

# Tabla de Contenido

<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Antecedentes generales . . . . .	1
1.2. Motivación . . . . .	2
1.3. Objetivos . . . . .	2
1.3.1. Objetivo Principal . . . . .	2
1.3.2. Objetivos Específicos . . . . .	2
1.4. Alcances . . . . .	3
<b>2. Antecedentes</b>	<b>5</b>
2.1. Radiación Solar . . . . .	5
2.1.1. Geometría Solar y componentes de la radiación . . . . .	7
2.1.2. Efecto del vapor de agua en la radiación solar . . . . .	9
2.1.3. Detección de cielos despejados. . . . .	10
2.2. Aerosoles . . . . .	12
2.2.1. Efecto de los aerosoles en la radiación solar . . . . .	12
2.2.2. Efecto de los aerosoles en cielos despejados . . . . .	15
2.2.3. Aerosoles en Santiago . . . . .	16
2.3. Energía solar y sistemas de generación . . . . .	18
2.3.1. Celdas fotovoltaicas . . . . .	19
2.3.2. Tipos de celdas fotovoltaicas . . . . .	22

2.3.3.	Efecto de las variables meteorológicas en sistemas fotovoltaicos . . . . .	24
2.3.4.	Efecto de los aerosoles en los sistemas de generación solar . . . . .	27
<b>3.</b>	<b>Datos y Metodología</b>	<b>29</b>
3.1.	Radiación y variables meteorológicas . . . . .	29
3.2.	AOD, coeficiente de Ångström y vapor de agua . . . . .	30
3.3.	Módulos fotovoltaicos . . . . .	32
3.4.	Metodología . . . . .	34
3.4.1.	Radiación y espesor óptico de aerosoles . . . . .	34
3.4.2.	Producción fotovoltaica y espesor óptico de aerosoles . . . . .	35
<b>4.</b>	<b>Resultados</b>	<b>39</b>
4.1.	Efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación . . . . .	39
4.1.1.	Parametrización para la irradiancia global horizontal . . . . .	43
4.1.2.	Parametrización para la irradiancia directa normal . . . . .	44
4.1.3.	Parametrización para la irradiancia difusa horizontal . . . . .	45
4.2.	Efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica con tecnologías convencionales. . . . .	53
4.3.	Efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica con módulos CPV. . . . .	59
<b>5.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>63</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>67</b>
	<b>Anexos</b>	<b>70</b>

# Índice de Tablas

2.1. Composición de aerosol simple en la ciudad de Santiago. . . . .	17
2.2. Energía de banda de gap para distintos semiconductores. . . . .	20
3.1. Especificaciones de las 3 tecnologías fotovoltaicas usadas en el estudio. . . . .	33
3.2. Características del módulo CPV escogido para simular. . . . .	33
3.3. Coeficientes térmicos y espectrales para el módulo CPV escogido. . . . .	33
4.1. Coeficientes para calcular $GHI_o$ . . . . .	43
4.2. Coeficientes para calcular $GHI_m$ . . . . .	43
4.3. Coeficientes para calcular $DNI_o$ . . . . .	44
4.4. Coeficientes para calcular $DNI_m$ . . . . .	44
4.5. Coeficientes para calcular $DHI_o$ . . . . .	45
4.6. Coeficientes para calcular $DHI_m$ . . . . .	45
4.7. Irradiancia promedio mensual y anual bajo condición de cielo despejado para GHI, DNI y DHI, junto a la fracción de la componente difusa horizontal sobre la global horizontal, entre las 10AM y 4PM hora local en Santiago para un caso calculado con aerosoles y un caso sin aerosoles entre los años 2014-2015. . . . .	52
4.8. Producción fotovoltaica mensual calculada para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles en condición de cielo despejado para el rango horario comprendido entre las 10AM y las 4PM durante los años 2014-2015 en Santiago. La potencia se calculó en base a un coeficiente de performance corregido del 75 %. . . . .	59
4.9. Producción mensual y anual estimada de un panel CPV entre las 11AM y las 3PM bajo condición de cielo despejado en Santiago para los años 2014-2015 . . . . .	61



# Índice de Ilustraciones

2.1. Espectro radiativo solar en el tope de la atmósfera, a nivel del mar e irradiancia calculada según la ley de Planck . . . . .	5
2.2. Distribución de las componentes directa, difusa y absorbida de la radiación solar. . . . .	6
2.3. Descripción gráfica de los distintos ángulos solares respecto a un observador. .	7
2.4. Modelos para estimar la radiación difusa en superficies inclinadas. . . . .	9
2.5. Efecto del vapor de agua en el espectro radiativo solar incidente. . . . .	10
2.6. Diferencia entre mediciones con y sin el filtro de cielos despejados entre los días 1 de Enero y 3 de Enero del 2014 . . . . .	12
2.7. Atenuación de la radiación directa en su paso por un medio homogéneo. . . .	13
2.8. Irradiancia global espectral al variar el parámetro $\beta$ . . . . .	14
2.9. Irradiancia global espectral al variar el parámetro $\alpha$ . . . . .	14
2.10. Altura promedio de capa de mezcla en Santiago entre los años 2007 y 2013 a las 12PM. . . . .	17
2.11. Episodio de contaminación en Santiago . . . . .	18
2.12. Esquemático de un dispositivo fotovoltaico . . . . .	19
2.13. Eficiencia máxima teórica de un semiconductor . . . . .	20
2.14. Curva I-V característica de una celda solar. . . . .	21
2.15. Efecto de la temperatura y la radiación en la curva I-V de un dispositivo fotovoltaico. . . . .	21
2.16. Celdas de Silicio . . . . .	23
2.17. Respuesta espectral de distintos tipos de celdas fotovoltaicas convencionales .	23

2.18. Respuesta espectral de una celda multi-junction. . . . .	24
2.19. Esquema de concentrador solar. . . . .	24
3.1. Ubicación y foto en la terraza de Geofísica de la Universidad de Chile del fotómetro CIMEL . . . . .	30
3.2. Concentración anual de material particulado en Santiago en las estaciones de Parque O'Higgins y La Florida durante los años 2014-2015. . . . .	31
3.3. Diferencia entre la concentración horaria de material particulado en Santiago entre las estaciones de Parque O'Higgins y La Florida durante el año 2015. . . . .	32
3.4. Planta fotovoltaica del Campus San Joaquín de la Universidad Católica . . . . .	32
3.5. Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en las distintas componentes de la radiación. . . . .	37
3.6. Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica de celdas convencionales. . . . .	38
3.7. Metodología utilizada para estudiar el efecto de los aerosoles en la producción fotovoltaica simulada de módulo CPV. . . . .	38
4.1. AOD versus irradiancia global horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos . . . . .	39
4.2. AOD versus irradiancia directa normal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos . . . . .	40
4.3. AOD versus irradiancia difusa horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos . . . . .	40
4.4. AOD versus fracción de la componente difusa horizontal sobre la componente global horizontal en Santiago para nueve ángulos cenitales distintos . . . . .	41
4.5. AOD versus irradiancia global horizontal en Santiago para nueve distintos ángulos cenitales. La barra de colores representa la cantidad de vapor de agua en la columna en cm . . . . .	42
4.6. Parametrización de la irradiancia global horizontal en función de AOD y el vapor de agua. . . . .	44
4.7. Parametrización de la irradiancia directa normal en función de AOD y el vapor de agua. . . . .	45
4.8. Parametrización de la irradiancia difusa horizontal en función de AOD y el vapor de agua. . . . .	46

4.9. Componentes de la radiación versus AOD en cinco ángulos cenit distintos, con vapor de agua constante . . . . .	47
4.10. Medias mensuales de la radiación obtenida, la radiación parametrizada y la radiación en un caso sin aerosoles para las tres componentes en Santiago . . . . .	48
4.11. Medias mensuales para la fracción entre la irradiancia medida y la estimada para un caso sin aerosoles para cielos despejados. . . . .	49
4.12. Medias mensuales de AOD500 y de fracción de DHI sobre GHI . . . . .	50
4.13. Medias mensuales de vapor de agua y coeficiente de Ångström . . . . .	50
4.14. Irradiancia mensual promedio calculada para un caso con aerosoles y sin aerosoles para las tres componentes para cielos despejados en Santiago entre los años 2014 y 2015. . . . .	51
4.15. Irradiancia global en plano inclinado versus espesor óptico de aerosoles bajo condición de cielo despejado para seis ángulos de incidencia. . . . .	53
4.16. Potencia fotovoltaica de las tres tecnologías estudiadas versus espesor óptico de aerosoles para tres ángulos de incidencia en condiciones de cielo despejado. . . . .	54
4.17. Potencia fotovoltaica de las tres tecnologías estudiadas versus espesor óptico de aerosoles bajo condición de cielo despejado para tres ángulos de incidencia junto al coeficiente de performance corregido. . . . .	54
4.18. Efecto de los aerosoles en las distintas tecnologías para 3 ángulos de incidencia, filtrado en base a la mediana del coeficiente del performance. . . . .	55
4.19. Potencia normalizada versus fracción de la componente difusa sobre la componente global en plano inclinado para las tres tecnologías y tres ángulos de incidencia, filtradas en función del coeficiente de performance y el vapor de agua. . . . .	56
4.20. Potencia fotovoltaica mensual promedio para el caso medido, obtenido mediante las parametrizaciones y estimado para un caso sin aerosoles para las distintas tecnologías en Santiago. . . . .	57
4.21. Potencia fotovoltaica mensual promedio calculada para un caso con aerosoles y un caso sin aerosoles, para las distintas tecnologías PV . . . . .	58
4.22. Potencia mensual promedio entre las 11AM y las 3PM de un módulo CPV en Santiago durante los años 2015-2015. . . . .	60
4.23. Fracción entre la potencia simulada de un módulo bajo las condiciones medidas y la potencia simulada para un caso estimado sin aerosoles en Santiago durante los años 2014-2015 bajo condición de cielo despejado. . . . .	60