeródromo se inicia con respecto de las SLO y luego a los 2 procedimientos de vuelo instrumental afectados, que en este caso corresponden a procedimientos RNAV (GNSS).

3.3.1.1 Superficies Limitadoras de Obstáculos

Teniendo en cuenta las distancias que comprende cada superficie limitadora de obstáculos, en este caso horizontal interna, cónica y aproximación más la ubicación cercana del parque eólico se debe realizar un estudio detallado de si éstas se ven vulneradas por las turbinas eólicas. A continuación, se observa la relación entre las SLO y el parque eólico, pero antes se indica el significado de cada línea:

- La circunferencia roja corresponde a la superficie horizontal interna con un radio de 4.000 m desde el ARP.
- Las circunferencias verdes se relacionan con la cónica y cada una de ellas tiene la altura que corresponde de acuerdo con la distancia. Están ubicadas a 400 m (altura de 65 m), 800 m (85 m), 1.200 m (105 m), 1.600 m (125 m) y 2.000 m (límite exterior con altura de 145 m) desde la horizontal interna.
- Las líneas azules que divergen competen a la superficie de aproximación hasta los 15 km desde los 60 m justamente después del umbral 28. Se identifica la primera, segunda y la sección horizontal.
- Círculos celestes corresponden a los aerogeneradores.

Figura 3-15: Superficies Limitadoras de Obstáculos SCCF



Fuente: Elaboración propia.

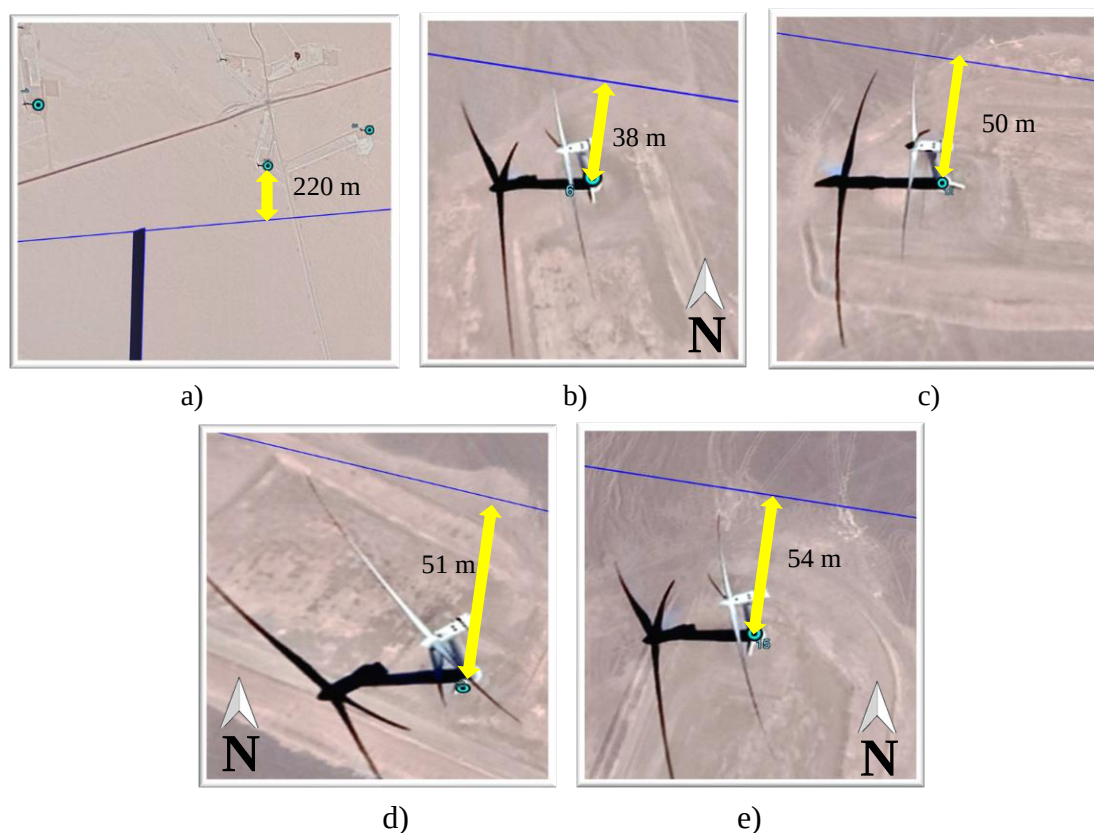
En la figura anterior las superficies horizontal interna y cónica claramente no presentan un problema físico causado por los aerogeneradores porque éstos están ubicados fuera de sus límites. No así con la superficie de aproximación, ya que hay 3 turbinas del Grupo I y 4 del Grupo II que se ubican en las cercanías de los límites de ella y requieren un estudio más detallado para determinar si la vulneran.

En el Grupo I (imagen *a*) de Figura 3-16) las turbinas no. 1, 2 y 3 están alejadas del borde que delimita la superficie de aproximación, estando la más cercana a 220 m del límite. Se concluye que por el lado norte esta superficie limitadora no es vulnerada.

Con respecto a las turbinas del Grupo II, estas 4 turbinas (imagen *b*), *c*), *d*) y *e*) de la Figura 3-16) se encuentran bastante cerca del límite de la superficie y se detalla, dependiendo el caso, como la vulneran y por cuanto distancia.

- La primera es la turbina no. 6 (imagen *b*) que se ubica a una distancia de 38 m del límite de la superficie (medido del centro de la torre) y sus aspas miden 50 m, por lo que, en una posición determinada del rotor las aspas penetran 12 m de ella. Esta vulneración no es constante, ya que el rotor de las turbinas está hecho para que gire en la dirección del viento predominante, provocando que las aspas queden fuera.
- La turbina no. 12 (imagen *c*), desde el centro de su torre, se encuentra a 50 m de distancia del límite de la superficie, por lo que, sus aspas pasan justo por el límite, sin vulnerarlo, independiente de la dirección en la que apunte el rotor.
- El aerogenerador no. 11 (imagen *d*) está ubicado a 51 m de límite de la superficie en cuestión, por lo tanto, éste no la vulnera independiente de la dirección de su rotor.
- Por último, la turbina 15 (imagen *e*) se encuentra a 54 m del límite, concluyendo lo mismo que con las 2 turbinas anteriores, la superficie no se ve vulnerada.

Figura 3-16: Turbinas en estudio – Sup. de aproximación: a) turbinas Grupo I. b) turbina no.6. c) turbina no. 12. d) turbina no. 11. e) turbina no. 15.



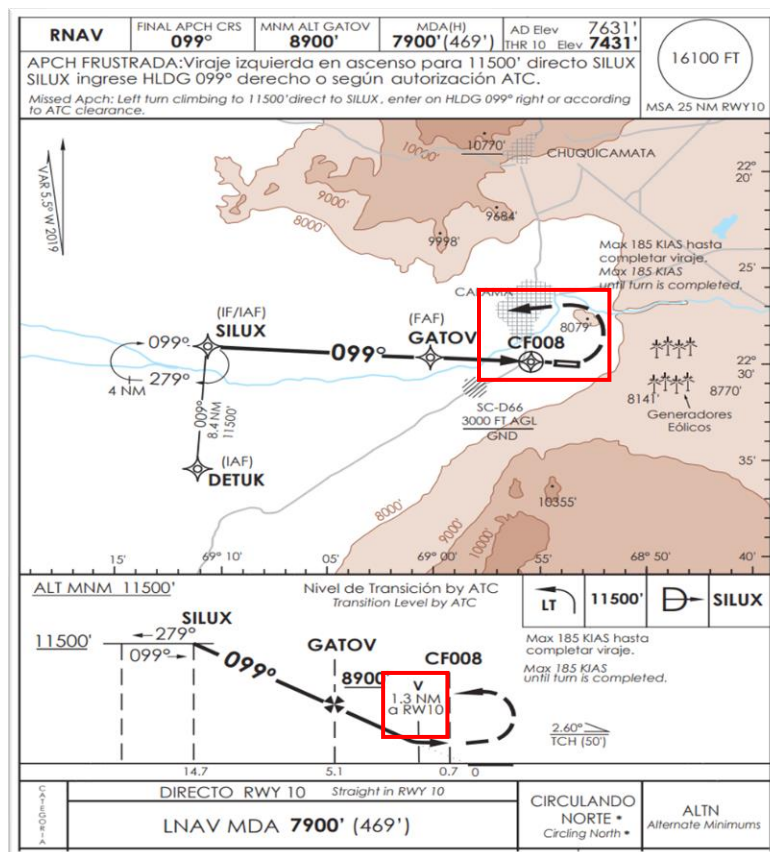
Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

En conclusión, la superficie de aproximación se ve únicamente vulnerada por la turbina número 6, lo que puede ser evitable al posicionar el rotor en una dirección donde sus aspas no interfieran con la superficie y mantenerlo así.

3.3.1.2 IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 10

Esta carta de aproximación contiene un procedimiento RNAV, basado en satélites, de no precisión para la pista 10, ya que no permite guía vertical para el aterrizaje, sino que solo guía lateral LNAV. En ella los aterrizajes tienen dirección al este, lo que quiere decir que, durante la aproximación, la aeronave no circula ni se enfrenta a las turbinas eólicas. El tramo intermedio y final de la aproximación está alineado con la línea central de la pista (RCT por su nombre en inglés) 10 y el FAF está declarado a 5,1 NM del umbral de pista exigiendo una altitud mínima de 8.900 ft. Véase a continuación la gráfica de esta IAC:

Figura 3-17: IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 10.



Fuente: AIP Vol. II (PROC).

El tramo final corresponde al formado por GATOV (FAF) y CF008, donde este último punto corresponde al Missed Approach Point (MAPt) y se encuentra a una altitud de 7.900 ft a 0,7 NM del umbral. El MAPt corresponde al punto por el cual la aeronave debe pasar para iniciar el procedimiento de aproximación frustrada si es que en el punto V, también con una altitud de 7.900 ft, no existe la referencia visual de la pista para continuar, desde aquí, con el aterrizaje de manera visual.

“Al tratarse de un procedimiento de no precisión en el que la aproximación está alineada con el RCL, el MAP se ubicará en o antes del umbral de pista” (OACI, 2014). En la mayoría de los casos el MAP se ubica sobre el umbral, ya que es la posición óptima, pero se puede llegar a correr cuando sea necesario por alguna novedad que se presente en el

terreno o en el procedimiento en sí, siempre y cuando la OCA/H no sea inferior a la altitud/altura del MAP con un descenso de 3°.

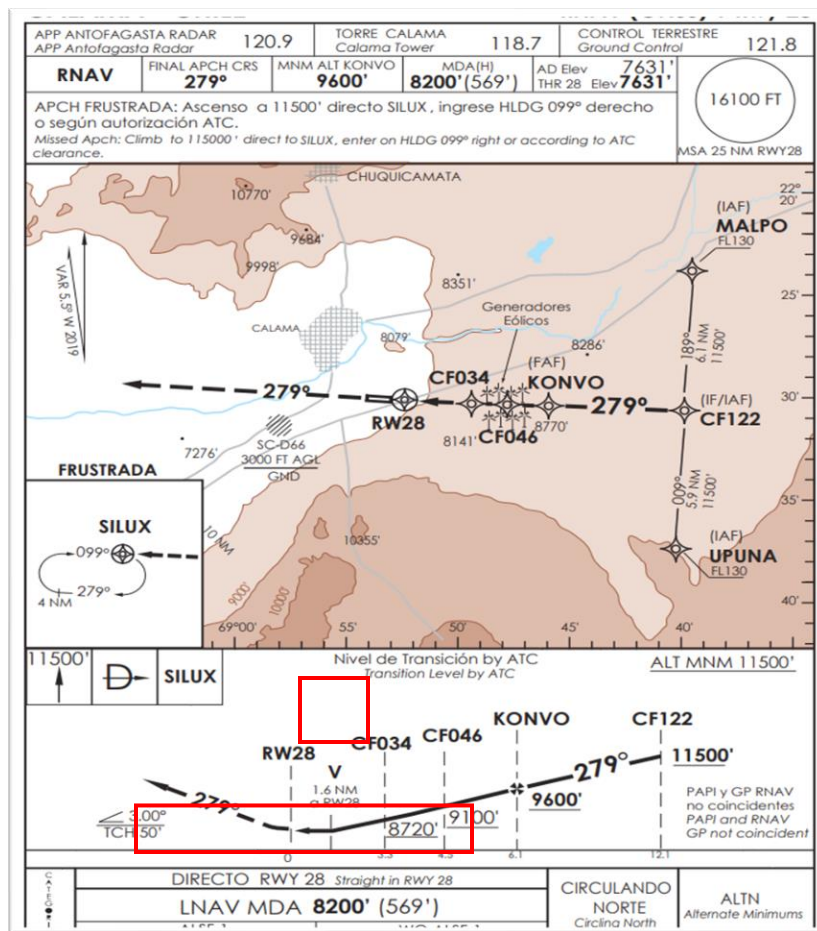
En el caso de este procedimiento y como se aprecia en la figura anterior, debido a la presencia de obstáculos prominentes (aerogeneradores) en las cercanías del aeródromo el MAP ha tenido que ser desplazado hacia el FAF, para así darle más espacio longitudinal a la aeronave y permitir que la frustrada comience por adelantado, por ende, el viraje también. De esta manera se evita que, en el tramo inicial e intermedio de la frustrada se tengan que tomar en cuenta las turbinas, además, la aeronave no debe volar sobre ellas. Para llevar a cabo el viraje operacionalmente en esta IAC, éste debe ser en ascenso y tener en cuenta la restricción de velocidad máxima.

Cuando un procedimiento de aproximación está desarrollado con el MAP desfasado del umbral, es decir, se ha corrido hacia el FAF cierta distancia, operacionalmente no es bueno, ya que genera problemas de codificación, añade carga operacional al piloto, pone en desmedro del procedimiento.

3.3.1.3 IAC 5 RNAV (GNSS) Y Rwy 28

Esta carta de navegación contiene un procedimiento de aproximación RNAV de no precisión hacia la pista 28, en el cual la aeronave pasa por entre los dos grupos de turbinas del parque eólico declaradas en la IAC durante la fase final de aproximación que tiene lugar entre los waypoints KONVO – RW28, donde este último punto corresponde al MAPt. Esta IAC exige ciertos niveles mínimos de altitud en ciertos puntos y grados de descenso para lograr el franqueamiento de obstáculos, en este caso las turbinas, y llevar a cabo una operación aérea segura, véase a continuación la IAC:

Figura 3-18: IAC 5 RNAV (GNSS) Y Rwy 28.



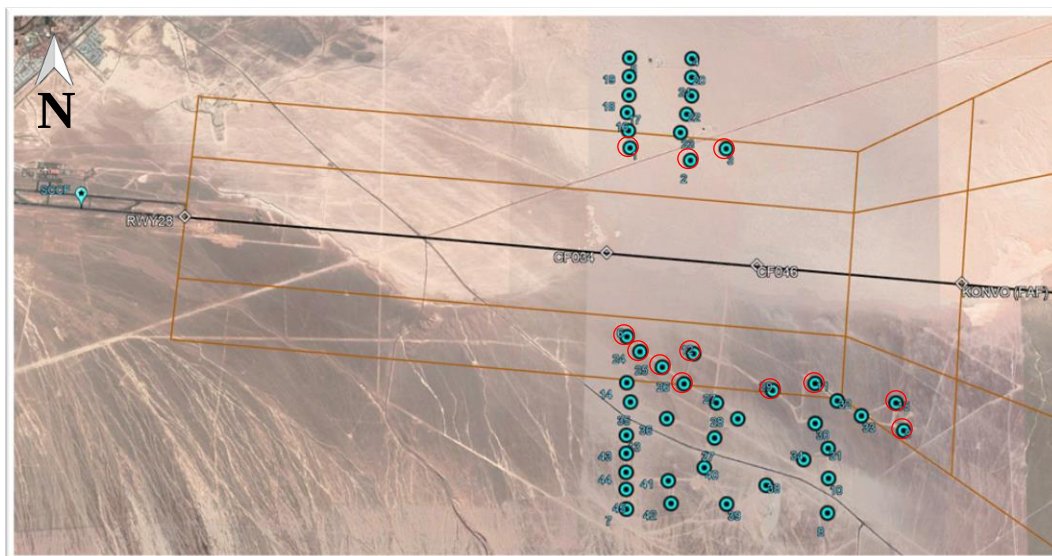
Fuente: AIP Vol. II (PROC).

El procedimiento permite la aproximación únicamente con guía lateral (LNAV) y con una altitud/altura mínima de decisión (MDA) para el aterrizaje de 8.200ft / 569 ft en el punto V, lo que quiere decir que a esta altura el piloto debe decidir si continua con el aterrizaje si es que visualiza la pista o si lo frustra y luego comienza de nuevo con autorización ATC. Esta aproximación es de no precisión debido a que no cuenta con guía de vuelo vertical (VNAV), sino que únicamente con guía lateral. La función de la guía lateral es determinar la trayectoria lateral entre el punto de inicio y fin, desarrollando las órdenes para que el piloto automático siga el camino trazado.

Las turbinas del parque eólico mayormente se localizan fuera del área primaria y secundaria de protección para las aeronaves, pero hay 12 turbinas que están dentro de los

límites del área secundaria donde 4 están en el tramo KONVO – CF046 y 8 entre CF046 – CF034, véase la siguiente figura:

Figura 3-19: Áreas de protección de obstáculos aproximación final.



Fuente: Elaboración propia.

Las turbinas ubicadas en el tramo KONVO – CF046 exigen, para dar cumplimiento al margen de franqueamiento de obstáculos en el área primaria y secundaria, una altitud mínima de 8.800 ft en CF046 (turbina 9 la más restrictiva), pero en este punto el procedimiento exige una mínima de 9.100 ft. Lo mismo ocurre en el tramo siguiente, ya que la turbina no. 12, la más restrictiva, exige una altitud mínima de 8.640 ft para cumplir con el margen, pero el punto CF034 demanda una mínima altitud de 8.720 ft. Entonces, estos puntos exigen un nivel de altitud mayor al que podría haber sobre las turbinas, y esto se debe a que el procedimiento no cuenta con VNAV.

Cuando un procedimiento cuenta con VNAV y LNAV corresponde a un procedimiento de precisión, siendo la función de la VNAV predecir y optimizar la trayectoria vertical de la aeronave durante el descenso en la aproximación, controlando la altura, camino y velocidad mediante un sistema de auto empuje. A diferencia de LNAV que tiene una superficie de franqueamiento continua (OCS) sobre el obstáculo más restrictivo y un MOC de 250 ft, VNAV posee una OCS parcialmente plana (*ground plane*) hasta determinada distancia del umbral con un MOC de 250 ft y parcialmente inclinada desde aquí hasta una

distancia bajo el FAF con el propósito de determinar aquellos obstáculos que van a ser tomados en cuenta para el franqueamiento de obstáculos.

La aeronave desciende por el “*glide path*” o “senda de planeo” que presenta una inclinación de 3° (siendo esto lo óptimo) desde el FAF y cruza 50 ft sobre el umbral de la pista, pasando por el punto donde debe alcanzar la DA/H, lo que en conjunto con la OCS le permite contar con un MOC variable a lo largo de la parte inclinada.

Para este procedimiento se imposibilita el uso de VNAV debido a que hay objetos de grandes dimensiones en el tramo final que penetran la OCS inclinada de la guía vertical. Entonces, esto puede desencadenar en que la OCS aumente su inclinación para lograr franquear los obstáculos y ello, a su vez, provocar que el gradiente de descenso del “*glide path*” sea mayor a 3° e incluso mayor a 3,5°, valor máximo para un descenso. Además, cuando la OCS de VNAV se ve afectada por algún obstáculo puede causar que la DA/H sea mayor a la MDA/H en un mismo procedimiento que permita la aproximación LNAV y LNAV/VNAV.

Aproximar con la ayuda de una guía vertical VNAV es casi siempre la mejor idea, ya que la aeronave vuela por el “*glide path*” siguiendo un descenso continuo de 3°, garantizando el franqueamiento del obstáculo más restrictivo, hasta el umbral de pista pasando por el punto donde alcanza la DA/H. Pero cuando solo se cuenta con guía lateral LNAV, se añade más carga operacional al procedimiento, debido a que la aeronave durante su descenso debe realizar un seguimiento de las altitudes exigidas en cada waypoint declarado y el procedimiento puede contener waypoints llamados “*Step down fixes (SDF)*” en los 3 tramos de aproximación para controlar obstáculos prominentes que haya.

En el segmento final de aproximación hacia la pista de esta IAC hay varias turbinas eólicas de 130 m de altura, lo que hace que se tengan que incorporar 2 Step down fixes después del FAF, CF046 y CF034, para que la aeronave mantenga una altura segura sobre ellos durante el descenso. Uno de estos puntos está ubicado aproximadamente a la mitad del Grupo II y el siguiente está al término del parque eólico, cuando ya se han sorteado y controlado todas las turbinas. Luego de pasar por este fix la aeronave puede descender al punto V con su respectiva MDA/H o sino frustrar.

3.3.2 Aeródromo de Valdivia

El aeródromo Pichoy de la ciudad de Valdivia región de los Ríos (ARP: 39°38'58''S, 73°05'11''W), con código OACI: SCVD e IATA: ZAL, es un aeródromo de categoría 4D de uso público concesionado y bajo la administración de la DGAC que tiene una altitud de 59 ft o 18 m. Cuenta con una pista de dimensiones 2.100 m de largo y 45 m de ancho teniendo ésta una orientación 17/35, donde en la pista 17 (lado derecho de la Figura 3-20) los aterrizajes/despegues tienen dirección al sur y en la pista 35 (lado izquierdo de la Figura 3-20) los procedimientos son en dirección al norte. Posee una franja de pista es 2.220 m x 150 m. Véase la siguiente imagen del aeródromo SCVD:

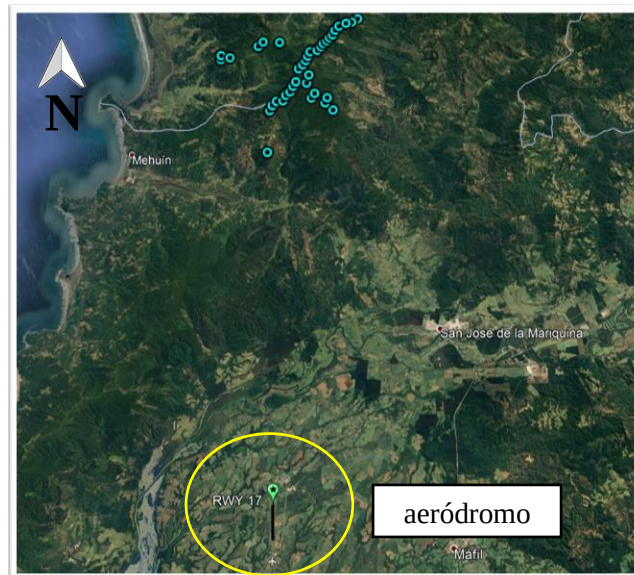
Figura 3-20: Aeródromo Pichoy.



Fuente: Google Earth.

El aeródromo cuenta con 13 procedimientos instrumentales, entre STAR, SID e IAC, donde 7 de ellos corresponden a aproximaciones instrumentales (IAC), y de las cuales hay 2, que por motivo de la ubicación que tendrán las turbinas, se deben analizar para conocer el impacto que pueden llegar a sufrir en cuanto a los mínimos de altitud exigidos en los waypoints declarados.

A diferencia de lo que sucede con el parque eólico en Calama el cual ya es realidad, el Parque eólico Pichilingue en las cercanías del aeródromo Pichoy es un proyecto que aún no sucede, pero es inminente. Este parque se encuentra al norte del aeródromo en el eje de aproximación a la pista 17 y lo van a conformar 38 aerogeneradores de 181,4 m o 594 ft de altura, los que mayormente están organizados de manera lineal, donde el aerogenerador más cercano (círculo rojo) se encuentra a 13,27 NM (24,5 km) desde el ARP y a 12,72 NM (23,6 km) del DER (véase el anexo 6.9 para la ubicación exacta de las turbinas). Véase la siguiente imagen del parque:

Figura 3-21: Parque eólico Pichilingue.

Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

A pesar de estar apartado del aeródromo, por sobre el parque pasan las aeronaves que se encuentran aproximando y pueden constituir un peligro a la navegación aérea, por lo que se deben señalizar los objetos, las turbinas, líneas eléctricas elevadas y sus torres. Cuando el SEA le informa a la DGAC sobre este proyecto y le hace llegar su EIA, la DGAC lo revisa y estudia para conocer las características de éste y como se ve impactada la navegación, y luego le informa al titular que la construcción de las turbinas requiere su autorización y el Certificado de Altura otorgado por el municipio, posterior a un estudio aeronáutico, para instalar definitivamente los generadores (véase el pronunciamiento remitido de la DGAC al Director del SEA respecto de este proyecto eólico **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

En aquel pronunciamiento la DGAC recomienda al titular del proyecto no ubicar las turbinas en un terreno mayor a 730 metros sobre el nivel del mar porque vulnera las áreas de protección de los procedimientos instrumentales que ya están desarrollados para el aeródromo.

Ahora bien, el análisis del aeródromo respecto del parque eólico se realiza en base al impacto que sufren las SLO y los procedimientos IAC declarados hacia la pista 17, donde en este caso, las turbinas no aparecen declaradas, por lo que el estudio de los

procedimientos se realiza de una manera tal para conocer si, tal como están declarados, se van a ver afectados a futuro con la instalación de las turbinas.

3.3.2.1 Superficies Limitadoras de Obstáculos

Como se menciona, la turbina más cercana está ubicado a 24,5 km desde el punto medio de la pista de aterrizaje, que viene siendo el ARP, de SCVD y de acuerdo con la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** la superficie limitadora con mayor longitud y que está en la dirección hacia el parque para una pista con clasificación 4 corresponde a la de aproximación con 15 km, lo que significa que esta superficie y las demás no se ven afectadas por la presencia del parque.

A continuación, se muestra visualmente la relación entre las SLO y el parque eólico para verificar lo mencionado anteriormente, y también el significado de lo que aparece en la imagen:

- La circunferencia roja corresponde a la superficie horizontal interna con un radio de 4.000 m desde el ARP.
- Las circunferencias verdes se relacionan con la cónica y cada una de ellas tiene la altura que corresponde de acuerdo con la distancia. Están ubicadas a 400 m, 800 m, 1.200 m, 1.600 m y 2.000 m (límite exterior) de la sup. horizontal interna.
- Las líneas azules divergentes competen a la superficie de aproximación hasta los 15 km desde los 60 m justamente después del umbral 17.
- Círculos celestes corresponden a los aerogeneradores.

Figura 3-22: Superficies limitadoras aeródromo SCVD y parque eólico.



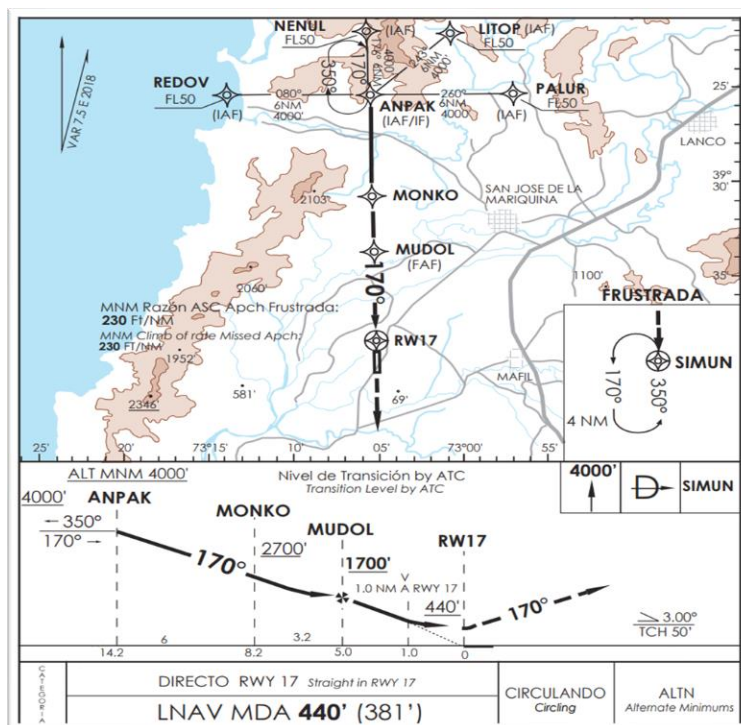
Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

La sección horizontal de la superficie de aproximación (área azul en la Figura 3-22) que se extiende desde los 6,6 km a los 15 km desde los 60 m siguientes al DER con una altura de 150 m, si bien no se ve afectada por las turbinas eólicas, se ve afectada por las colinas del lugar que sobrepasan los 150 m de altura. Frente a un obstáculo natural no se puede exigir su extracción, sin embargo, se pueden realizar operaciones de igual manera seguras.

3.3.2.2 IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 17

Esta carta de navegación contiene un procedimiento de aproximación RNAV hacia la pista 17 desde la dirección donde se encuentra el parque eólico, lo que quiere decir que la aeronave pasa por sobre éste al dirigirse al aeródromo. Los aerogeneradores están ubicados dentro del tramo NENUL – ANPAK, que viene siendo el tramo inicial de la aproximación para la transición NENUL. Esta IAC se ve de la siguiente manera:

Figura 3-23: IAC 4 RNAV (GNSS) Y Rwy 17.



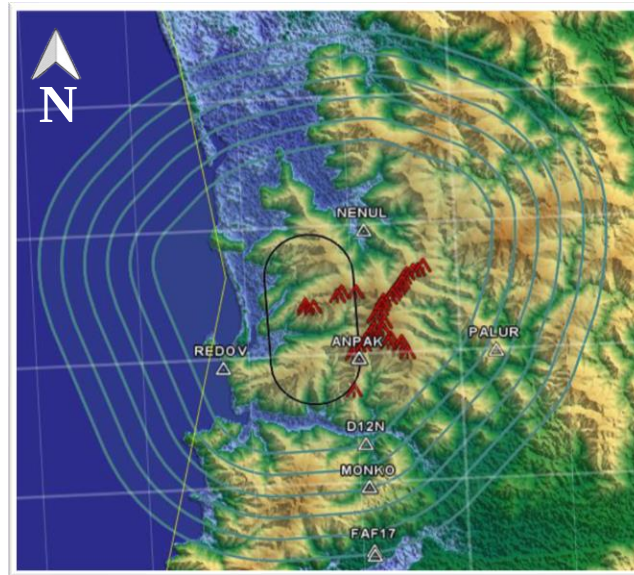
Fuente: AIP.

En el waypoint IF ANPAK hay un circuito de espera o holding (HLDG) que se encuentra a la misma altitud que dicho punto, el cual exige una altitud mínima de 4.000 ft. A continuación, se analizan las diferentes transiciones que cuenta el procedimiento más el circuito de espera que merecen un estudio respecto de las áreas de protección y las altitudes mínimas.

• Circuito Holding

Como se menciona, esta IAC contiene un circuito HLDG en el punto ANPAK a una altitud mínima de 4.000 ft, el cual es común para la aproximación de la IAC 2 tratada más adelante y, según lo estipulado en el Doc. 8168 de la OACI, el margen de franqueamiento de obstáculos en el área primaria deberá ser por lo menos de 984 ft. A continuación, se muestra el área de protección para este circuito:

Figura 3-24: Área de protección circuito de espera.



Fuente: Documento “Evaluación eólicos” de la DGAC.

Entonces para no vulnerar el área de protección de las turbinas mientras se encuentran en HLDG, el obstáculo más restrictivo debe tener una altitud total máxima de 3.016 ft. En el área de protección de obstáculos del circuito, hay 5 turbinas que son las más restrictivas, de las cuales 2 estarían vulnerando dicha área y exigirían una altitud mínima mayor para el HLDG. Véase a continuación:

Tabla 7: Obstáculos en el circuito de espera.

Turbina	Alt total ft	MOC ft	Alt mínima ft		Penetración ft
14	2973,75	984	3957,75	4000	-
15	3039,37	984	4023,37	4100	-23,37
16	2963,91	984	3947,91	4000	-
26	3072,17	984	4056,17	4100	-56,17
27	2940,94	984	3924,94	4000	-

Fuente: Elaboración propia.

En la tabla anterior, y en las que posteriormente se muestran en este capítulo, la altitud total se refiere a la altitud del terreno más la altura máxima de la turbina (torre más longitud de aspa) y altitud mínima es la altitud total más el MOC.

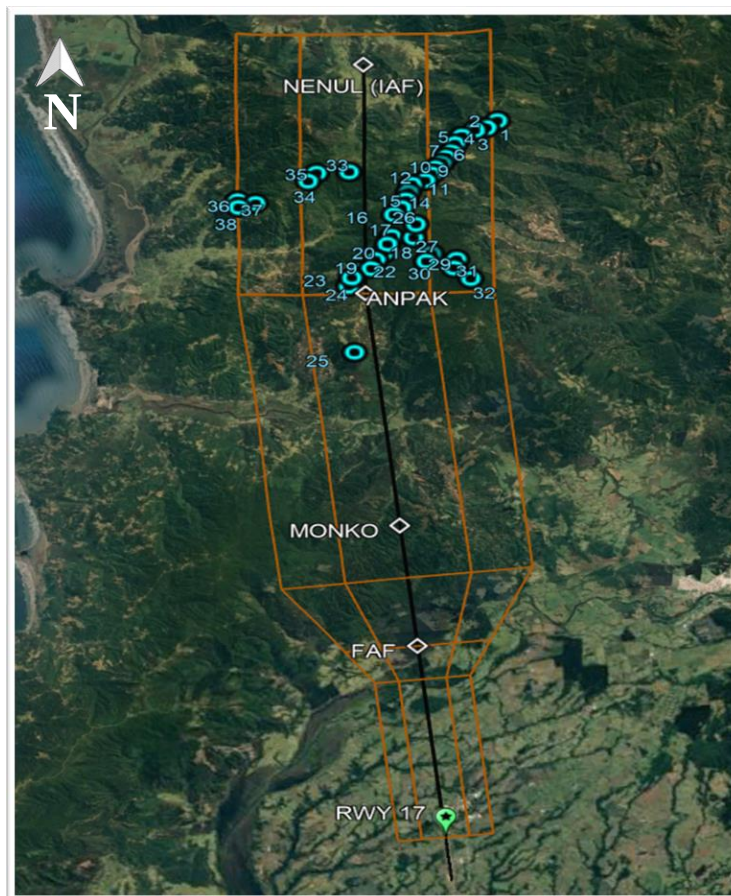
Las turbinas 14,16 y 27 corresponden a las que exigen una mayor altitud respecto de todas las otras del parque, pero se encuentran dentro del límite de los 4.000 ft que actualmente exige el HLDG como mínimo. Por otro lado, la turbina no. 15 y 26 son las más restrictivas, pero la 26 lo es más frente a la no. 15 en cuanto al nivel de altitud, ya que exige un mínimo de 4.057 ft. Esto provocaría que el circuito de espera debiese tener lugar mínimo a 4.100 ft para que cumpla con el MOC necesario frente a las turbinas, sin que esto esté afectando mayormente todo el procedimiento. De todas maneras, se han de analizar las otras transiciones que aparecen considerando el parque eólico.

- **Transición NENUL – tramo inicial**

Cuando la aeronave finaliza su STAR conecta con la aproximación en el punto NENUL, donde desde este punto hasta ANPAK corresponde al tramo inicial de aproximación, ANPAK hasta MUDOL (FAF) corresponde al tramo intermedio, por último, desde el FAF hasta RWY 17 es el tramo final.

El tramo intermedio ha sido analizado anteriormente en la transición PALUR y es común para esta transición. Respecto del tramo inicial, en él, ANPAK exige una altitud mínima de 4.000 ft para franquear el objeto más restrictivo y debería existir un margen de franqueamiento de 984 ft sobre los obstáculos (MOC). En este tramo, las turbinas eólicas están ubicadas tanto en el área primaria como secundaria de protección frente a obstáculos para la aeronave, siendo los aerogeneradores del área primaria los más restrictivos, véase la siguiente imagen:

Figura 3-25: Áreas de protección de obstáculos en transición NENUL.



Fuente: Elaboración propia en Google Earth.

De los aerogeneradores ubicados en los límites del área primaria, las mismas 2 turbinas que causan problemas en el circuito HLDG en esta transición no cumplen con el MOC de 984 ft en el tramo inicial, siendo la turbina 26 la más restrictiva.

Tabla 8: Obstáculos en el tramo NENUL - ANPAK.

Turbina	Alt total ft	Alt mínima ft	Penetración ft
26	3072,17	4056,17	4100 -56,17

Fuente: Elaboración propia.

Esta turbina llegaría a vulnerar por 57 ft el área primaria de protección en la ubicación donde se va a instalar, lo que haría tener que subir ANPAK a 4.100 ft para que el margen de obstáculos se cumpliera. Aquello no provocaría mayor problema en el tramo inicial, ya que el descenso sería 1,4° y seguiría manteniéndose dentro de los límites, lo mismo ocurre

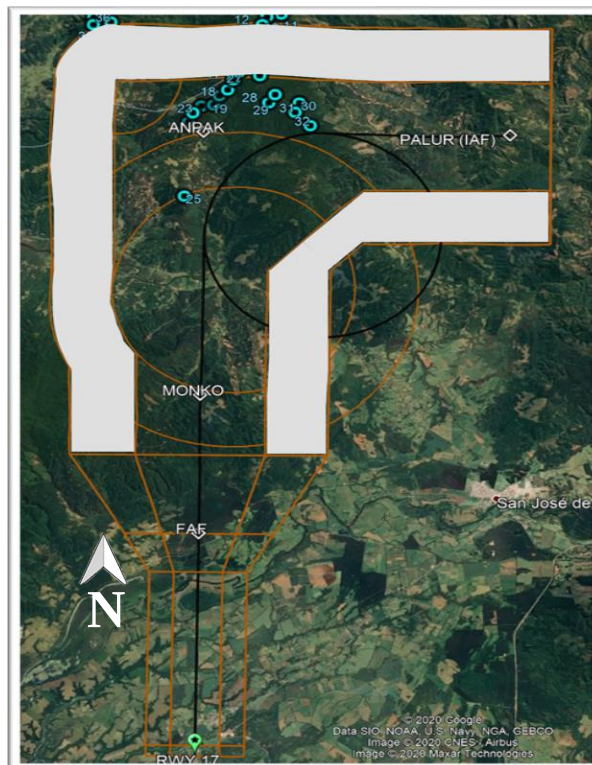
en el tramo intermedio ANPAK – MUDOL (FAF) con un descenso de $2,5^\circ$ y en ANPAK - MONKO (SDF) donde sería de $2,2^\circ$, encontrándose todos dentro de la norma.

El tramo intermedio ANPAK – FAF teniendo en cuenta el SDF MONKO es analizado en profundidad en la siguiente transición, ya que es común para ella también.

- **Transición PALUR**

En esta transición el tramo inicial de aproximación corresponde al formado por PALUR – ANPAK, el tramo intermedio ANPAK – FAF donde MONKO es un Step down fix para sortear un obstáculo que es una colina, y, por último, el ramo final va desde el FAF a RWY 17. El procedimiento posee un viraje que comienza a 2,33 NM antes de ANPAK, por lo que el área primaria de protección se ensancha y luego vuelve a su ancho normal, mientras que el área secundaria (área de color gris en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) se mantiene aproximadamente en su ancho, exceptuando en la parte del viraje donde se angosta un tramo. Véase la siguiente figura:

Figura 3-26: Áreas de protección de obstáculos transición PALUR.



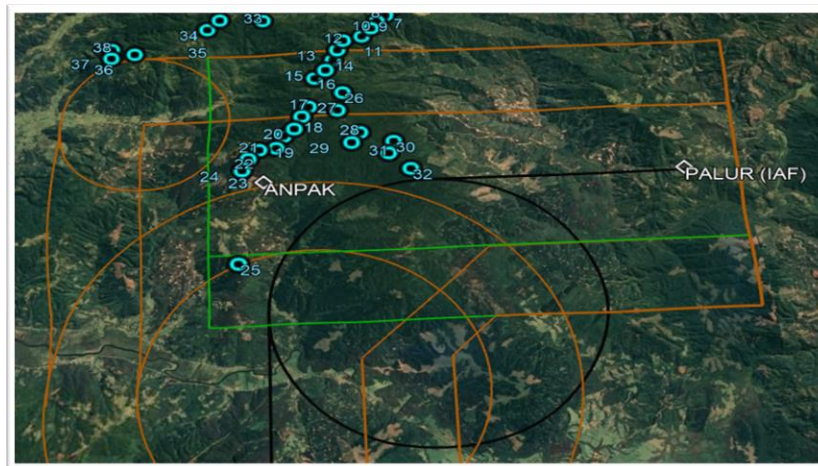
Fuente: Elaboración propia.

De las turbinas del parque, hay 20 que merecen estudio para conocer si van a tener el MOC seguro en los tramos inicial e intermedio, ya que se ubican dentro de las áreas de protección primaria y secundaria respectivas a cada uno. A continuación, se analizan ambos tramos.

i. Tramo inicial

En un procedimiento con viraje como el que está en estudio, el tramo inicial comprende desde PALUR (IAF) hasta 0,8 NM (correspondientes al ATT del IF) más allá de ANPAK, con 2,5 NM a cada lado del track que sigue la aeronave que se divide en área primaria y secundaria por partes iguales. En este tramo hay 12 turbinas dentro del área primaria y 8 en la secundaria. Lo mencionado se puede observar en la siguiente figura:

Figura 3-27: Áreas de protección tramo inicial.



Fuente: Elaboración propia.

El waypoint ANPAK exige una altitud mínima de 4.000 ft y en las turbinas ubicadas dentro del área primaria debe haber un MOC de 984 ft sobre ellas, mientras que para las que están en el área secundaria el MOC es variable y se muestra a continuación:

Tabla 9: Turbinas área primaria y secundaria en el tramo inicial.

Turbina	Alt total ft	MOC	Alt mínima ft	
13	2872,04	15,75	2887,79	2900
14	2973,75	181,1	3154,85	3200
15	3039,37	330,6	3369,97	3400
16	2963,91	456,58	3420,49	3500
17	2668,64	865,92	3534,56	3600

18	2711,28	984	3695,28	3700
19	2557,08	984	3541,08	3600
20	2448,82	984	3432,82	3500
21	2471,78	984	3455,78	3500
22	2399,61	984	3383,61	3400
23	2396,32	984	3380,32	3400
24	2320,87	984	3304,87	3400
25	1717,24	826,56	2543,8	2600
26	3072,17	684,87	3757,04	3800
27	2940,94	936,77	3877,71	3900
28	2862,2	984	3846,2	3900
29	2753,93	984	3737,93	3800
30	2685,04	984	3669,04	3700
31	2671,94	984	3655,94	3700
32	2596,44	984	3580,44	3600

Fuente: Elaboración propia.

De estas 20 turbinas, las más restrictivas son la no. 27 y 28, ubicadas en área secundaria y primaria respectivamente, que exigirían una altitud mínima de 3.900 ft para contar con el MOC necesario en este tramo, pero dicha altitud está dentro de lo que actualmente se exige en el procedimiento que son los 4.000 ft. Por lo tanto, estas turbinas no presentarían mayor inconveniente para el tramo inicial del procedimiento. De todas maneras, se debe tener en cuenta que en el análisis de la transición NENUL el punto ANPAK debiera tener lugar a 4.100 ft, por lo que esto es más restrictivo que 4.000 ft y este punto, en un futuro, tendría que exigir una altitud mínima de 4.100 ft.

ii. Tramo intermedio

Este tramo comienza 0,8 NM al norte de ANPAK y finaliza al alcanzar MUDOL (FAF), contando con el SDF MONKO, y es común para todas las transiciones de la IAC, donde las turbinas ubicadas dentro del área primaria deben contar con un MOC de 492 ft y en el área secundaria este MOC es variable y va disminuyendo conforme se acerca al límite exterior del área. Hay 5 turbinas en el área primaria y 4 en la secundaria, véase la siguiente figura:

Figura 3-28: Áreas de protección tramo intermedio.



Fuente: Elaboración propia.

Para conocer si a futuro las turbinas van a vulnerar la altitud declarada para este tramo, el estudio se realiza respecto de la altitud declarada actualmente en el SDF MONKO, el cual exige una elevación mínima de 2.700 ft. Las turbinas bajo estudio en el tramo intermedio son las siguientes:

Tabla 10: Turbinas área primaria y secundaria en el tramo intermedio.

Turbina	Alt total ft	MOC	Alt mínima ft		Penetración ft
21	2471,78	492	2963,78	3000	-263,78
22	2399,61	492	2891,61	2900	-191,61
23	2396,32	492	2888,32	2900	-188,32
24	2320,87	492	2812,87	2900	-112,87
25	1717,24	492	2209,24	2300	-
29	2753,93	472,4	3226,33	3300	-526,33
30	2685,04	240,1	2925,14	3000	-225,14
31	2671,94	267,7	2939,64	3000	-239,64
32	2596,44	149,6	2746,04	2800	-46,04

Fuente: Elaboración propia.

Aquí ocurre lo contrario al tramo inicial, ya que de las 9 turbinas estudiadas 8 estarían vulnerando las áreas de protección, puesto que para cumplir con el MOC exigen una altitud en MONKO mayor a 2.700 ft, por lo tanto, estas turbinas si presentan inconvenientes con las altitudes declaradas en la actualidad para el procedimiento. El aerogenerador no. 29 es el más restrictivo y va a exigir que la elevación mínima sea 3.300 ft en dicho waypoint.

Teniendo en cuenta que a futuro la altitud mínima en ANPAK debiera ser 4.100 ft y en MONKO de 3.300 ft, se tendría que el ángulo de descenso entre ANPAK – MONKO fuera 1,3°, lo cual está dentro del criterio, mientras que en el tramo MONKO – MUDOL el descenso quedaría de 4,7°, lo cual está totalmente fuera de la norma y el procedimiento no podría llevarse a cabo con éste.

De todas formas, el tramo que presenta problema, independiente de si ANPAK está a 4.000 ft o 4.100 ft, es MONKO – MUDOL porque MONKO debe estar a mínimo 3.300 ft. Entonces, en un procedimiento futuro que incluya las turbinas se puede incorporar un “*Step down fix*” antes de MONKO que las franquee para que así no se deba alterar la altitud ni en MONKO, ni el FAF y los descensos sigan estando dentro del criterio.

Como conclusión de este capítulo, el aeródromo de Calama tiene el parque eólico Valle de los Vientos declarado en sus IAC, ya que el proyecto es antiguo y han tenido que elaborar más procedimientos conforme a él. Respecto de las SLO, la superficie de aproximación se ve vulnerada por la turbina no. 6 que está ubicada a 38 m y su diámetro es de 100 m, lo cual se puede solucionar si el rotor de dicha turbina se posiciona hacia el otro lado de la superficie (hacia el sur o sursuroeste) para que sus aspas no pasen por la superficie. Este parque se ubica en el tramo final de aproximación de la IAC RNAV analizada cercano a la pista de aterrizaje, cumpliendo con el MOC que se requiere en esta fase para la seguridad de la operación, pero cuenta con altitudes declaradas mayores debido a que el parque no permite la utilización de guía vertical VNAV en los aterrizajes, ya que ella se ve vulnerada por las turbinas. A pesar de que los procedimientos de aterrizaje hacia la pista 10 no pasan por sobre el parque, en el procedimiento de frustrada

sí, entonces en la IAC 4 el MAPt ha sido desplazado hacia el FAF para que el viraje, que ha de realizar la aeronave, comience antes y se eviten las turbinas.

Por otro lado, a diferencia de lo que sucede con el aeródromo de Calama, el de Valdivia no cuenta con las turbinas declaradas en sus IAC, puesto que aún el proyecto no está construido ni en operación. La turbina más cercana al aeródromo del parque eólico Pichilingue se ubica a 24 km, por lo que, la SLO de mayor extensión y las demás no son vulneradas. El parque se ubica en los tramos inicial e intermedio de las transiciones analizadas y el estudio se ha realizado para conocer si éstos van a presentar inconvenientes a futuro por la instalación de los aerogeneradores. Los resultados obtenidos son:

- El circuito HLDG debiera tener lugar a 4.100 ft.
- En la transición NENUL, ANPAK debería declararse a 4.100 ft para cumplir con el MOC, llevando a un descenso de 1,4°.
- En la transición PALUR, el tramo inicial no se ve afectado por las turbinas, pero sí el intermedio, exigiendo que MONKO tuviera declarada una altitud de 3.300ft.
- Con MONKO a 3.300 ft, el tramo MONKO – FAF tendría un descenso de 4,7°, totalmente fuera de criterio.

Entonces, se puede apreciar que las turbinas pueden llegar a causar problemas en la navegación aérea e ir en desmedro de ella, lo cual desencadenaría en la modificación de los procedimientos ya declarados respecto de las altitudes mínimas para la operación, como sería el caso del aeródromo de Valdivia. A diferencia de lo que sucede en Calama, los procedimientos ya tienen declaradas las turbinas, es decir, previamente se evaluó el proyecto y si fue necesario se elaboraron nuevas IAC que cumpliesen con altitudes seguras si antes sucedía en él lo mismo que ocurre ahora con Valdivia. Sin embargo, se debe tener en cuenta que la modificación de procedimientos de vuelo no es un proceso económico, ya que se diseña en base al Doc. 8168 y para su aprobación debe ser testeado en vuelo.

3.4 PROPUESTA DE SERVICIO DE ANÁLISIS AERONÁUTICO

Como se ha expuesto anteriormente, los aeródromos ubicados dentro de Chile son de gran ayuda para la conexión de las personas tanto dentro del mismo territorio, como con el exterior, además, contribuyen a las economías locales, y es por lo que se deben abordar los objetos que pueden poner en riesgo la aviación civil y establecer medidas de mitigación para que dicho riesgo disminuya o sea eliminado. Las turbinas eólicas deben ser estudiadas debido a que su desarrollo, presencia y funcionamiento traen consigo serios riesgos para la navegación aérea, como ha quedado establecido.

Las turbinas son estructuras de gran altura que tienen el potencial de impactar negativamente cuando la aeronave se encuentra a más baja altitud, como en la fase de aterrizaje, o en las SLO. De igual manera, pueden afectar el funcionamiento de los radares de vigilancia, equipos que entregan información bastante importante para los controladores de tráfico aéreo en Chile.

La DGAC adquiere conocimiento de un parque eólico en las cercanías de un aeródromo porque SEA le hace llegar el documento EIA o DIA para que ella pronuncie obligaciones y recomendaciones a seguir por el titular del proyecto. Aunque cuando SEA no le consulta, la DGAC se entera de igual manera, ya que para comenzar la instalación el titular requiere el Certificado de Altura otorgado por ella. Esta autoridad aeronáutica únicamente dicta referente a las SLO, ya que para los procedimientos de vuelo solo entrega recomendaciones y sobre los radares no se tienen estudios o instituciones que se encarguen específicamente del cuidado de su funcionamiento frente a obstáculos.

Conforme a lo anterior más la información recabada respecto del tratamiento dado a las turbinas en 3 países, se evidencia la posibilidad de entregar un servicio de evaluación, Servicio de Análisis Aeronáutico (en lo sucesivo “Servicio”), que se dedique a estudiar futuros proyectos eólicos dentro de Chile para evaluar el efecto que producen sobre el espacio aéreo y garantizar soluciones eficaces para lograr una convivencia segura entre la industria eólica y aeronáutica.

3.4.1 Lineamientos Técnicos y Económicos

Debido a la importancia de este tema y otros relacionados con la industria, sería recomendable que se implementara la creación de un Centro de Estudios e Investigaciones de Ciencias Aeronáuticas (CEICA) en Chile, específicamente en la Universidad Federico Santa María, que se desempeñe tal como dice su nombre, en “*prestar servicios de consultoría, estudio e investigaciones que resuelvan desafíos que enfrenta la industria aeronáutica*”. Una de las líneas de acción con la que contaría este CEICA, está encargada de “Estudios sobre Gestión y Operación del Espacio Aéreo”, desde la cual sería posible incluir esta unidad de negocio y entregar el Servicio a un grupo variado de clientes, principalmente del área aeronáutica, pero también, por supuesto, a desarrollares de proyectos. Entre ellos destacan:

- Titulares de proyectos eólicos;
- Autoridad aeronáutica (DGAC);
- Fuerzas Armadas, principalmente la Fuerza Aérea del Ejército y la Armada;
- Operadores de aeronaves;
- Administradores de aeródromos, tanto públicos como privados;
- Empresas de tecnología aeroportuaria.

La idea central del Servicio es satisfacer las necesidades de los clientes antes mencionados a través de estudios y consultorías respecto de la altura de las turbinas de parques eólicos que deseen ser examinados o que ya están instalados, donde sea que se ubiquen no precisamente en alrededores de un aeródromo, para evaluar el efecto que ellas producen sobre el espacio aéreo y, de esta manera, generar soluciones prácticas eficaces tanto para los desarrolladores, como para la aviación, y así lograr que ambas industrias operen eficientemente sin efectos adversos entre sí. Esta unidad se enfoca en dos aspectos importantes los Procedimientos de Vuelo Instrumental y las SLO.

Mediante estos estudios va a ser posible determinar, por ejemplo, la factibilidad de desarrollar nuevos Procedimientos de vuelo, si se ven vulnerados los que ya están declarados, si infringen las SLO de los aeródromos del país, entre otros aspectos. Esta

unidad de negocio contempla tener colaboradores expertos y con amplios conocimientos en esta área para entregar los mejores estudios y soluciones.

Referente a la aprobación final del proyecto, la DGAC siempre tiene la última palabra porque es quien emite el Certificado de Altura, pero el Servicio de Análisis también puede objetar el proyecto. A continuación, se dan las razones de ambos:

- La DGAC es la responsable del terreno alrededor de un aeródromo y que no se ubiquen estructuras que obstaculicen las operaciones, y si en el estudio físico remitido a ella aparece algo con lo que no concuerda podría solicitar se realice uno nuevo y no aprobar la construcción.
- El Servicio al estudiar las SLO y los procedimientos puede estimar que uno de ellos o ambos está siendo interferido por las turbinas y no aprobar el proyecto. Sin embargo, en ese caso se prepararán medidas de mitigación aceptables para cancelar los riesgos producidos y que el proyecto permita llevar a cabo operaciones aéreas seguras dentro del territorio.

Respecto del estudio que se realiza a las turbinas, cuando ellas están aún en la etapa de planificación el estudio se enfoca en una identificación y gestión de los riesgos que puedan ocasionar para garantizar que sean minimizados de una manera efectiva y eficiente, y así el desarrollador del proyecto se encuentra en una etapa temprana para realizar la propuesta de cambios y mitigación si así se determina. Mientras que, al tratarse de un parque ya instalado se examina su afectación al espacio aéreo que ya se encuentra desarrollado.

Las evaluaciones que se van a realizar son desde un punto de vista físico, es decir referente a las calidades de la turbina (altura, longitud de aspas, ubicación) y se enfocan en los dos aspectos mencionados anteriormente, se detallan a continuación:

Evaluación Física

a. Superficies Limitadoras de Obstáculos

Estas superficies tratan la protección física que debe tener un aeródromo para que obstáculos prominentes no aeronáuticos no obstaculicen ni afecten la seguridad de

las operaciones. La SLO de mayor longitud es la de aproximación con 15 km, entonces se realiza un estudio hasta esta longitud desde el punto que se ha determinado para la elaboración de las superficies.

Esta unidad garantiza que el espacio aéreo alrededor del aeródromo no se vea vulnerado por obstáculos que impidan operaciones seguras en él. Se basa en lo establecido en el DAR 14 de la DGAC, donde se encuentran las longitudes y pendientes de cada superficie.

b. Procedimientos Instrumentales de Vuelo

En esta evaluación, la unidad comprueba el efecto que puedan casuar las turbinas en los procedimientos de vuelo y si ellas cumplen con las altitudes mínimas que ellos exigen en determinados waypoints y con el MOC mínimo que se ha de contar en las fases de vuelo por sobre las turbinas. La unidad se basa en lo dispuesto en el Doc. PANS-OPS no. 8168 volumen I y II de la OACI.

En el caso de ocurrir interferencias sobre los procedimientos se puede poner significativamente en peligro la seguridad de las operaciones y de los pasajeros, para ello el Servicio propone nuevas ubicaciones a las turbinas o medidas de mitigación, y de esta manera contrarrestar los riesgos. También, puede desarrollar nuevos procedimientos, contemplando las turbinas y los problemas que llegan a provocar.

Para la realización de los estudios se utilizarán softwares como Global Mapper, para lo que es la visualización de las turbinas eólicas, la confección de cada SLO y los procedimientos de vuelo, y Microsoft Office para los informes. En el caso de requerir el uso de otros sistemas/programas se adquirirán según corresponda, pero estos 2 son los principales.

Ahora bien, respecto de aquellas evaluaciones el Servicio ofrece los siguientes paquetes de estudio, donde cada uno de ellos incluye un estudio detallado con la declaración de los profesionales encargados, que se remite a la DGAC para que informe la aprobación final y la posterior emisión del Certificado de Altura, si se tratase de un proyecto nuevo. Por

otro lado, al tratarse de un proyecto ya establecido el estudio será remitido al cliente que lo solicita. Ellos son:

- 1) **Paquete Evaluación Procedimientos:** Este paquete comprende únicamente el estudio de los procedimientos de vuelo declarados de un aeródromo cuando el parque eólico se encuentra cercano a un aeródromo.
- 2) **Paquete Evaluación SLO:** Este corresponde a cuando el parque eólico informado se encuentra dentro de un radio máximo de 15 km desde el punto que se ha determinado para la elaboración de las SLO en un aeródromo.
- 3) **Paquete Evaluación Física Aeroportuaria:** Este incluye el estudio de las SLO y los Procedimientos a un nivel aeroportuario, es decir, cuando el parque se encuentra cercano a un aeródromo (aproximadamente 15 NM de él). En el caso de los procedimientos, se analiza lo que corresponde a las SID, STAR e IAC declaradas.
- 4) **Paquete Evaluación Física en Ruta:** Este paquete es igual al anterior, con la diferencia de que es a un nivel en ruta, dicho de otra manera, cuando el parque se ubique a más de 15 NM del aeródromo. Las SLO igualmente se analizan puesto que el estudio de ellas es remitido a la DGAC para la emisión del Certificado.
- 5) **Paquete Combinado Evaluación Física en Ruta y Aeroportuaria:** Este incluye el estudio de las SLO y los Procedimientos de vuelo desde un nivel aeroportuario y en ruta. Es el paquete más completo que va a entregar el Servicio.

Aquellos paquetes son la línea de ingresos del Servicio y para ello los precios se van a determinar dependiendo de dos factores. El primero corresponde al valor de la hora de trabajo, el cual se va a establecer antes de poner en marcha el servicio pudiendo ser aproximadamente 2,5 UF reajustándose éstas cada 3 o 6 meses. Y, como segundo factor se tiene la cantidad de horas destinadas a realizar cada estudio. Se debe tener en cuenta que la cantidad de horas de duración puede variar dependiendo el paquete tomado, la complejidad del proyecto o las características que tenga.

Aproximadamente los paquetes podrían tener los siguientes valores (pueden cambiar):

- **Paquete Evaluación Procedimientos:** El precio estimado será de \$1.680.000.

- **Paquete Evaluación SLO:** El precio estimado será de \$1.680.000.
- **Paquete Evaluación Física Aeroportuaria:** Su precio aprox. será de \$2.760.000.
- **Paquete Evaluación Física en Ruta:** Tendrá un precio aproximado de \$2.760.000.
- **Paquete Combinado Evaluación Física en Ruta y Aeroportuaria:** Este es el paquete más completo y tendrá un precio estimado de \$3.950.000.

La cantidad monetaria mensual percibida por esta unidad no se conoce puesto que la cantidad de estudios que se van a realizar es variable y desconocida.

Uno de los canales principales para acceder al Servicio de Análisis sería la página web³² de la Academia de Ciencias Aeronáuticas de la Universidad Federico Santa María, donde para realizar la notificación de los aerogeneradores que van a ser sometidos a estudio, acceder a la selección del paquete que se desea tomar y el pago de éste, se sugiere la creación de un botón de acceso dentro del botón correspondiente al CEICA. También, se recomienda que la información de las turbinas sea entregada en un archivo Excel que es posible descargar de dicha página web y cargarlo a la misma, debiendo ser la siguiente:

- Ubicación WGS84 de cada turbina.
- Altura de la góndola (m) sobre el terreno.
- Altura máxima de la turbina (m).
- Elevación del terreno donde está ubicada (m).

A través de esta página web el cliente podrá pagar el estudio que desea para el proyecto mediante pago con tarjeta de crédito o débito (Webpay), o a través de una transferencia bancaria directa a la cuenta del Servicio, teniendo que enviar el comprobante al email del CEICA.

El servicio entregado es un estudio personalizado a cada parque eólico que contempla reuniones con los clientes en la etapa final para entregarle una presentación formal con los resultados obtenidos y las medidas de mitigación si fuera el caso de que hay turbinas

³² Página web del ACA es <http://www.aca.cl/>.

interfiriendo. Se sugiere realizar esta reunión previamente al envío del estudio a la DGAC. Al ocurrir una objeción por parte de la autoridad también se le comunica al titular a través de una reunión. Incluir al cliente en los resultados obtenidos y no dejándolo fuera hasta que se le entrega el Certificado, permite generar fidelización con él y hacer el servicio más inclusivo. Esto puede generar un reconocimiento entre potenciales clientes para la preferencia de este Servicio.

De todas maneras, el Servicio contará con un número telefónico y un formulario de contacto donde se podrá solicitar más información acerca de los paquetes de estudio ofrecidos. Además de poder realizar consultas a través del formulario dispuesto, el cliente podrá entregar recomendaciones y felicitación para el Servicio.

Lo que se ha mencionado sobre el Servicio de Análisis y el proceso de gestión que él sigue para la realización de los estudios se muestra a continuación de una forma gráfica para mayor claridad:

Figura 3-29: Proceso de Gestión interna del Servicio de Análisis.

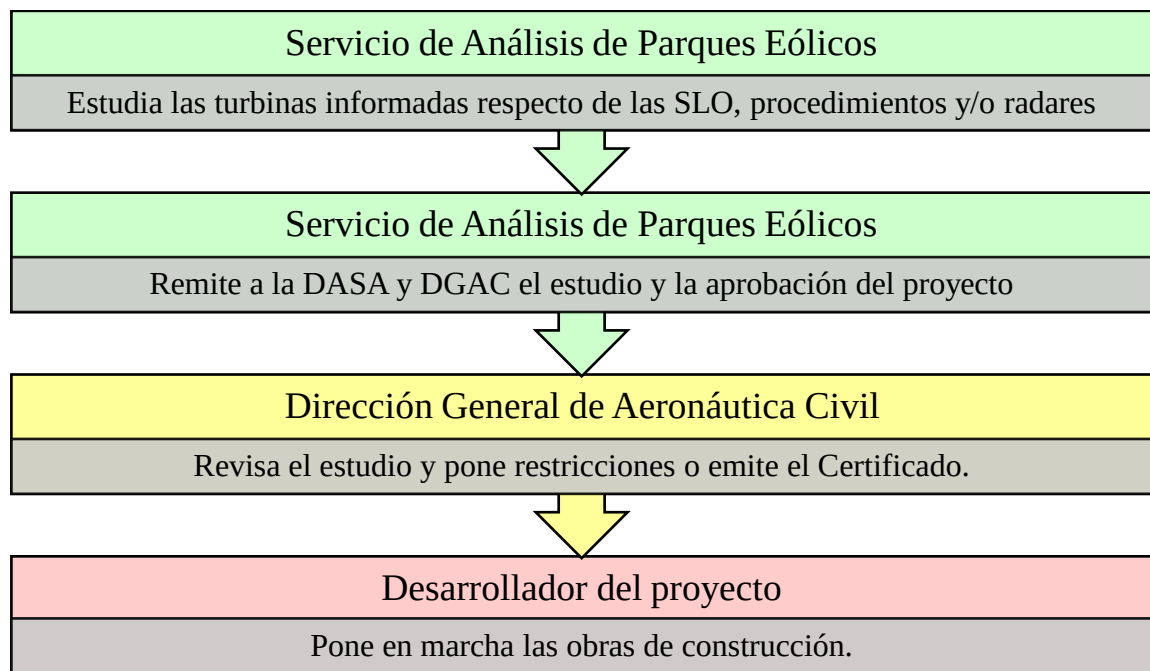


Fuente: Elaboración propia.

Cuando se trata de un proyecto que ya está en funcionamiento y se estudia, los resultados obtenidos son explicados en una reunión al cliente y posterior se le envía el documento, pero este último no se remite a la DGAC, ya que no se está buscando la aprobación de ella hacia el proyecto. Sino, que se está informando a quien haya solicitado la evaluación.

Por otro lado, al referirse a un proyecto nuevo que está en busca de la aprobación DGAC, el Servicio se basa en los resultados obtenidos. En el caso de que el estudio indique que no se vulnera ni afecta ninguno de los aspectos bajo estudio, y posterior a la reunión con el cliente, se va a remitir el estudio y un certificado de aprobación hacia la DASA y la DGAC para que tengan constancia de que el proyecto ha sido estudiado bajo los documentos DAR 14 y Doc. 8168, para que así la autoridad emita restricciones al parque o entregue el Certificado de Altura y se puedan iniciar las obras. Por el contrario, en caso de perjudicar alguno de los aspectos, se ofrecen soluciones de mitigación y se sigue el proceso anterior. La DGAC sigue siendo responsable por el uso de terrenos aledaños a un aeródromo para proteger las SLO de ellos de objetos de elevación considerable, y es ella quien tiene la decisión final frente al proyecto. Un diagrama de este proceso sería algo como lo que sigue:

Figura 3-30: Proceso Gestión de Aprobación DGAC.



Fuente: Elaboración propia.

Por otro lado, la señalización e iluminación de las turbinas, independiente el paquete tomado, va a ser determinada de acuerdo con los resultados del estudio realizado por la

unidad del Servicio, siempre teniendo en cuenta lo estipulado en el DAN 14 154, recomendaciones tomadas desde el Anexo 14 de la OACI.

❖ Costos del Servicio de Análisis

Se han tratado los ingresos que podrá percibir esta unidad por cada estudio realizado y en cuanto a los costos que incurrirá, ellos se resumen a continuación de manera cualitativa más que cuantitativa:

- Remuneración de empleados: Los empleados calificados para trabajar en esta unidad serán remunerados de acuerdo con un sueldo de mercado acorde al cargo en que se desempeñan. Este costo varía respecto de la cantidad de personal contratado.
- Softwares: Lo primordial es adquirir las licencias de los programas a utilizar en los estudios para que el personal tenga acceso a todas las funciones y pueda llevar a cabo el trabajo solicitado. En caso de requerir otros programas de igual manera se adquirirán con licencia completa.
- Uso de espacios: El CEICA tendría que pagar por el uso de lugares dentro de la universidad para realizar las actividades, por lo que todas las unidades tendrán que aportar cierto porcentaje para el pago de éstos.

❖ Beneficios

Con esta propuesta de servicio no solo se buscan los beneficios económicos que se pueden conseguir por los estudios, sino también los beneficios que implican para la Universidad Federico Santa María como institución estudiantil sumergida en el área aeronáutica contar con estudios e investigaciones relacionadas a esta industria.

Al implementar un Centro de Estudios e Investigaciones de Ciencias Aeronáuticas como parte de la universidad e incorporar el Servicio de Análisis, se busca generar valor a la casa de estudios y fortalecerla para potenciar la investigación, desarrollo e innovación en aspectos aeronáuticos, mostrándola como una referente que cuenta con las capacidades de hacer estudios sofisticados enfocados en diferentes temas relacionados con la aviación civil. Esto a su vez le agrega valor a la industria aeronáutica nacional, ya que los tópicos



abordados en este trabajo de título pueden ahondarse aún más y hasta enfocar investigaciones dedicadas únicamente a ellos.

Además, esto permite insertar a los alumnos de quinto año, que están próximos a titularse, en otro medio más allá de las salas de clases, entregarles herramientas prácticas para que se acerquen al ambiente aeronáutico, trabajen los conocimientos entregados en clases y se puedan desempeñar en estudios e investigaciones, no tan solo de proyectos eólicos, sino en todos aquellos relacionados a la aviación.

Como cierre a este capítulo, todo lo expuesto sobre el Servicio de Análisis Aeronáutico (impacto de parques eólicos) se reúne en un modelo simplificado de negocio bajo la metodología CANVAS, donde se describen las bases sobre las cuales éste crea, proporciona y capta valor. Está compuesto por nueve elementos básicos que se muestran a continuación:

Tabla 11: Modelo de negocios CANVAS del Servicio de Análisis.

Socios clave ▪ Autoridad Aeronáutica. ▪ Profesionales de la unidad.	Actividades clave ▪ Levantamiento de información al iniciar cada estudio. ▪ Promoción del Servicio. ▪ Actividades de plataforma. Recursos clave ▪ Equipos y softwares. ▪ Profesionales con las competencias necesarias.	Propuesta de valor ▪ Realizar estudios sobre la altura de las turbinas eólicas para evaluar su efecto sobre el espacio aéreo y generar soluciones eficientes para ambas industrias.	Relaciones con clientes ▪ Reuniones para notificar resultados. ▪ Llamadas telefónicas y formulario para más información. Canales ▪ Página web del ACA. ▪ Usuario de LinkedIn.	Segmentos de cliente ▪ Titulares de proyectos eólicos. ▪ Autoridad aeronáutica. ▪ Fuerzas armadas. ▪ Operadores de aeronaves. ▪ Administradores de aeródromos. ▪ Empresas de tecnología aeroportuaria.
Estructura de costes ▪ Profesionales base. ▪ Infraestructura tecnológica para la realización de los estudios. ▪ Uso de espacios.		Fuente de ingresos ▪ Precio de cada paquete de estudio. ▪ Pagos mediante transferencia bancaria o tarjeta crédito/débito.		

Fuente: Elaboración propia.

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En base al análisis realizado se ha podido establecer el impacto de las turbinas eólicas sobre el sistema aeronáutico, en específico los radares de vigilancia PSR y SSR, las Superficies Limitadoras de Obstáculos (SLO) y los Procedimientos de Vuelo Instrumental, infiriendo que ellas pueden causar impactos negativos significativos, ya que impactan tanto de manera técnica, como física.

Los impactos técnicos se reflejan en los radares de vigilancia, pero sobre ellos no se maneja más información que lo que aparece en documentos bibliográficos. Por el contrario, los efectos físicos se reflejan en las SLO y los Procedimientos, y respecto a ambos se tiene más conocimiento y documentos aeronáuticos para establecer su comportamiento frente a estas estructuras. En las SLO las turbinas pueden interferir en el espacio aéreo y poner en peligro las operaciones de vuelo, sin embargo, ellas están protegidas por ley. Mientras que, el diseño de los Procedimientos no está contemplado como mandatorio y las turbinas pueden llegar a afectar los niveles mínimos de altitud exigidos y/o la implementación de guía vertical VNAV en los aterrizajes.

De los aspectos analizados referente a la normativa aeronáutica de Chile, EEUU y Europa, y al tratamiento que en ella se les da a las turbinas, se han determinado aspectos comunes como la necesidad de estudiarlas, de obtener un Certificado de aprobación, la iluminación y balizaje que deben tener, y el estudio que merecen las SLO para no ser vulneradas. Sin embargo, también hay aspectos distintos como el estudio que realizan instituciones en Europa y EE.UU sobre la afectación a los radares. Finalmente, se destaca que la normativa de Chile y EASA no resguarda el diseño de los Procedimientos, ya que frente a ellos la autoridad solo emite recomendaciones, no así la FAA, ya que la notificación de las turbinas, además de tener que hacerla si miden más de 200 ft, se hace si provoca problemas con el franqueamiento de obstáculos en un área de aproximación, ruta o despegue. Siguiendo esta línea, la normativa de Chile es la menos completa y debería dedicarles mayor atención a los aerogeneradores.

En relación con el estudio de dos aeródromos, se dio cuenta que una de las turbinas vulnera la superficie de aproximación del aeródromo de Calama, pero es evitable posicionando el rotor hacia el sur oeste. Al contrario, las SLO de Valdivia no se ven afectadas, ya que están a 24,5 km del ARP. Asimismo, al investigar los Procedimientos de Valdivia se advierte que las altitudes mínimas declaradas se van a ver perjudicadas con el parque.

Con ello se concluye que hay casos de aeródromos dentro del territorio nacional que se ven afectados por turbinas y merecen ser solucionados para que el espacio aéreo y las operaciones llevadas a cabo sean seguras.

Conforme al análisis realizado, se evidencia la posibilidad de entregar un servicio de evaluación referido a la industria eólica. Aplicando el modelo CANVAS se obtuvo el segmento clientes al cual apunta, donde destaca la Autoridad Aeronáutica, Desarrolladores de proyectos y Administradores de aeródromos. La propuesta de valor ha sido definida en la realizar estudios a las turbinas y así garantizar soluciones eficientes para ambas industrias.

Finalmente, se puede concluir que los aerogeneradores son un obstáculo para la aviación civil que pueden llegar a causar problemas a las SLO y/o los Procedimientos declarados de un aeródromo, y es por lo que, deben ser estudiados para generar condiciones seguras para la navegación aérea.

RECOMENDACIONES

Del análisis realizado se puede recomendar que otros estudiantes memoristas de la USM, con interés en los tópicos tratados y con la idea de seguir agregando valor a la industria aeronáutica, profundicen en el comportamiento de la navegación aérea frente a obstáculos enfocándose primordialmente en el impacto que podrían tener las turbinas en los radares de vigilancia PSR y SSR ubicados a lo largo de Chile.

Para futuros estudios se puede implementar la misma metodología o bien una más avanzada con herramientas de simulaciones para cumplir a cabalidad los objetivos que se propongan y establecer la afectación de estos equipos.



La posibilidad de que la Universidad siga estudiando los temas aquí tratados u otros que sean atinentes a la aeronáutica es posible y se podría dar a través de un Centro de Estudios e Investigaciones que la ACA, dado su conocimiento y experiencia, debería tener en su organigrama. La importancia de ello es seguir entregando soluciones para que la industria funcione con los más altos estándares de seguridad y de una manera eficiente para todos. Además, de seguir añadiendo valor a la industria aeronáutica.

5 BIBLIOGRAFÍA

- Acciona. (2020). *Wind turbines*. Recuperado el 11 de mayo de 2020, de Acciona Web site: <https://www.acciona.com/renewable-energy/wind-power/wind-turbines/>
- Ahlstrom-Munksjö. (2020). *HighFlow - innovative product for the wind energy market*. Recuperado el 15 de junio de 2020, de Ahlstrom-Munksjö Web site: <https://www.ahlstrom-munksjo.com/de/medien/news/trinitex-advance22/>
- Air Warfare Center. (2005). *The effects of wind turbine farms on ATC radar*. Trial, UK Government, UK. AWC/WAD/72/665/Trials.
- Airspace & Safety Initiative Windfarm Working Group. (2013). *Managing the impact of wind turbines on aviation* (Vol. I). United Kingdom. Recuperado el 21 de julio de 2020.
- Angulo, I., de la Vega, D., Cascón, I., Cañizo, J., Wu, Y., Guerra, D., & Angueira, P. (enero de 2014). Impact analysis of wind farms on telecommunication services. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 32, p. 84-99. Recuperado el 09 de junio de 2020, de <www.sciencedirect.com>
- ASC Signal. (2020). *L-band Air Traffic Control Radar Antenna System*. Especificaciones de Producto. Obtenido de [https://www.cpii.com/docs/datasheets/380/L-BandAirTrafficControlRadar2012%20\(1\).pdf](https://www.cpii.com/docs/datasheets/380/L-BandAirTrafficControlRadar2012%20(1).pdf)
- Beason, R. (2007). *A new multilateration optimization technique for air traffic management and surveillance*. Dissertation (Doctor of Philosophy), University of Oklahoma, School of electrical and computer engineering, Norman, Estados Unidos.
- Brenner, M. (2008). *"Wind Farms and Radar"*. Virginia, Estados Unidos. Recuperado el 2020
- Butler, M., & Johnson, D. (2003). *"Feasibility of mitigating the effects of windfarms on primary radar"*. Alenia Marconi Systems Limited.
- Choudhari, P., Karthikeyan, V., & Madhavan, A. (2017). *Electronic Warfare - Principles of Radar*. Recuperado el 2020, de Full Afterburner: <http://fullafterburner.weebly.com/next-gen-weapons/electronic-warfare-principles-of-radar>
- Cifuentes, R. L. (octubre de 2013). *Guía Eólica: Desarrollo de proyectos pequeños y medianos proyectos*. Centro de Energías Renovables (CER), Santiago. Recuperado el 15 de Agosto de 2019, de <http://dataset.cne.cl/Energia_Abierta/Estudios/CER/Gu%C3%ADa%20eolica%20desarrollo%20de%20proyectos%20peque%C3%B1os%20y%20medianos.pdf>
- Civil Aviation Authority. (2016). *CAA Policy and Guidelines on Wind Turbines - cap 764* (sexta ed.). Kingsway, Londres. Recuperado el 15 de julio de 2020.
- Cluter, C. (18 de nov de 2017). *How can a non-precision approach get you lower than a Glide path?* Recuperado el 22 de sept. de 2020, de Boldmethod: <https://www.boldmethod.com/learn-to-fly/navigation/when-lnav-minimums-are-lower-than-vnav-which-should-you-use/>

- Communication, Navigation and Surveillance Sub-Group. (2018). *MID Region Surveillance Plan*. OACI.
- Danish Wind Industry Association . (2003). *¿Cómo funciona?* Obtenido de <http://xn--drmstrre-64ad.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/es/pictures/eighties.htm>
- De Angelis, M., Fantacci, R., Menci, S., & Rinaldi., C. (2005). Analysis of Air Traffic Control Systems Interference Impact On Galileo Aeronautics Receivers. *IEEE International Radar Conference, 2005*, págs. 585-595. Recuperado el 04 de junio de 2020, de <<https://ieeexplore.ieee.org/Xplore/home.jsp>>
- de la Vega, D., Guerra, D., Angulo, I., & Wu, Y. (2011). Software tool for the analysis of potential impact of wind farms on radiocommunication services. *IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB)*, p. 1-5. doi:10.1109/BMSB.2011.5954959
- de la Vega, D., Matthews, J., Norin, L., & Angulo, I. (2013). Mitigation Techniques to Reduce the Impact of Wind Turbines. *Energies*(6), 2859-2873. Recuperado el 22 de julio de 2020, de <<https://www.mdpi.com/journal/energies>>
- Departamento de Física de la Tierra y Astrofísica de la Facultad de Físicas de la Universidad Complutense de Madrid. (s.f.). *Proyecto de Mejora de la Calidad Docente*. Recuperado el 22 de Noviembre de 2019, de Taller Virtual de Meteorología y Clima: <http://meteolab.fis.ucm.es/>
- Dirección General de Aeronáutica Civil. (2005). *DAR 14 - Reglamento de aeródromos* (Segunda ed.). Chile. Recuperado el 30 de julio de 2020.
- EUROCONTROL. (2014). *EUROCONTROL Guidelines for assessing the potential impact of wind turbines on Surveillance sensors* (1.2 ed.). Recuperado el 02 de julio de 2020
- European Union Aviation Safety Agency . (2019). *Regulation (EU) 2018/1139*. Unión Europea. Recuperado el 20 de agosto de 2020, de https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy_Access_Rules_for_the_Basic_Regulation.pdf
- European Union Aviation Safety Agency. (2019). *Regulation (EU) 139/2014*. Unión Europea. Recuperado el 20 de agosto de 2020, de https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/Easy_Access_Rules_for_Aerodromes-May2019_0.pdf
- FAA. (2015). *Advisory Circular 70/7460-1L* (Vol. L). Washington, DC, Estados Unidos. Recuperado el 20 de Agosto de 2020.
- FAA. (s.f.). *Title 14: "Aeronautics and Space" Part 77 "Safe, efficient use and preservation of the navigable airspace"*. Estados Unidos. Recuperado el 20 de Agosto de 2020, de <https://www.ecfr.gov/cgi-bin/text-id?SID=dde2d8fe882b562ce64c1f61fb04a541&mc=true&node=pt14.2.77&rgn=div5>
- Fenés, G. (22 de julio de 2020). El listado completo de los proyectos de energías renovables en construcción en Chile. *Energía Estratégica*. Recuperado el 04 de noviembre de 2020, de

<https://www.energiaestrategica.com/el-listado-completo-de-los-proyectos-de-energias-renovables-en-construccion-en-chile/>

- Full Afterburner: Choudhari, P., Karthikeyan, V., & Madhavan, A. (2017). *Electronic Warfare - Radar signal characteristics*. Obtenido de Full Afterburner:
<http://fullafterburner.weebly.com/next-gen-weapons/electronic-warfare-radar-signal-characteristics>
- Generadoras de Chile. (2020). *Tipos de energías*. Recuperado el 29 de Junio de 2020, de Generadoras de Chile: <http://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>
- Global Wind Energy Council. (2019). *Global Wind Report 2019*. Reporte, Bruselas, Bélgica. Recuperado el 31 de Mayo de 2020, de www.gwec.net
- Henrich, K. (20 de mayo de 2019). Germany introduces obligation to install Need-controlled nighttime identification of wind turbines. *Mondaq*. Recuperado el 25 de agosto de 2020, de <https://www.mondaq.com/germany/aviation/806638/germany-introduces-obligation-to-install-need-controlled-nighttime-identification-of-wind-turbines>
- Indra Company. (2009). *Primary Surveillance Radar*. Brochure. Obtenido de https://www.indracompany.com/sites/default/files/12_psr_brochure_v1_02-2009_eng.pdf
- Infraestructura de Datos Geoespaciales. (s.f.). *Geoportal de Chile: Visor de Mapas*. Recuperado el 18 de Agosto de 2019, de <http://www.ide.cl/>
- Jackson, C. A. (04 de abril de 2013). *Wind farms and radars living together?* Recuperado el 21 de julio de 2020, de International Airport Review:
<https://www.internationalairportreview.com/article/12201/wind-farms-and-radars-living-together/>
- Lazcano, P. (02 de Mayo de 2018). Chile ya tiene 651 torres eólicas. *La Tercera*. Recuperado el 18 de Agosto de 2019, de <https://www.latercera.com/tendencias/noticia/chile-ya-651-torres-eolicas/150492/>
- Lemmon, J. J., Carroll, J. E., Sanders, F. H., & Turner, D. (2008). *Assessment of the effects of wind turbines on Air Traffic Control Radars*. Estados Unidos: NTIA Technical Report TR-08-454. Recuperado el 03 de julio de 2020.
- Ministerio de Energía. (24 de Octubre de 2017). *Los 10 Parques Eólicos más grandes de Chile*. Recuperado el 30 de Junio de 2019, de Ministerio de Energía:
<http://www.energia.gob.cl/tema-de-interes/los-10-parques-eolicos-mas-grandes>
- Ministerio del Medio Ambiente. (2014). *Decreto 40 | Aprueba reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental*. Santiago, Chile.
- Ministerio Secretaría General de la Presidencia. (2020). *Ley 19.300 Sobre bases generales del medio ambiente*. Santiago, Chile.
- Monterrosa Pasten, J. (2018). *Segunda Evaluación Eólicos Pichilingue*. Evaluación, Valdivia. Recuperado el 29 de agosto de 2020.

- Novák, A. (2009). *Wind farms and Aviation*. 4 pág. Recuperado el 15 de julio de 2020, de Research Gate
https://www.researchgate.net/publication/232836720_Wind_farms_and_aviation
- OACI [1]. (2014). *AIR TRAFFIC MANAGEMENT: Guía de la Vigilancia Global*. Recuperado el 12 de Mayo de 2020, de
<https://www.icao.int/NACC/Documents/Meetings/2014/ADSBIMP/ADSBIMPP12SP.pdf>
- OACI. (2011). *Doc 9924 - Aeronautical Surveillance Manual* (Primera ed.). Montréal, Quebec, Canadá.
- OACI. (2014). *Anexo 10, Telecomunicaciones aeronáuticas* (Vol. IV). Montréal, Quebec, Canadá.
- OACI. (2014). *Doc 8168 - Aircraft Operations* (Sexta ed., Vol. II). Recuperado el 10 de septiembre de 2020.
- OACI. (2016). *Anexo 14, Aeródromos - Diseño y operaciones de aeródromos* (Séptima ed., Vol. I). Montréal, Quebec, Canadá.
- Paydar, M. (Agosto de 2010). *SSR Mode S Coordination Issues*. Presentación Ppt. Recuperado el 29 de junio de 2020, de
https://www.icao.int/WACAF/Documents/Meetings/2011/asi_ws/pp1_ssr_modes_coordination.pdf
- Pierrot, M. (Noviembre de 2018). *The Wind Power*. Recuperado el 18 de Agosto de 2019, de
https://www.thewindpower.net/windfarms_list_es.php
- Poupart, G. J. (2003). *Wind farms impact on radar aviation interests - Final report*. Preparado por QinetiQ para Department of Trade and Industry (DTI).
- Radartutorial. (s.f.). *Radar Basics*. (C. Wolff, Editor) Recuperado el junio de 2020, de
<https://www.radartutorial.eu/index.en.html>
- Remcom Software. (2013). *Wind turbines and aircraft in the presence of ground clutter*. Recuperado el 15 de julio de 2020, de Youtube:
https://www.youtube.com/watch?time_continue=33&v=HeY_18FqqpM&feature=emb_logo
- Revista Electricidad. (2019). El salto de las energías renovables en Chile bate todos los récords proyectados. *Electricidad*. Recuperado el 30 de junio de 2020, de
<https://www.revistaei.cl/2019/11/29/el-salto-de-las-energias-renovables-en-chile-bate-todos-los-records-proyectados/#>
- Santana O., C. (2014). *Energías Renovables en Chile, el potencial eólico, solar e hidroeléctrico de Arica a Chiloé*. Ministerio de Agricultura. Santiago, Chile: Proyecto Estrategia de Expansión de las Energías Renovables en los Sistemas Eléctricos Interconectados (MINENERGIA / GIZ). Recuperado el 17 de Agosto de 2019
- Skolnik, M. I. (1990). *Radar Handbook* (Segunda ed.). Estados Unidos: McGraw-Hill.



- Skybrary. (diciembre de 2019). *Primary Surveillance Radar (PSR)*. Obtenido de [https://www.skybrary.aero/index.php/Primary_Surveillance_Radar_\(PSR\)](https://www.skybrary.aero/index.php/Primary_Surveillance_Radar_(PSR))
- Stevens, M. C. (Febrero de 1981). Multipath and interference effects in Secondary Surveillance Radar systems. *IEE Proceedings F - Communications, Radar and Signal Processing*, Vol. 128(no. 1), p. 43 - 53. doi:10.1049/ip-f-1.1981.0007.
- Theil, A., & van Ewijk, L. J. (2007). Radar Performance Degradation due to the Presence of Wind Turbines. *2007 IEEE Radar Conference*, 6 p. Recuperado el 26 de julio de 2020, de <<https://ieeexplore-ieee-org.usm.idm.oclc.org/document/4250288>>
- U.S. Department of Energy's Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. (s.f.). *The Inside of a Wind Turbine*. Obtenido de <https://www.energy.gov/eere/wind/inside-wind-turbine>
- Vinkx, K. (21 de Octubre de 2018). *"Obstacle limitation around airports; Why so restrictive?"*. Recuperado el 12 de Agosto de 2019, de to70: <https://to70.com/obstacle-limitation-around-airports-why-so-restrictive/>
- Wang, W.-Q. (05 de dic de 2013). Detecting and Mitigating Wind Turbine Clutter for Airspace Radar Systems. *The Scientific World Journal*, 8 p. Recuperado el 12 de junio de 2020, de <<https://www.hindawi.com/journals/tswj/2013/385182/#background-and-motivation>>
- Wind Energy Technologies Office. (2020). *Wind Project Development - Radar Interference*. Recuperado el 23 de Agosto de 2020., de Wind Energy Technologies Office Web Site: <https://windexchange.energy.gov/projects/radar-interference-review-process>

6 ANEXO

6.1 AEROGENERADORES

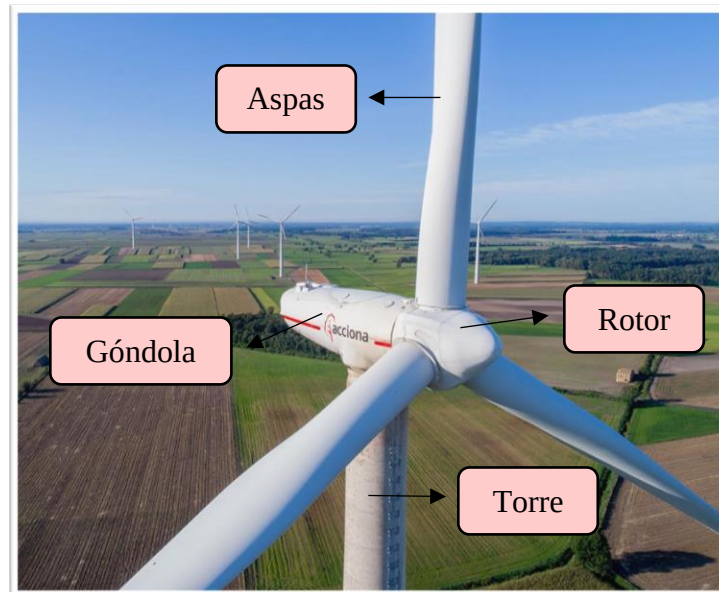
Los aerogeneradores o turbinas eólicas son elementos de gran tamaño capaces de transformar la energía cinética de las masas de aire en energía mecánica a través del movimiento de sus aspas, para finalmente transformarla en energía eléctrica. La velocidad de giro del rotor está entre 3 - 20 revoluciones por minuto (rpm) (Acciona, 2020), sin embargo, la cantidad de revoluciones va a depender de la tecnología con la que ha sido construida, la velocidad del viento de la zona donde este ubicado y el material del que estén hechas sus aspas. Existen 2 grandes categorías de aerogeneradores de acuerdo con la orientación de su eje, éstas son:

- VAWT (Vertical Axis Wind Turbine): En esta categoría, el eje del rotor es perpendicular a la dirección del viento.
- HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine): Para esta categoría, el rotor del eje se posiciona de manera horizontal con la dirección que lleva el viento. Pueden tener una, dos, tres o múltiples aspas.

Las ventajas que presentan las turbinas de la familia VAWT son que el aerogenerador no necesariamente debe ser ubicado en la dirección predominante del viento y que pueden operar en condiciones de bajas velocidades de viento (Cifuentes, octubre de 2013).

Por otro lado, las turbinas de la familia HAWT con 3 aspas son las que se encuentran más presentes en proyectos eólicos instalados en el mundo y en Chile, esto debido a que presentan un mayor desempeño, confiabilidad y rendimiento, además, de mayor estabilidad aerodinámica (Cifuentes, octubre de 2013). Las partes principales de un aerogenerador con eje horizontal son: la torre, la góndola y el rotor. A continuación, se muestra un aerogenerador de los descritos:

Figura 6-1: Partes de una turbina eólica HAWT.



Fuente: Adaptado de Acciona.

La torre sostiene toda la estructura del aerogenerador y es la que permite obtener una elevación pertinente del rotor para que las aspas capturen el viento a mayor velocidad y menos turbulento, logrando generar mayor electricidad. En ella se encuentra el sistema de *yaw*, el cual permite la rotación de la góndola para que en todo momento el rotor esté enfrentado al viento para maximizar el área efectiva de éste y así obtener mayor producción de energía.

El rotor, el cual está formado por las 3 aspas y el buje (elemento donde se ensamblan las aspas) y se encuentra unido al eje de baja velocidad que se encuentra dentro de la góndola. El rotor debe ser diseñado lo más inflexible posible y estar a una distancia suficiente para evitar los choques de las aspas con la torre. Las aspas poseen un diseño similar a las alas de un avión que le permite generar sustentado aerodinámico y mantenerse en rotación cuando una masa de aire pasa a través de ellas. Comienzan a rotar con una velocidad del viento aproximada de 3,5 [m/s] llegando a proveer el máximo de energía cuando el viento tiene una velocidad aproximada de 11[m/s]. Con fuertes vientos, una velocidad aproximada de 25[m/s], el sistema *pitch* de la turbina pondrá las aspas en una posición llamada “*feathered*”, en la cual el paso de viento a través de las aspas es casi total,

permitiendo que éstas se detengan y no giren a una velocidad que puede producir alzas de voltaje (Acciona, 2020).

Por último, está la góndola, la cual se ubica en la cima de la torre y es la que alberga el generador, el sistema *pitch*, los ejes de alta y baja velocidad, la caja de cambios, entre otros elementos. Esta sección se mueve para posicionar las aspas en la dirección del viento y lo hace mediante el sistema *yaw*, el cual toma la información que recibe la vela de viento -localizada en la parte exterior de la góndola. Junto a la vela se encuentra el anemómetro, dispositivo que le entrega la componente de velocidad al sistema *pitch*. Este sistema es el que permite que las aspas giren sobre su eje longitudinal y cambien su ángulo de ataque frente al viento. Este sistema se alimenta de la información que recibe del anemómetro respecto de la velocidad del viento y dependiendo de ésta cambiará el ángulo de ataque para evitar velocidades de giro altas.

Con el viento pasando a través de las aspas, el rotor comienza a girar debido al sustento aerodinámico de sus aspas, lo que a su vez hace rotar el eje de baja velocidad. Este eje se encuentra conectado a la caja de cambios, la cual incrementa la velocidad de giro, para la producción de energía eléctrica, y la transfiere al eje de alta velocidad. Este último gira a 1.500 revoluciones por minuto y hace rotar el generador, produciendo así electricidad. La corriente continua producida es transformada en corriente alterna a un voltaje y frecuencia correcta para ser usada.

La componente de velocidad de objetos que se encuentran en movimiento dentro del horizonte del radar (LoS, line of sight en inglés) van a provocar un cambio en la frecuencia de la onda, lo que se conoce como Efecto Doppler (Butler & Johnson, 2003). El movimiento *yaw* es lento y no contaste por lo que no es un componente que por sí solo genere un cambio grande en la frecuencia de la señal reflejada al radar, lo mismo ocurre con el movimiento *pitch*. Únicamente, las aspas giratorias de la turbina provocarán un cambio importante de la frecuencia a cualquier señal que se refleje en ellas. La velocidad de las aspas puede variar desde casi 0 m/s cercano al rotor hasta una velocidad entre 50 – 75 m/s en las puntas (Butler & Johnson, 2003); (Wang, 2013), velocidad que califica dentro de los rangos del Indicador de Objetivo en Movimiento (MTI por su nombre en

inglés) para que las turbinas eólicas sean detectadas como objetos no estacionarios y mostrados a los operadores de tráfico en las pantallas.

No basta con la componente de velocidad del aerogenerador para considerar que sea detectado por el radar, también se debe tener en cuenta la medida de cuán detectable es un objeto por un radar, conocida como Radar Cross Section (RCS). El RCS de una turbina depende del material de fabricación y forma, además de la posición respecto a un radar (yaw) y de las aspas. A pesar de que la turbina tiene una parte estacionaria, la torre, ésta puede ser discriminada por el MTI, pero si el RCS es lo suficientemente alto, este objeto no deseado aparecerá en la pantalla PPI (Poupart, 2003).

Todos los objetos tienen diferente RCS dependiendo principalmente de su tamaño, forma y material del cual están fabricados. Una turbina eólica es más visible a un radar que una aeronave, ya que puede alcanzar un RCS entre 40 – 60 dBsm equivalente a 10.000 – 1.000.000 m^2 , mientras que un avión jumbo tiene un RCS entre 10 – 20 dBsm igual a 10 – 100 m^2 (OACI, 2011).

6.2 SUPERFICIES LIMITADORAS DE OBSTÁCULOS

Figura 6-2: Dimensiones y pendientes de las superficies limitadoras de obstáculos – Pistas para aproximaciones.

PISTAS PARA APROXIMACIONES										
Superficies y dimensiones ^a (1)	CLASIFICACIÓN DE LAS PISTAS									
	Aproximación visual Número de clave				Aproximación que no sea de precisión Número de clave			Aproximación de precisión		
	1 (2)	2 (3)	3 (4)	4 (5)	1,2 (6)	3 (7)	4 (8)	Categoría I Número de clave 1,2 (9)	Categoría II o III Número de clave 3,4 (10)	Categoría II o III Número de clave 3,4 (11)
CÓNICA										
Pendiente	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%	5%
Altura	35 m	55 m	75 m	100 m	60 m	75 m	100 m	60 m	100 m	100 m
HORIZONTAL INTERNA										
Altura	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m	45 m
Radio	2 000 m	2 500 m	4 000 m	4 000 m	3 500 m	4 000 m	4 000 m	3 500 m	4 000 m	4 000 m
APROXIMACIÓN INTERNA										
Anchura	—	—	—	—	—	—	—	90 m	120 m ^c	120 m ^c
Distancia desde el umbral	—	—	—	—	—	—	—	60 m	60 m	60 m
Longitud	—	—	—	—	—	—	—	900 m	900 m	900 m
Pendiente	—	—	—	—	—	—	—	2,5%	2%	2%
APROXIMACIÓN										
Longitud del borde interior	60 m	80 m	150 m	150 m	150 m	300 m	300 m	150 m	300 m	300 m
Distancia desde el umbral	30 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m	60 m
Divergencia (a cada lado)	10%	10%	10%	10%	15%	15%	15%	15%	15%	15%
Primera sección										
Longitud	1 600 m	2 500 m	3 000 m	3 000 m	2 500 m	3 000 m	3 000 m	3 000 m	3 000 m	3 000 m
Pendiente	5%	4%	3,33%	2,5%	3,33%	2%	2%	2,5%	2%	2%
Segunda sección										
Longitud	—	—	—	—	—	3 600 m ^b	3 600 m ^b	12 000 m	3 600 m ^b	3 600 m ^b
Pendiente	—	—	—	—	—	2,5%	2,5%	3%	2,5%	2,5%
Sección horizontal										
Longitud	—	—	—	—	—	8 400 m ^b	8 400 m ^b	—	8 400 m ^b	8 400 m ^b
Longitud total	—	—	—	—	—	15 000 m	15 000 m	15 000 m	15 000 m	15 000 m
DE TRANSICIÓN										
Pendiente	20%	20%	14,3%	14,3%	20%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%	14,3%
DE TRANSICIÓN INTERNA										
Pendiente	—	—	—	—	—	—	—	40%	33,3%	33,3%
SUPERFICIE DE ATERRIZAJE INTERRUMPIDO										
Longitud del borde interior	—	—	—	—	—	—	—	90 m ^c	120 m ^c	120 m ^c
Distancia desde el umbral	—	—	—	—	—	—	—	—	1 800 m ^d	1 800 m ^d
Divergencia (a cada lado)	—	—	—	—	—	—	—	10%	10%	10%
Pendiente	—	—	—	—	—	—	—	4%	3,33%	3,33%

a. Salvo que se indique de otro modo, todas las dimensiones se miden horizontalmente.

b. Longitud variable (véase 4.2.9 ó 4.2.17).

c. Distancia hasta el extremo de la franja.

d. O distancia hasta el extremo de pista, si esta distancia es menor.

e. Cuando la letra de clave sea F [Columna 3) de la Tabla 1-1], la anchura se aumenta a 155 m. Véase la Circular 301 *Nuevos aviones de mayor tamaño — Transgresión de la zona despejada de obstáculos: medidas operacionales y estudio aeronáutico*, para obtener información sobre los aviones de letra de clave F equipados con aviónica digital para ofrecer mandos de dirección para mantener una ruta establecida durante una maniobra de "motor y al aire".

Fuente: Anexo 14 – Aeródromos.

6.3 REFLEXIONES MULTI TRAYECTO EN UN RADAR PSR

Como se menciona en el capítulo **Reportes de objetivos falsos debido a reflexión indirecta** y en el documento “How to assess the potential impact of Wind turbines in Surveillance sensors” elaborado por EUROCONTROL se han propuesto 4 escenarios diferentes de reflexiones indirectas que pueden dar origen a reportes falsos en el radar PSR, los que involucran al radar PSR, turbina eólica (WT) y la aeronave (A/C). A continuación, se detallan las ecuaciones que permiten determinar (1) la ubicación de la aeronave para dar lugar a reflexiones y (2) donde se ubica el reporte correspondiente al objetivo falso.

Antes de ello, se muestra el significado de cada símbolo utilizado en las ecuaciones:

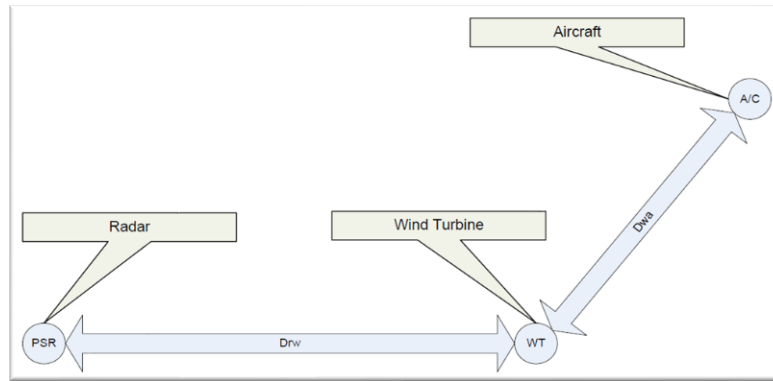
- P_{ref} es la potencia de la señal reflejada que llega al radar [W];
- P_t es la potencia transmitida por el radar [W];
- U_{det} corresponde el umbral de detección [W];
- G_t es la ganancia transmitida por la antena;
- G_r es la ganancia recibida por la antena a través del lóbulo principal;
- G_{rs} es la ganancia recibida por la antena a través de los lóbulos laterales;
- D_{rw} es la distancia entre el radar y la turbina [m];
- D_{wa} es la distancia entre la turbina y la aeronave [m];
- D_{ra} es la distancia entre el radar y la aeronave [m];
- λ es la longitud de onda del radar [m];
- σ_a es el RCS mono-estático de la aeronave [m^2];
- σ_w es el RCS mono-estático de la turbina [m^2];
- σ_{a1} es el RCS bi-estático de la aeronave desde el radar a la turbina [m^2];
- σ_{a2} es el RCS bi-estático de la aeronave desde la turbina al radar [m^2];
- σ_{w1} es el RCS bi-estático de la turbina desde el radar a la aeronave [m^2];
- σ_{w2} es el RCS bi-estático de la turbina desde la aeronave al radar [m^2];
- F_{rw} es el factor de atenuación inducida por el terreno entre el radar y la turbina;
- F_{wa} es el factor de atenuación inducida por el terreno entre la turbina y aeronave;

- F_{ra} es el factor de atenuación inducida por el terreno entre el radar y la aeronave.

➤ Caso 1

En este caso y el siguiente, la turbina es la que se encuentra en las cercanías del radar y la aeronave está más alejada, su esquema es el siguiente:

Figura 6-3: Esquema reflexión caso 1.



Fuente: EUROCONTROL.

En este caso, la reflexión del objeto falso se localiza en el rumbo de la turbina eólica y la señal reflejada por la aeronave llega al radar por el lóbulo principal de radiación de la antena. Además, la potencia de la señal reflejada de retorno al radar viene dada por:

$$P_{ref} = \frac{\sigma_a \sigma_{w1} \sigma_{w2} F_{rw}^2 F_{wa}^2 G_t P_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^5 D_{rw}^4 D_{wa}^4} \quad (7)$$

Comparando esta potencia con el umbral de detección (U_{det}) del receptor del radar se puede obtener la distancia entre la turbina y aeronave que cause la reflexión,

$$D_{wa} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_a \sigma_{w1} \sigma_{w2} F_{rw}^2 F_{wa}^2 G_t P_t G_r \lambda^2}{(4\pi)^5 D_{rw}^4 U_{det}}} \quad (8)$$

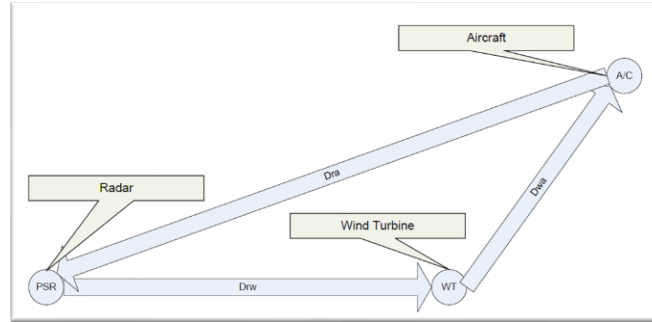
y la estimación de dicha distancia en el peor de los casos puede ser calculada asumiendo $F_{rw} = F_{wa} = 1$, $G_t = G_r = G$ y $\sigma_{w1} = \sigma_{w2} = \sigma_w$:

$$D_{wa} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_a \sigma_w^2 G^2 P_t \lambda^2}{(4\pi)^5 D_{rw}^4 U_{det}}} \quad (9)$$

➤ Caso 2

Este escenario se muestra a continuación:

Figura 6-4: Esquema reflexión caso 2.



Fuente: EUROCONTROL.

Al igual que el caso anterior la reflexión (reporte falso) se localiza en el rumbo de la turbina eólica, pero la señal reflejada en la aeronave se recibe por los lóbulos laterales de la antena. En este caso la potencia reflejada de regreso al radar es igual a:

$$P_{ref} = \frac{\sigma_{a2} \sigma_{w1} F_{rw} F_{wa} F_{ra} G_t P_t G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^4 D_{rw}^2 D_{wa}^2 D_{ra}^2} \quad (10)$$

Comparando esta potencia con el umbral de detección (U_{det}) del receptor del radar se puede obtener la distancia entre la turbina y aeronave que causa la reflexión,

$$D_{wa} = \sqrt[2]{\frac{\sigma_{a2} \sigma_{w1} F_{rw} F_{wa} F_{ra} G_t P_t G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^4 D_{rw}^2 D_{ra}^2 U_{det}}} \quad (11)$$

y la estimación de dicha distancia en el peor de los casos puede ser calculada asumiendo

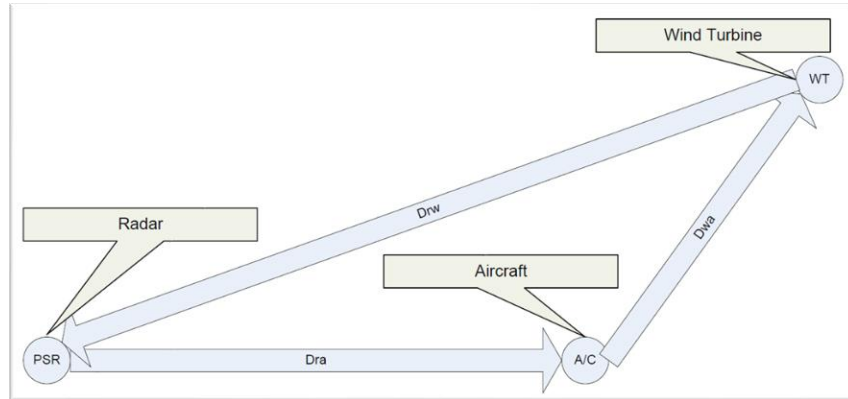
$$F_{rw} = F_{wa} = F_{ra} = 1, \sigma_{a2} = \sigma_a \text{ y } \sigma_{w1} = \sigma_w:$$

$$D_{wa} = \sqrt[2]{\frac{\sigma_a \sigma_w G_t P_t G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^4 D_{rw}^2 D_{ra}^2 U_{det}}} \quad (12)$$

➤ Caso 3

En este caso y el siguiente es la aeronave la que se encuentra en las cercanías del radar y la turbina está más alejada. El escenario se muestra a continuación:

Figura 6-5: Esquema reflexión caso 3.



Fuente: EUROCONTROL.

En este caso, la reflexión (reporte falso) se localiza en el rumbo de la aeronave y la señal reflejada se recibe a través de los lóbulos laterales de la antena. En este caso la potencia reflejada de regreso al radar es igual a:

$$P_{ref} = \frac{\sigma_{a1} \sigma_{w2} F_{ra} F_{wa} F_{rw} G_t P_t G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^4 D_{ra}^2 D_{wa}^2 D_{rw}^2} \quad (13)$$

Comparando esta potencia con el umbral de detección (U_{det}) del receptor del radar se puede obtener la distancia entre la turbina y aeronave que causa la reflexión,

$$D_{wa} = \sqrt[2]{\frac{\sigma_{a1} \sigma_{w2} F_{ra} F_{wa} F_{rw} G_t P_t G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^4 D_{ra}^2 D_{rw}^2 U_{det}}} \quad (14)$$

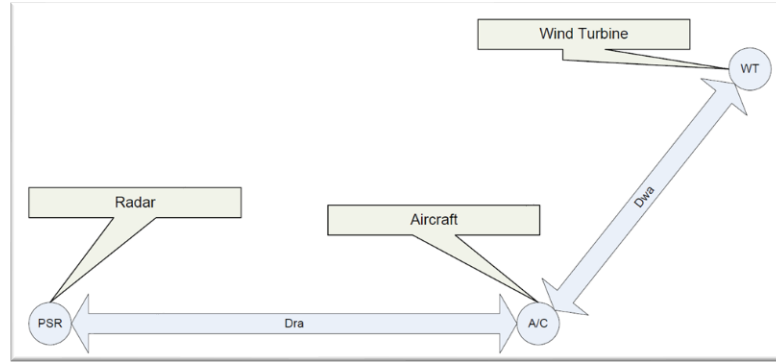
y la estimación de dicha distancia en el peor de los casos puede ser calculada asumiendo $F_{ra} = F_{wa} = F_{wr} = 1$, $\sigma_{a1} = \sigma_a$ y $\sigma_{w2} = \sigma_w$:

$$D_{wa} = \sqrt[2]{\frac{\sigma_a \sigma_w G_t P_t G_{rs} \lambda^2}{(4\pi)^4 D_{ra}^2 D_{rw}^2 U_{det}}} \quad (15)$$

➤ **Caso 4**

Este escenario se muestra a continuación:

Figura 6-6: Esquema reflexión caso 4.



Fuente: EUROCONTROL.

En este caso, la reflexión se localiza en el rumbo de la aeronave y la señal reflejada de vuelta al radar se recibe por el lóbulo principal de la antena. En este caso la potencia reflejada de regreso al radar es igual a:

$$P_{ref} = \frac{\sigma_{a1}\sigma_w\sigma_{a2}F_{ra}^2F_{wa}^2G_tP_tG_r\lambda^2}{(4\pi)^5D_{ra}^4D_{wa}^4} \quad (16)$$

Comparando esta potencia con el umbral de detección (U_{det}) del receptor del radar se puede obtener la distancia entre la turbina y aeronave que cause la reflexión,

$$D_{wa} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_{a1}\sigma_{w1}\sigma_{a2}F_{ra}^2F_{wa}^2G_tP_tG_r\lambda^2}{(4\pi)^5D_{ra}^4U_{det}}} \quad (17)$$

y la estimación de dicha distancia en el peor de los casos puede ser calculada asumiendo $F_{ra} = F_{wa} = 1$, $G_t = G_r = G$ y $\sigma_{a1} = \sigma_{a2} = \sigma_a$:

$$D_{wa} = \sqrt[4]{\frac{\sigma_w\sigma_a^2G^2P_t\lambda^2}{(4\pi)^5D_{ra}^4U_{det}}} \quad (18)$$

6.4 DIMENSIONES DE LA SOMBRA DE TURBINAS EÓLICAS

La región sombreada que queda oculta detrás de la turbina al lóbulo principal del radar cuando éste está transmitiendo señal en su dirección tiene una forma en tres dimensiones -largo, ancho y elevación- y para conocer cada una de ellas se hace necesario conocer la

geometría de la distribución entre el radar, la turbina, y el objeto de interés que se encuentre dentro de la región, además, de las dimensiones del radar y turbina.

La longitud de esta región en el caso del radar PSR se considera que se extiende hasta el máximo rango donde puede ser detectada la aeronave, es decir, el rango máximo del radar (EUROCONTROL, 2014). Mientras que en el radar SSR la extensión de la región SOMBREADA aparece en EUROCONTROL y está dada por la fórmula siguiente:

$$L_{sombra} [m] = \frac{D_{rt}}{\frac{D_{rt} * \lambda}{S^2} (1 - \sqrt{PL})^2 - 1} \quad (19)$$

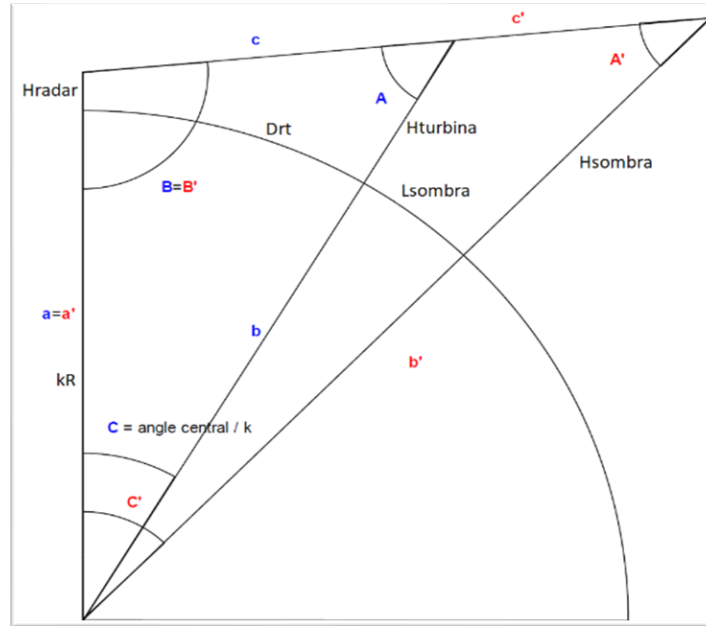
Donde:

- L_{sombra} es la distancia de la sombra detrás de la turbina.
- D_{rt} es la distancia entre el radar y la turbina.
- S es el diámetro más grande de la torre de la turbina.
- λ es la longitud de onda del radar SSR.
- PL es la pérdida de poder del radar en la región sombreada.

Entonces, asumiendo que una pérdida de potencia (PL) de 3 dB es tolerable para un SSR, el diámetro máximo de la torre de la turbina es 6 m y teniendo en consideración una $D_{rt} \geq 16$ km, se tiene que la máxima extensión de la sombra provocada por la turbina es igual a 1.600 m (EUROCONTROL, 2014).

En cuanto a la elevación de la sombra (H_{sombra}), ésta se determina aplicando ecuaciones matemáticas a la distribución entre radar y turbina que se muestra a continuación:

Figura 6-7: Geometría de ubicación del radar y la turbina.



Fuente: EUROCONTROL.

Las ecuaciones mencionadas son las siguientes, donde k es equivalente a $4/3$ y R es el radio de la tierra:

$$a = k * R + H_{\text{radar}}$$

$$b = k * R + H_{\text{turbina}}$$

$$c = \sqrt{a^2 + b^2 - 2 * a * b * \cos(C)}$$

$$B = \frac{\text{Arccos}(a^2 - b^2 + c^2)}{2 * a * c}$$

$$C = \frac{D_{rt}}{k * R}$$

$$C' = \frac{D_{rt} + L_{\text{sombra}}}{k * R}$$

$$B' = B$$

$$A' = \pi - B' - C'$$

$$b' = \frac{a' * \text{sen}(B')}{\text{sen}(A')}$$

Entonces, la altitud de la sombra viene dada por:

$$H_{\text{sombra}} = b' - k * R \quad (20)$$

Por último, el ancho de la región varía a medida que la longitud de la sombra, L_{sombra} , se va haciendo más grande y depende de la longitud de onda (λ) en la que esté operando el radar. La siguiente ecuación se utiliza para determinar la mitad del ancho (a_{sombra}) que alcanza la sombra a cierta longitud, pero si se quiere conocer la mitad del ancho máximo (a_{max}) se utiliza $L_{sombra-máx}$ de la sombra.

$$a_{sombra} = \sqrt{\left(\frac{\lambda}{2} + L_{sombra}\right)^2 - L_{sombra}^2} \quad (21)$$

6.5 SOLICITUD CERTIFICADO DE ALTURA

Figura 6-8: Solicitud para obtener Certificado de alturas.

		SOLICITUD PARA CERTIFICAR ALTURAS DE CONSTRUCCIONES, TENDIDOS ELÉCTRICOS, CHIMENAS U OTRAS ESTRUCTURAS		Código: R-FAPA-007 Edición: 6.0 Vigencia: 15 MAY. 2020 Página 1 de 1	
FECHA SOLICITUD				N° REGISTRO	
INDICAR CON UNA (X) EL PROYECTO A REALIZAR					
CONSTRUCCION		TENDIDO ELÉCTRICO		EOLICO	
GRUA		OTROS (INDICAR)		CHIMENEA	
ANTECEDENTES EMPRESA SOLICITANTE					
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL					
DIRECCIÓN COMERCIAL					
R.U.T.			TELÉFONO /CELULAR		
COMUNA			PROVINCIA		
REGIÓN					
CORREO ELECTRÓNICO					
ANTECEDENTES DEL PROYECTO					
ALTURA A CERTIFICAR					
ELEVACIÓN (METROS SOBRE NIVEL DEL MAR)					
COORDENADAS GEOGRÁFICAS (DATUM WGS-84)		LATITUD			
		LONGITUD			
DIRECCIÓN (UBICACIÓN)					
COMUNA			PROVINCIA		
REGIÓN					
ANTECEDENTES EMPRESA GESTORA (SI CORRESPONDE)					
NOMBRE O RAZÓN SOCIAL					
DIRECCIÓN COMERCIAL					
R.U.T.			TELÉFONO /CELULAR		
COMUNA			PROVINCIA		
REGIÓN					
CORREO ELECTRÓNICO					
USO INTERNO SECCIÓN FISCALIZACIÓN DE AERÓDROMOS Y PROYECTOS AERONÁUTICOS					
FECHA RECEPCIÓN SOLICITUD					
FECHA RECEPCIÓN PLANOS					
FECHA CANCELACIÓN				N° RECIBO	
FECHA ENTREGA DE CERTIFICADO					
RESPONSABLE DEL ESTUDIO TÉCNICO					
NOMBRE Y FIRMA RECEPTOR NOMBRE Y FIRMA SOLICITANTE					
NOTAS: 1.- Los Tendidos Eléctrico y Proyectos Eólicos, deben adjuntar Especificaciones Técnicas, que contengan las coordenadas geográficas, más un archivo kmz del proyecto. 2.- Ubicación de documentación exigida y trámite pertinente: a) Tendido Eléctrico: https://www.dgac.gob.cl/certificaciones/certificado-altura-tendido-electrico/Edificaciones b) Edificaciones: https://www.dgac.gob.cl/certificaciones/certificado-edificaciones-cercanas/ 3.- El valor de este certificado es el indicado en el Reglamento de Tasas y derechos Aeronáuticos, tarifario Nacional (DAR-50), reajutable trimestralmente según IPC: https://www.dgac.gob.cl/wp-content/uploads/2020/04/TARIFARIO_2TR-2020.pdf					

Fuente: DGAC.

6.6 FORMULARIO FAA 7460-1

Figura 6-9: Formulario FAA 7460-1.

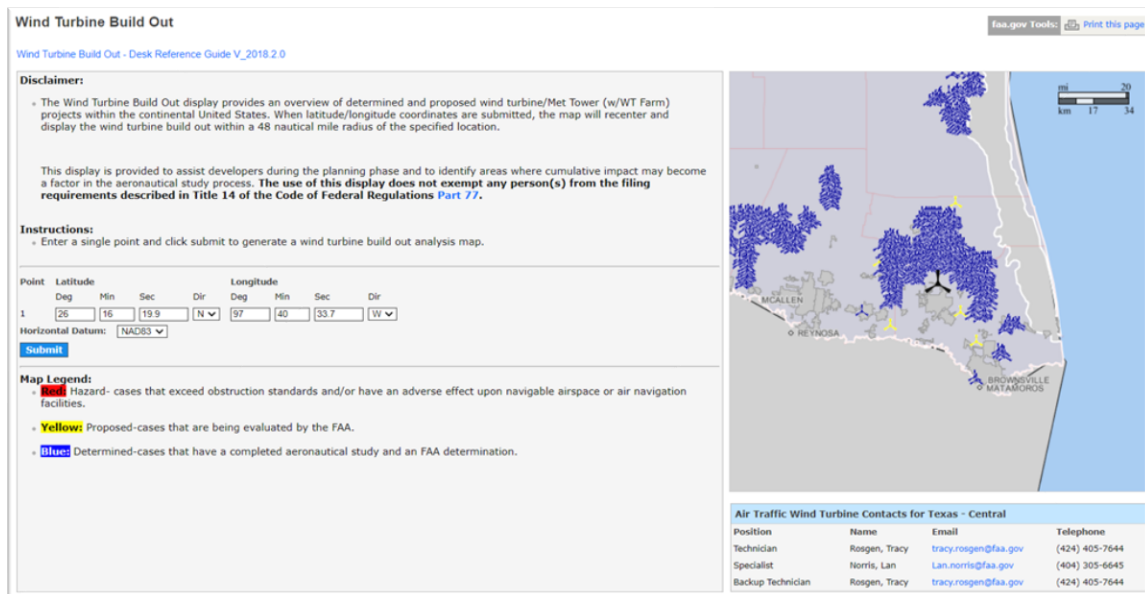
[illegible]

Fuente: FAA.

6.7 HERRAMIENTAS DE EVALUACIÓN DE OBSTRUCCIÓN

Las herramientas que dispone la FAA en su sitio web para la evaluación de obstrucción generadas por las turbinas eólicas previo a la notificación de ellas a la FAA y el resultado de éstas se muestran a continuación:

Figura 6-10: : Herramienta Wind Turbine Build Out.



Wind Turbine Build Out

Wind Turbine Build Out - Desk Reference Guide V_2018.2.0

Disclaimer:

- The Wind Turbine Build Out display provides an overview of determined and proposed wind turbine/Met Tower (w/WT Farm) projects within the continental United States. When latitude/longitude coordinates are submitted, the map will recenter and display the wind turbine build out within a 48 nautical mile radius of the specified location.

This display is provided to assist developers during the planning phase and to identify areas where cumulative impact may become a factor in the aeronautical study process. **The use of this display does not exempt any person(s) from the filing requirements described in Title 14 of the Code of Federal Regulations Part 77.**

Instructions:

- Enter a single point and click submit to generate a wind turbine build out analysis map.

Point

Point	Latitude				Dir	Longitude				Dir
	Deg	Min	Sec			Deg	Min	Sec		
1	26	16	19.9	N		97	40	33.7	W	

Horizontal Datum: NAD83

Submit

Map Legend:

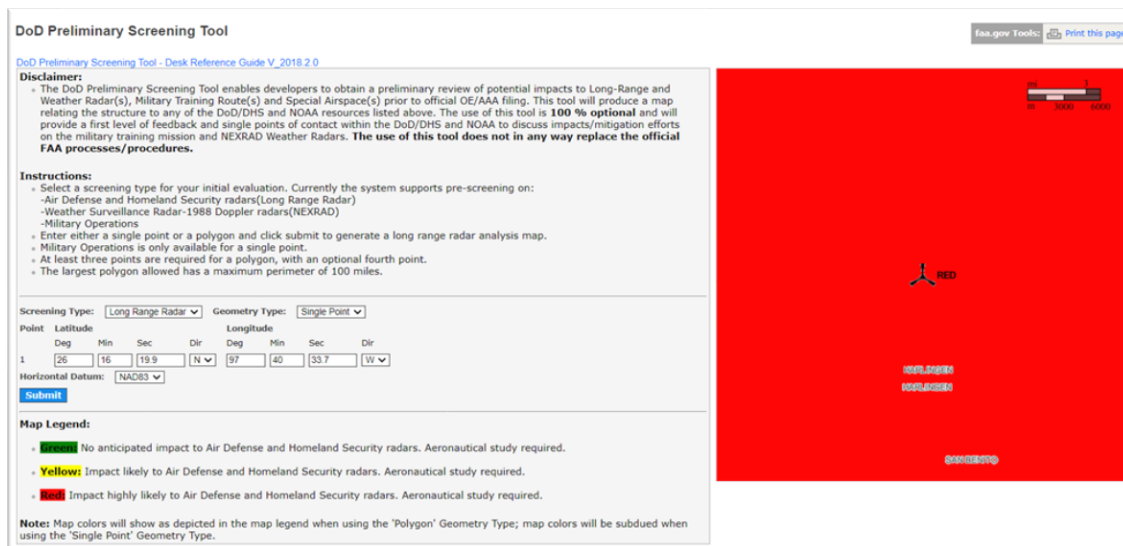
- Red** Hazard- cases that exceed obstruction standards and/or have an adverse effect upon navigable airspace or air navigation facilities.
- Yellow** Proposed-cases that are being evaluated by the FAA.
- Blue** Determined-cases that have a completed aeronautical study and an FAA determination.

Air Traffic Wind Turbine Contacts for Texas - Central

Position	Name	Email	Telephone
Technician	Rosen, Tracy	tracy.rosen@faa.gov	(424) 405-7644
Specialist	Norris, Lan	lan.norris@faa.gov	(404) 305-6645
Backup Technician	Rosen, Tracy	tracy.rosen@faa.gov	(424) 405-7644

Fuente: FAA.

Figura 6-11: Herramienta DoD Preliminary Screening Tool.



DoD Preliminary Screening Tool

DoD Preliminary Screening Tool - Desk Reference Guide V_2018.2.0

Disclaimer:

- The DoD Preliminary Screening Tool enables developers to obtain a preliminary review of potential impacts to Long-Range and Weather Radar(s), Military Training Route(s) and Special Airspace(s) prior to official OE/AAA filing. This tool will produce a map relating the structure to any of the DoD/DHS and NOAA resources listed above. The use of this tool is **100 % optional** and will provide a first level of feedback and single points of contact within the DoD/DHS and NOAA to discuss impacts/mitigation efforts on the military training mission and NEXRAD Weather Radars. **The use of this tool does not in any way replace the official FAA processes/procedures.**

Instructions:

- Select a screening type for your initial evaluation. Currently the system supports pre-screening on:
 - Air Defense and Homeland Security radars(Long Range Radar)
 - Weather Surveillance Radar-1988 Doppler radars(NEXRAD)
 - Military Operations
- Enter either a single point or a polygon and click submit to generate a long range radar analysis map.
- Military Operations is only available for a single point.
- At least three points are required for a polygon, with an optional fourth point.
- The largest polygon allowed has a maximum perimeter of 100 miles.

Screening Type: Long Range Radar **Geometry Type:** Single Point

Point

Point	Latitude				Dir	Longitude				Dir
	Deg	Min	Sec			Deg	Min	Sec		
1	26	16	19.9	N		97	40	33.7	W	

Horizontal Datum: NAD83

Submit

Map Legend:

- Green** No anticipated impact to Air Defense and Homeland Security radars. Aeronautical study required.
- Yellow** Impact likely to Air Defense and Homeland Security radars. Aeronautical study required.
- Red** Impact highly likely to Air Defense and Homeland Security radars. Aeronautical study required.

Note: Map colors will show as depicted in the map legend when using the 'Polygon' Geometry Type; map colors will be subdued when using the 'Single Point' Geometry Type.

Fuente: FAA.

Figura 6-12: Herramienta Notice Criteria Tool.

Notice Criteria Tool

Notice Criteria Tool - Desk Reference Guide V_2018.2.0

The requirements for filing with the Federal Aviation Administration for proposed structures vary based on a number of factors: height, proximity to an airport, location, and frequencies emitted from the structure, etc. For more details, please reference [CFR Title 14 Part 77.9](#).

You must file with the FAA at least 45 days prior to construction if:

- your structure will exceed 200ft above ground level
- your structure will be in proximity to an airport and will exceed the slope ratio
- your structure involves construction of a traverseway (i.e. highway, railroad, waterway etc...) and once adjusted upward with the appropriate vertical distance would exceed a standard of 77.9(a) or (b)
- your structure will emit frequencies, and does not meet the conditions of the [FAA Co-location Policy](#)
- your structure will be in an instrument approach area and might exceed part 77 Subpart C
- your proposed structure will be in proximity to a navigation facility and may impact the assurance of navigation signal reception
- your structure will be on an airport or heliport
- filing has been requested by the FAA

If you require additional information regarding the filing requirements for your structure, please identify and contact the appropriate FAA representative using the [Air Traffic Areas of Responsibility map](#) for Off Airport construction, or contact the [FAA Airports Region / District Office](#) for On Airport construction.

The tool below will assist in applying Part 77 Notice Criteria.

Latitude: 26 Deg 16 M 19.9 S [N ▼]
Longitude: 97 Deg 40 M 33.7 S [W ▼]
Horizontal Datum: NAD83
Site Elevation (SE): 60 (nearest foot)
Structure Height: 608 (nearest foot)
Traverseway: No Traverseway
(Additional height is added to certain structures under 77.9(c))
User can increase the default height adjustment for Traverseway, Private Roadway and Waterway
Is structure on airport: ☒ No ☐ Yes
[Submit](#)

Results

You exceed the following Notice Criteria:

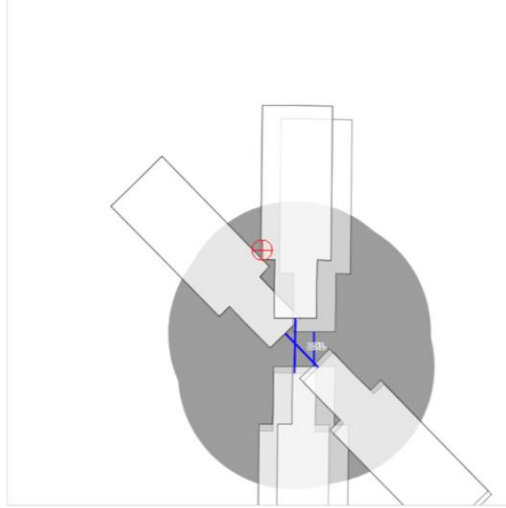
Your proposed structure exceeds an instrument approach area by 534 feet and aeronautical study is needed to determine if it will exceed a standard of subpart C of 14CFR Part 77. The FAA, in accordance with 77.9, requests that you file.

Your proposed structure is in proximity to a navigation facility and may impact the assurance of navigation signal reception. The FAA, in accordance with 77.9, requests that you file:

77.9(a) by 408 ft.

77.9(b) by 506 ft. The nearest airport is HRL, and the nearest runway is 17R/35L.

The FAA requests that you file



Fuente: FAA.

6.8 PRONUNCIAMIENTO AL ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL

Cuando el SEA recibe la declaración o estudio de impacto ambiental de algún proyecto eólico ubicado en las cercanías de un aeródromo, este organismo le remite la información a la DGAC para que ésta lo revise y estudie, y luego emita un pronunciamiento para que el titular del proyecto eólico tenga en consideración los aspectos obligatorios establecidos por la DGAC que ha de cumplir y los que ella estima oportuno, pero que son más pertinencias que una obligación porque no tener competencias en ello. El pronunciamiento realizado en el caso del proyecto eólico Pichilingue fue el siguiente:

Figura 6-13: Pronunciamento de la DGAC ante el EIA del proyecto.

 DIRECCIÓN GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL
DEPARTAMENTO PLANIFICACIÓN

OF. (O) N° 04/11/1998-1 9099/1

OBJ : Remite pronunciamiento a Estudio de Impacto Ambiental del proyecto "Parque Eólico Pichilingue".

REF : OF. ORD. N° 181586 de fecha 09.NOV.2018.

SANTIAGO, 13 DIC. 2018

DE : DIRECTOR GENERAL DE AERONÁUTICA CIVIL

PARA : DIRECTOR EJECUTIVO DEL SERVICIO DE EVALUACIÓN AMBIENTAL

En atención al documento de la referencia, informo a Ud., que se ha revisado el Estudio de Impacto Ambiental del proyecto "Parque Eólico Pichilingue", presentado por el Sr. Jorge Andrés Tadeo Calderón, en representación de PICHILINGUE S.p.A.

De la revisión del citado documento, se puede señalar que el proyecto se encuentra próximo al Aeródromo Pichoy y existe vulneración de los procedimientos publicados de aproximación y llegada de dicho aeródromo, por lo que este órgano de administración del Estado informa al Titular del proyecto lo siguiente:

- El proyecto afecta áreas críticas de protección de los procedimientos instrumentales actualmente publicados, por lo que se estima pertinente que los aerogeneradores sean instalados en terrenos no mayores a 730 msnm de elevación. De lo anterior, se solicita al titular informar con anterioridad la fecha de inicio de las obras.

Por otra parte, de acuerdo a lo señalado en el artículo N°26 de la Ley N°18.916, la Autoridad Aeronáutica ordena el señalamiento y balizaje de todos los objetos que puedan constituir un peligro para la navegación aérea, y al artículo N°7.1.10 del D.S. N°0173/2004, DAR 14, donde se indica que las líneas eléctricas elevadas y sus torres de sostén deberán señalarse e iluminarse si un estudio aeronáutico lo indica.

En relación a las construcciones y conforme a lo señalado en el artículo N°5 de la Ley N°16.752, y en el artículo N°8.4.1.3 punto n°6 de la Ordenanza Plan Regulador Metropolitano de Santiago, que indica que las construcciones e instalaciones en la zona de aproximación de los aeródromos públicos y en los terrenos circundantes a las instalaciones de ayuda y protección a la navegación aérea, requerirán siempre la autorización previa de la Dirección General de Aeronáutica Civil. Lo anterior deberá ser solicitado por el Titular del Proyecto, con el fin de que la DGAC certifique las alturas de la construcción.

Finalmente, según lo señalado, el titular deberá remitir los antecedentes con el fin de que esta DGAC certifique las alturas de construcción y realice el estudio de la línea eléctrica.

Saluda a Ud.,



Fuente: DGAC.

6.9 PARQUE EÓLICO PICHILINGUE, VALDIVIA

Este parque eólico se localiza en la ciudad de Valdivia cercano al aeródromo Pichoy, estando las turbinas ubicadas desde 13 NM del ARP de dicho aeródromo en el eje central de la pista 17. Consta de 38 aerogeneradores, siendo su ubicación exacta la siguiente:

Tabla 12: Ubicación de las turbinas en el parque eólico Pichilingue.

Turbina	Latitud	Longitud	Turbina	Latitud	Longitud
1	39°20'02.36"S	73°01'54.41"W	20	39°23'24.62"S	73°05'20.12"W
2	39°20'13.43"S	73°02'12.10"W	21	39°23'39.52"S	73°05'46.80"W
3	39°20'15.21"S	73°02'29.39"W	22	39°23'37.59"S	73°05'28.08"W
4	39°20'23.55"S	73°02'50.58"W	23	39°23'49.42"S	73°05'58.82"W
5	39°20'34.31"S	73°03'01.81"W	24	39°24'02.24"S	73°06'05.12"W
6	39°20'47.04"S	73°03'08.56"W	25	39°25'43.17"S	73°06'07.15"W
7	39°20'54.82"S	73°03'17.74"W	26	39°22'36.46"S	73°04'13.93"W
8	39°21'03.02"S	73°03'25.29"W	27	39°22'56.74"S	73°04'19.77"W
9	39°21'10.39"S	73°03'35.40"W	28	39°22'21.86"S	73°03'55.42"W
10	39°21'18.83"S	73°03'41.98"W	29	39°23'33.13"S	73°04'04.56"W
11	39°21'28.94"S	73°03'52.65"W	30	39°23'32.24"S	73°03'18.56"W
12	39°21'34.54"S	73°04'13.55"W	31	39°23'45.31"S	73°03'24.17"W
13	39°21'45.96"S	73°04'19.96"W	32	39°24'02.78"S	73°03'00.48"W
14	39°21'58.37"S	73°04'32.79"W	33	39°21'08.52"S	73°05'45.51"W
15	39°22'10.41"S	73°04'45.24"W	34	39°21'07.43"S	73°06'34.33"W
16	39°22'19.40"S	73°01'54.41"W	35	39°21'18.14"S	73°06'48.71"W
17	39°22'51.85"S	73°04'51.92"W	36	39°21'45.20"S	73°08'11.80"W
18	39°23'02.75"S	73°04'59.73"W	37	39°21'49.30"S	73°08'38.60"W
19	39°23'16.44"S	73°05'07.92"W	38	39°21'38.82"S	73°08'38.54"W

Fuente: Elaboración propia.