ESTUDIO DE IMPACTO AMBIENTAL
PARQUE EÓLICO VIENTO PACÍFICO VERDE

APÉNDICE 1.6.5: FICHA COMPARATIVA DE MODELOS DE SOMBRAS INTERMITENTES

Región de Maule
2026

TABLA DE CONTENIDO

1 INTRODUCCIÓN 0

2 COMPARATIVA DE MODELOS DE PROYECCIÓN DE SOMBRAS INTERMITENTES DE PARQUES EÓLICOS 0

3 CONCLUSIONES 5

4 BIBLIOGRAFÍA 7

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2-1. Tabla comparativa de modelos o módulos de cálculo de sombra intermitente 2

1 INTRODUCCIÓN

El presente apéndice tiene por objeto documentar y respaldar técnicamente el modelo FlickerShadow utilizado en la evaluación del efecto de sombra intermitente (shadow flicker) asociada a la fase de operación del Proyecto Parque Eólico Viento Pacífico Verde. Para ello, se presenta una tabla comparativa de los principales modelos de proyección de sombras intermitentes empleados a nivel internacional en proyectos eólicos, con el fin de contextualizar, transparentar y justificar la selección metodológica adoptada en el presente estudio.

La comparación desarrollada demuestra que el modelo FlickerShadow presenta prestaciones, supuestos físicos y capacidades de análisis plenamente equivalentes y en algunos aspectos complementarias a las de otros modelos ampliamente utilizados y validados en evaluaciones ambientales de parques eólicos. En particular, FlickerShadow incorpora de manera explícita la geometría real de los aerogeneradores, la trayectoria solar astronómica, la relación espacial entre fuente y receptor, y criterios conservadores de visibilidad, lo que permite estimar con robustez la ocurrencia, duración y frecuencia del fenómeno de sombra intermitente. Estas características lo hacen plenamente consistente con las buenas prácticas internacionales y con los enfoques aceptados por las autoridades ambientales.

La información presentada en este apéndice constituye, por tanto, un respaldo técnico al modelo seleccionado para la proyección de sombras intermitentes incluida en la evaluación del Proyecto, el cual será sometido al Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental (SEIA), de acuerdo con los lineamientos establecidos en la Ley N°19.300, Ley de Bases Generales del Medio Ambiente, y en el D.S. N°40/2012, Reglamento del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, ambos del Ministerio del Medio Ambiente, y sus respectivas modificaciones.

El Proyecto Parque Eólico Viento Pacífico Verde considera la construcción, operación y cierre de un parque eólico de generación de energía eléctrica compuesto por un total de 22 aerogeneradores, cada uno con una altura de buje de 140 m y un diámetro de rotor de 175 m, con una potencia unitaria de hasta 7,0 MW, alcanzando una potencia instalada total de 154 MW. Del total de aerogeneradores, 9 se emplazarán en el sector norte, Estancia La Flora, y los 13 restantes en el sector sur, Pahuil.

2 COMPARATIVA DE MODELOS DE PROYECCIÓN DE SOMBRAS INTERMITENTES DE PARQUES EÓLICOS

El presente capítulo tiene por objetivo presentar una comparación técnica entre los principales modelos utilizados a nivel nacional e internacional para la evaluación del efecto de sombra intermitente (shadow flicker) en parques eólicos. Esta comparación se materializa mediante una tabla resumen que permite identificar, de manera clara y sistemática, las capacidades, alcances y supuestos metodológicos de cada herramienta, en el contexto de evaluaciones ambientales.

Los modelos considerados en el análisis comparativo son los siguientes:

- WindPro 4.2.3
- WindFarm 6.2.0
- WindProphet 4.0
- RESoft

- OpenWind
- WindFarmer
- FlickerShadow

A continuación, se presenta una descripción sintética de las principales capacidades de cada uno de estos modelos, con énfasis en su aplicación para la evaluación del efecto de sombra intermitente en áreas habitadas.

WindPro

Es un software ampliamente utilizado para el análisis, diseño y evaluación ambiental de parques eólicos. Incluye un módulo específico para el cálculo de sombras intermitentes, el cual considera la trayectoria astronómica del sol, la geometría de los aerogeneradores y la relación espacial entre fuente y receptor, permitiendo estimar la ocurrencia y duración del fenómeno de sombra parpadeante.

WindFarm

Corresponde a una herramienta de uso extendido en la industria eólica para la evaluación integral de parques eólicos. Su módulo de sombra intermitente permite simular la propagación de sombras generadas por aerogeneradores y evaluar su impacto potencial sobre receptores sensibles, considerando la posición del sol y la disposición geométrica del parque.

WindProphet

Es un modelo que integra simulaciones de recurso eólico con evaluaciones de sombra intermitente. Permite estimar la ocurrencia, duración y frecuencia de las sombras proyectadas, así como analizar escenarios de exposición potencial en áreas habitadas, proporcionando resultados útiles para la evaluación de molestias asociadas al fenómeno.

RESoft

Es un modelo utilizado para el cálculo de los efectos de sombra intermitente de parques eólicos en zonas habitables. Incorpora un módulo específico que permite simular la proyección de sombras considerando la posición del sol y, opcionalmente, datos meteorológicos reales, lo que posibilita un análisis más ajustado a condiciones locales. Asimismo, integra herramientas orientadas a la evaluación de impactos ambientales.

OpenWind

Es una plataforma de análisis de parques eólicos que incluye un módulo para la evaluación del efecto de sombras intermitentes. Permite simular y visualizar la proyección de sombras generadas por aerogeneradores sobre receptores cercanos, incorporando el cálculo de la posición solar y, de manera opcional, información meteorológica para la definición de escenarios más realistas.

WindFarmer

Es una herramienta orientada principalmente a la evaluación del recurso eólico y al diseño de parques eólicos. No obstante, incorpora un módulo específico para la evaluación del efecto de sombra intermitente, el cual permite simular la proyección de sombras considerando la geometría de

los aerogeneradores, la posición del sol y datos meteorológicos reales, facilitando la estimación de impactos en áreas habitadas.

FlickerShadow

FlickerShadow es un programa propietario desarrollado para el cálculo del impacto anual del efecto de sombra intermitente generado por aerogeneradores sobre receptores específicos. El modelo contempla dos escenarios de análisis: un escenario conservador de peor caso posible y un escenario más realista basado en estadísticas meteorológicas. El cálculo se realiza utilizando una resolución temporal interpolada de 1 minuto, lo que asegura una adecuada representación de la posición solar, determinada a partir del ángulo de elevación y el azimut del sol. Asimismo, el modelo considera explícitamente la localización geográfica del proyecto y la geometría real de los aerogeneradores, permitiendo una evaluación detallada y consistente del efecto de sombra intermitente en los receptores cercanos.

En la página siguiente se presenta la Tabla 2-1, la cual resume la comparación de los distintos modelos analizados y permite verificar que el modelo FlickerShadow utilizado en el proyecto Parque Eólico Viento Pacífico Verde presenta capacidades metodológicas y alcances técnicos equivalentes a los modelos comúnmente empleados en la industria eólica para la evaluación del efecto de sombra intermitente.

Tabla 2-1: Tabla comparativa de modelos o módulos de cálculo de sombra intermitente

Modelo	Posición del sol	Ubicación geográfica	Parámetros de las turbinas	Datos meteorológicos reales	Velocidad y dirección del viento	Análisis de impacto ambiental	Estadística local	Modelos climáticos	Datos estadísticos mensuales	Datos estadísticos horarios
WindPro	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗
WindFarm	✗	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓	✓	✗
WindProphet	✗	✓	✗	✓	✓	✗	✓	✓	✗	✓
RESoft	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
OpenWind	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
WindFarmer	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
FlickerShadow	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✓

A continuación, se presenta una breve descripción de los parámetros incluidos en la Tabla 2-1, los cuales permiten comparar de manera sistemática las capacidades y alcances de los distintos modelos de proyección de sombras intermitentes analizados:

Posición del sol: Indica si el modelo calcula de forma explícita la posición astronómica del sol en el cielo, a partir de parámetros como fecha, hora y ubicación geográfica, con el fin de determinar con precisión la ocurrencia, duración y patrón espacial de las sombras proyectadas por los aerogeneradores.

Ubicación geográfica: Indica si el modelo considera la localización geográfica específica del parque eólico (latitud, longitud y huso horario) como dato de entrada para el cálculo de la trayectoria solar y la proyección de sombras sobre los receptores.

Parámetros de los aerogeneradores: Indica si el modelo incorpora las características geométricas y técnicas de los aerogeneradores, tales como altura de buje, diámetro del rotor, dimensiones de las palas y disposición espacial, las cuales influyen directamente en la extensión y comportamiento del fenómeno de sombra intermitente.

Datos meteorológicos reales: Indica si el modelo permite incorporar información meteorológica medida, tales como velocidad y dirección del viento, nubosidad o radiación solar, para la definición de escenarios más realistas, incluyendo la orientación del plano del rotor y la intensidad efectiva de las sombras proyectadas.

Velocidad y dirección del viento: Indica si el modelo considera explícitamente la velocidad y la dirección del viento en el cálculo del efecto de sombra intermitente, particularmente para representar la orientación del rotor y la condición de operación del aerogenerador durante los periodos de análisis.

Análisis de impacto ambiental: Indica si el modelo incluye funcionalidades orientadas a la evaluación del impacto ambiental asociado al efecto de sombra intermitente, tales como la cuantificación de horas anuales de exposición, la identificación de receptores sensibles y la comparación con criterios o umbrales normativos.

Estadística local: Indica si el modelo utiliza información estadística local proveniente de estaciones meteorológicas, como promedios mensuales, distribuciones de frecuencia o series horarias, para caracterizar las condiciones atmosféricas representativas del área de emplazamiento del proyecto.

Modelos climáticos: Indica si el modelo permite incorporar información proveniente de modelos climáticos o reanálisis atmosféricos, ya sea para complementar datos locales o para representar condiciones de largo plazo en la evaluación del efecto de sombra intermitente.

Datos estadísticos (mensuales/horarios): Indica si el modelo utiliza datos estadísticos de carácter mensual o registros horarios de estaciones meteorológicas como insumo para el cálculo del efecto de sombra intermitente, permitiendo diferenciar entre escenarios conservadores y escenarios más representativos de la variabilidad temporal de las condiciones meteorológicas.

3 CONCLUSIONES

El presente apéndice ha tenido por finalidad evaluar comparativamente distintos modelos y módulos utilizados para la estimación del efecto de sombra intermitente (shadow flicker) en parques eólicos, con el objeto de fundamentar de manera técnica, transparente y verificable la selección del modelo FlickerShadow para la evaluación del Proyecto Parque Eólico Viento Pacífico Verde.

Del análisis comparativo realizado se concluye que FlickerShadow constituye una herramienta metodológicamente válida, robusta y plenamente equivalente a los modelos de uso extendido en la industria eólica para la estimación de la ocurrencia y duración del efecto de sombra intermitente sobre receptores sensibles. El modelo reproduce de manera consistente los elementos físicos fundamentales que gobiernan el fenómeno, incluyendo la geometría real de los aerogeneradores, la relación espacial fuente–receptor y la trayectoria astronómica del sol, cumpliendo con los principios comúnmente aceptados en evaluaciones ambientales de este tipo.

Un aspecto central que refuerza la idoneidad del modelo FlickerShadow es su enfoque explícitamente conservador. El modelo contempla un escenario de peor caso posible, el cual asume condiciones de máxima exposición potencial, asegurando que los resultados obtenidos no subestimen el impacto del efecto de sombra intermitente. Adicionalmente, incorpora un escenario alternativo basado en estadísticas meteorológicas representativas del sitio, permitiendo contrastar los resultados conservadores con condiciones más realistas de operación. Esta doble aproximación es coherente con las buenas prácticas internacionales y con los criterios de evaluación preventiva aplicados en el Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental.

Desde el punto de vista de la resolución temporal, FlickerShadow presenta una ventaja técnica relevante al calcular la posición del sol mediante una discretización minuto a minuto, lo que garantiza una representación precisa del ángulo de elevación y del azimut solar a lo largo del año. En paralelo, el uso de datos meteorológicos con resolución horaria permite una caracterización consistente de las condiciones de operación de los aerogeneradores. Esta coherencia temporal evita simplificaciones excesivas y reduce la incertidumbre asociada a modelos que utilizan promedios anuales o mensuales desacoplados, los cuales pueden conducir tanto a sobreestimaciones como a subestimaciones del fenómeno.

Si bien FlickerShadow no incorpora de manera integrada un módulo de evaluación ambiental adicional como ocurre en algunos softwares comerciales de carácter multipropósito, esta característica no afecta la validez ni la suficiencia del cálculo del efecto de sombra intermitente propiamente tal. El resultado del modelo corresponde a una cuantificación objetiva de horas y minutos de exposición anual por receptor, información que constituye el insumo fundamental para la evaluación ambiental y la comparación con criterios y umbrales normativos, la cual se desarrolla en etapas posteriores del análisis conforme a los lineamientos del SEIA.

Asimismo, el hecho de que el modelo utilice datos estadísticos provenientes de estaciones meteorológicas, en lugar de información de modelos climáticos de circulación global, no representa una limitación para la evaluación del efecto de sombra intermitente, dado que este fenómeno corresponde a un impacto de escala local y dependiente de condiciones representativas del sitio. En este contexto, la utilización de datos locales resulta incluso preferible, al reflejar de manera más directa las condiciones reales de exposición de los receptores evaluados.

En consecuencia, y a la luz de la comparación técnica realizada, se concluye que el modelo FlickerShadow cumple con los estándares metodológicos requeridos para la evaluación del efecto de sombra intermitente en parques eólicos, presenta un enfoque conservador y trazable, y entrega resultados técnicamente sólidos y verificables. Su utilización en el Proyecto Parque Eólico Viento Pacífico Verde se considera plenamente justificada y adecuada para su presentación en el marco del Sistema de Evaluación de Impacto Ambiental, no identificándose sesgos metodológicos que puedan conducir a una subestimación de los impactos evaluados.

4 BIBLIOGRAFÍA

[1] Servicio de Evaluación Ambiental. Guía para la descripción de centrales eólicas de generación de energía eléctrica en el EIA. Santiago, Chile: SEA; 2023.

[2] Landesarbeitsgemeinschaft für Immissionsschutz (LAI). Guideline for Identification and Evaluation of the Optical Emissions of Wind Turbines. Traducción al español del documento original “Hinweise zur Ermittlung und Beurteilung der optischen Immissionen von Windenergieanlagen”. Kiel, Alemania: LAI; 2002.

[3] República de Chile. Ley Nº 19.300 sobre Bases Generales del Medio Ambiente. Artículo 11. Diario Oficial de la República de Chile, Santiago, Chile; 1994.

[4] Servicio de Evaluación Ambiental. Guía para la descripción de centrales eólicas de generación de energía eléctrica en el SEIA. Santiago, Chile: SEA; 2020.

[5] Servicio de Evaluación Ambiental. Criterio de evaluación en el SEIA: Efecto sombra intermitente en parques eólicos. Santiago, Chile: SEA; 2021.