



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

**CONSUMO ENERGÉTICO EN EL SECTOR AGRÍCOLA CHILENO Y
POTENCIAL DE INTEGRACIÓN DE SISTEMAS AGRIVOLTAICOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELÉCTRICO

FRANCISCO ANTONIO BULL CUEVAS

PROFESOR GUÍA:
RODRIGO PALMA BEHNKE

PROFESORA CO-GUÍA:
MARCIA MONTEDONICO GODOY

COMISIÓN:
ANDRÉS CABA RUTTE

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el proyecto FONDECYT/ANID N° 1241556

SANTIAGO DE CHILE
2024

CONSUMO ENERGÉTICO EN EL SECTOR AGRÍCOLA CHILENO Y POTENCIAL DE INTEGRACIÓN DE SISTEMAS AGRIVOLTAICOS

Los sistemas agrivoltaicos surgen como alternativa para destinar el uso de un mismo terreno para la producción agrícola y la generación de energía fotovoltaica. Este estudio dispone un análisis del consumo energético en el sector agrícola chileno y explora oportunidades de integración de estos sistemas para el autoconsumo. Para ello, se identifican los principales procesos que consumen energía en un predio agrícola, considerando como caso de estudio, la fruticultura de la zona central de Chile, por su consumo energético y potencial agrivoltaico.

En este trabajo se presentan metodologías para estimar la demanda eléctrica de un predio agrícola, reconociendo al riego presurizado como el proceso más relevante. Con base en esto, se incluye el procedimiento creado para estimar la demanda eléctrica del riego presurizado y su implementación en una herramienta de Excel. Además, como extensión del posible consumo eléctrico de un predio agrícola, se explora la futura posibilidad de utilizar tractores eléctricos para reemplazar a los tractores diésel actuales y se analizan los procesos involucrados en un *packing* de fruta. A partir de la información recopilada en base a fuentes primarias y secundarias, este estudio entrega metodologías y cuestionarios diseñados para obtener los datos necesarios para estimar la demanda de energía de estos procesos.

Como resultado general se identifica una sinergia natural entre los meses de mayor generación solar y mayor demanda eléctrica asociada al riego. En particular, los suelos que requieren riego más frecuente, como los arenosos, tienen un mayor potencial para abastecer su consumo eléctrico mediante sistemas agrivoltaicos, ya que la demanda eléctrica diaria coincide con la generación solar de mejor manera en comparación con suelos de riego menos frecuente. Además, cultivos como cítricos y paltos, que necesitan riego en invierno, son los más adecuados para aprovechar el autoconsumo de la energía generada estos meses.

Se ha establecido que los tractores eléctricos pueden reemplazar a los tractores diésel en cultivos de frutales. La electrificación de este consumo aumentará significativamente la demanda eléctrica de un predio, la cual podrá ser cubierta con energía solar durante el día, permitiendo la carga de baterías. Asimismo, la existencia de un *packing* predial implica un consumo considerablemente alto en la temporada de cosecha, siendo los procesos de frío los más demandantes dentro de un *packing*.

Se concluye que los sistemas agrivoltaicos pueden abastecer una parte considerable de los consumos actuales y futuros para la realidad de la gran mayoría de predios agrícolas, y la normativa actual de autoconsumo no representa un problema para esto. Sin embargo, existe un enorme potencial en la totalidad del terreno para la generación de energía que se limita por la normativa, pues fija la capacidad instalada a un máximo de 300 kW. Esta restricción es significativa, dado que una sola hectárea de terreno podría albergar un sistema de mayor capacidad y superar el límite de la normativa actual para autoconsumo.

Agradecimientos

Son muchas las personas, experiencias y circunstancias a las cuales les estoy agradecido. Primero, quiero expresar mi profunda gratitud a mi familia, especialmente a mis padres, Ricardo y Soledad. Su amor y apoyo incondicional han sido fundamentales para superar los desafíos y crecer como persona, brindándome todas las facilidades necesarias para poder completar mis estudios universitarios.

Me gustaría agradecer a todas mis amistades por siempre estar ahí, por todos los momentos compartidos, todos los viajes y experiencias vividas. A todas las amistades que me ha dado la vida, desde el colegio hasta la universidad, amigos desde primer año y amigos de la especialidad. Agradezco a la rama de atletismo de la FCFM, a la selección de la Universidad de Chile y todos los buenos momentos que me ha regalado este deporte. También le debo mucho a mi Grupo Scout por el crecimiento personal que me ha traído tanto ser beneficiario como dirigente, además de los tremendos campamentos que se vivieron, experiencias inolvidables.

Agradezco a mis profesores guía, Rodrigo Palma y Marcia Montedónico, quienes me han acompañado en este camino de investigación, contribuyendo cada cual desde su especialidad para orientar este estudio multidisciplinario, que abarca temáticas tanto del rubro energético como agrícola. Las reuniones y los comentarios recibidos permitieron guiar este trabajo de manera correcta. Además, quiero agradecer al profesor Andrés Caba por ser parte de la comisión y siempre haber estado dispuesto a ayudar y orientar durante este proceso de titulación. Y respecto al contexto de este trabajo, se agradece el financiamiento parcial del proyecto FONDECYT/ANID N° 1241556.

También quiero agradecer a Luis Rodríguez y Juan Pablo Prado por su contribución a este trabajo. Agradezco profundamente la disposición a recibirme en las visitas a terreno y la buena voluntad para responder las preguntas que iban surgiendo después de las visitas. La información recopilada representó una componente muy significativa para comprender procesos de los cuales no hay mucha documentación disponible, por lo cual su aporte a esta investigación fue de gran valor.

Tabla de Contenido

1. Introducción	1
1.1. Motivación y contexto	1
1.2. Objetivos	3
1.2.1. Objetivo general	3
1.2.2. Objetivos específicos	3
1.3. Alcance	3
1.4. Estructura del documento	4
2. Marco teórico y estado del arte	5
2.1. Marco teórico	5
2.1.1. Antecedentes generales sector agroalimentario	5
2.1.2. Consumo energético sector agrícola chileno	7
2.1.3. Producción primaria	8
2.1.3.1. Riego	8
2.1.3.2. Fertirrigación	11
2.1.3.3. Maquinaria agrícola	11
2.1.4. Industria agroalimentaria	12
2.1.4.1. Packing predial	13
2.1.5. Tarifas eléctricas	14
2.1.5.1. Tarifa BT1	15
2.1.5.2. Tarifa BT2 / AT2	15
2.1.5.3. Tarifa BT3 / AT3	15
2.1.5.4. Tarifa BT4 / AT4	16
2.1.6. Net Billing	17
2.2. Estado del arte	18
2.2.1. Sistemas agrivoltaicos	18
2.2.2. Tractores eléctricos	20
3. Metodología	22
3.1. Identificación de procesos	23
3.2. Proponer metodologías para estimar la demanda eléctrica de un predio	23
3.3. Recopilación de datos numéricos e información	24
3.4. Definición de casos de estudio y obtención de curvas de demanda eléctrica	24
3.5. Evaluación potencial de integración sistemas agrivoltaicos para autoconsumo	25
4. Análisis general consumo energético sector agrícola	26
4.1. Sistemas de riego	26
4.2. Riego presurizado en frutales	29

4.3.	Potencial agrivoltaico	30
4.4.	Reconocimiento sectores beneficiados por autoconsumo	31
4.5.	Tamaño predios frutales	32
5.	Consumo energético riego presurizado	34
5.1.	Formulación del problema	34
5.1.1.	Programación de riego	35
5.2.	Evapotranspiración del cultivo (demanda hídrica)	36
5.2.1.	Evapotranspiración de referencia	37
5.2.2.	Coefficiente de cultivo	39
5.3.	Frecuencia de riego	39
5.3.1.	Propiedades físicas del suelo	40
5.3.2.	Agua fácilmente aprovechable	42
5.4.	Tiempo de riego	42
5.4.1.	Riego por sectores	43
5.5.	Potencia electrobomba	44
5.6.	Resumen metodología para estimación demanda eléctrica riego presurizado .	48
6.	Herramienta para estimación demanda eléctrica riego presurizado	49
6.1.	Hoja 1: Evapotranspiración de referencia	49
6.2.	Hoja 2: Evapotranspiración del cultivo	50
6.3.	Hoja 3: Frecuencia de riego	51
6.4.	Hoja 4: Tiempo de riego	52
6.5.	Hoja 5: Potencia absorbida	53
6.6.	Hoja 6: Output herramienta	55
6.7.	Código en Python para construcción de curvas de demanda	56
7.	Consumo energético packing	58
7.1.	Formulación de problema	59
7.2.	Cuestionario procesos energéticos packing	60
7.3.	Recepción de fruta y procesos electromecánicos	62
7.3.1.	Hidrogenfriado	62
7.3.2.	Selección y embalaje	62
7.4.	Climatización	63
7.5.	Túnel de pre-frío	64
7.6.	Cámaras de almacenamiento	66
7.7.	Transporte pallets	68
7.8.	Estimación demanda eléctrica packing predial caso de estudio	70
8.	Consumo energético uso de maquinaria	75
8.1.	Formulación del problema	77
8.2.	Cuestionario uso de maquinaria agrícola	78
8.3.	Características caso de estudio	79
8.4.	Procesos en cultivo de frutales	80
8.4.1.	Poda de invierno	80
8.4.2.	Poda de verano	81
8.4.3.	Cosecha	81
8.4.4.	Tratamientos fitosanitarios	82

8.4.4.1.	Aplicación de fungicidas	83
8.4.4.2.	Aplicación de herbicidas	83
8.4.4.3.	Aplicación de insecticidas	83
8.5.	Tractor eléctrico compatible con procesos	84
8.6.	Estimación demanda eléctrica maquinaria agrícola caso de estudio	85
8.6.1.	Insecticidas antes y después de la cosecha	86
8.6.2.	Fungicidas y herbicidas	87
8.6.3.	Fungicidas y poda de invierno	88
8.6.4.	Cosecha, insecticidas y poda de verano	89
8.6.5.	Consumo eléctrico mensual estimado tractores eléctricos	90
9.	Evaluación de sistemas agrivoltaicos para autoconsumo	93
9.1.	Código para cálculo costo de Tarifa BT2	93
9.2.	Riego presurizado	96
9.2.1.	Tipos de suelo y frecuencia de riego	97
9.2.1.1.	Análisis energético	97
9.2.1.2.	Análisis costo tarifa	103
9.2.2.	Riego en meses de invierno	104
9.2.2.1.	Análisis energético	104
9.2.2.2.	Análisis costo tarifa	109
9.3.	Riego presurizado y tractores eléctricos	110
9.3.1.	Análisis energético	110
9.3.2.	Análisis costo tarifa	115
9.4.	Riego presurizado y packing predial	116
9.4.1.	Análisis energético	116
9.4.2.	Análisis costo tarifa	120
9.5.	Análisis capacidad instalada	122
10.	Conclusiones y trabajo futuro	123
10.1.	Conclusiones	123
10.1.1.	Riego presurizado	124
10.1.2.	Packing predial	125
10.1.3.	Uso de maquinaria agrícola	125
10.2.	Trabajo futuro	126
	Bibliografía	128
	Anexos	133
A.	Archivos	133

Índice de Tablas

2.1.	Resumen sistematización energética agricultura. Fuente: Elaboración propia en base a [8].	8
2.2.	Cargos por tarifa BT1 [22] [23].	15
2.3.	Cargos por tarifa BT2 / AT2 [22] [23].	15
2.4.	Cargos por tarifa BT3 / AT3 [22] [23].	15
2.5.	Cargos por tarifa BT4.1 / AT4.1 [22] [23].	16
2.6.	Cargos por tarifa BT4.2 / AT4.2 [22] [23].	16
2.7.	Cargos por tarifa BT4.3 / AT4.3 [22] [23].	17
5.1.	Cálculo de consumo energético de riego tecnificado según ejemplo. Elaboración propia en base a [43].	34
5.2.	Resumen de propiedades físicas para distintos tipos de suelo. Elaboración propia en base a [45].	41
6.1.	Coefficiente de cultivo para diferentes especies frutales [46] [49] [52] [53].	51
7.1.	Cuestionario demanda eléctrica <i>packing</i> : características generales de la planta.	60
7.2.	Cuestionario demanda eléctrica <i>packing</i> : identificación de procesos y equipos utilizados.	61
7.3.	Cuestionario demanda eléctrica <i>packing</i> : potencia eléctrica, tiempo de uso y patrón de consumo por proceso.	61
7.4.	Cuestionario demanda eléctrica <i>packing</i> : cámaras de pre frío y de almacenamiento	61
7.5.	Resumen datos de demanda eléctrica horaria asociadas a cada proceso del <i>packing</i>	70
7.6.	Características caso de estudio y cantidad cosechada.	71
7.7.	Resumen datos de demanda eléctrica horaria aproximada asociadas a cada proceso del <i>packing</i> predial para caso de estudio.	72
8.1.	Cuestionario uso de maquinaria agrícola: características generales del predio.	78
8.2.	Cuestionario uso de maquinaria agrícola: identificación de procesos y maquinaria utilizada.	78
8.3.	Cuestionario uso de maquinaria agrícola: calendario de uso y consumo de combustible por proceso.	79
8.4.	Características caso de estudio visita a terreno [17].	79
8.5.	Resumen información recopilada en terreno sobre procesos y maquinaria utilizada [17].	79
8.6.	Resumen de información recopilada en terreno para poda de invierno [17].	80
8.7.	Resumen de información recopilada en terreno para poda de verano [17].	81
8.8.	Resumen de información recopilada en terreno para cosecha [17].	82
8.9.	Resumen de información recopilada en terreno para aplicación de fungicidas [17].	83
8.10.	Resumen de información recopilada en terreno para aplicación de herbicidas [17].	83
8.11.	Resumen de información recopilada en terreno para pesticidas antes y después de la cosecha [17].	84

8.12.	Resumen de información recopilada en terreno para insecticidas durante la cosecha [17].	84
8.13.	Resumen de consumo eléctrico mensual por proceso para estimación demanda eléctrica maquinaria agrícola caso de estudio.	90
9.1.	Cargos y valores para tarifa de suministro eléctrico BT2 [68]	94
9.2.	Valor de inyección para clientes BT [68].	94
9.3.	Resultados herramienta computacional riego presurizado para distintos tipos de suelo.	97
9.4.	Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica casos de estudio.	100
9.5.	Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para distintos tipos de suelo.	103
9.6.	Resultados herramienta computacional riego presurizado para casos de estudio cítricos y uva de mesa.	105
9.7.	Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica casos de estudio cítricos y uva de mesa.	106
9.8.	Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para casos de estudio cítricos y uva de mesa.	109
9.9.	Resultados herramienta computacional riego presurizado cultivo de cerezos 50 ha región del Maule.	111
9.10.	Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.	113
9.11.	Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.	115
9.12.	Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica caso de estudio riego presurizado cerezos y <i>packing</i> predial.	118
9.13.	Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para caso de estudio riego presurizado cerezos y <i>packing</i> predial.	120

Índice de Ilustraciones

1.1.	Ejemplo de sistema agrivoltaico sobre cultivo. Fuente: Obtenido de [7].	2
2.1.	Esquema general de una cadena de valor agroalimentaria. Fuente: Basado en [10].	6
2.2.	Etapas generales de un proceso de cultivo. Fuente: Obtenido de [8].	7
2.3.	Esquema general sistema de riego gravitacional. Fuente: Obtenido de [11].	9
2.4.	Esquema general sistema de riego presurizado. Fuente: Obtenido de [11].	9
2.5.	Esquema general de componentes de un sistema de riego presurizado. Fuente: Obtenido de [12].	9
2.6.	Diagrama de una bomba centrífuga (Eje horizontal, impulsor vertical). Fuente: Obtenido de [13].	10
2.7.	Ejemplo de curva de potencia eléctrica en función del caudal de una electrobomba. Fuente: Obtenido de [14].	10
2.8.	Esquema de instalación de inyector Venturi. Fuente: Obtenido de [12].	11
2.9.	Interacción entre un sistema agrivoltaico y el uso de maquinaria agrícola. Fuente: Obtenido de [6].	12
2.10.	Esquema simplificado de procesos energéticos en la industria agroalimentaria. Fuente: Obtenido de [8].	12
2.11.	Esquema general de una línea de empaquetamiento de media complejidad. Fuente: Obtenido de [18].	14
2.12.	Gráfico simplificado de relación entre curvas de generación solar y demanda eléctrica. Fuente: Obtenido de [26].	17
2.13.	Esquema general y principales ventajas para cultivos de un sistema agrivoltaico. Fuente: Obtenido de [27].	18
2.14.	Resumen de sinergias entre alimento, agua y energía. Fuente: Obtenido de [27].	18
2.15.	Planta piloto de Fraunhofer instalada en Lampa. Fuente: Obtenido de [6].	19
2.16.	Resumen de ejemplos de sistemas agrivoltaicos en el mundo. Fuente: Obtenido de [27].	19
2.17.	Tractores eléctricos Fendt e100 V Vario y Monarch MK-V. Fuente: Obtenido de [30] [31].	20
2.18.	Primer tractor eléctrico del mercado chileno: Farmtrac FT25G. Fuente: Obtenido de [33].	21
3.1.	Diagrama de la metodología.	22
4.1.	Distribución nacional de métodos de riego 2007. Fuente: Obtenido de [34].	26
4.2.	Distribución regional de superficie regada 2007. Fuente: Obtenido de [34].	27
4.3.	Distribución nacional de métodos de riego par año agrícola 2020-2021. Fuente: Obtenido de [35].	27
4.4.	Distribución porcentual de la superficie frutal por método de riego. Fuente: Obtenido de [37] y [38].	28

4.5.	Eficiencia de aprovechamiento del agua para distintos métodos de riego. Fuente: Obtenido de [39].	28
4.6.	Tipos de Emisores. Fuente: Obtenido de [40].	29
4.7.	Esquema general sistema fotovoltaico integrado a equipos de bombeo. Fuente: Obtenido de [15].	29
4.8.	Demanda eléctrica y distribución agrícola de zona central de Chile. Fuente: Obtenido de [7].	30
4.9.	Potencial agrivoltaico de zona central de Chile. Fuente: Obtenido de [7].	30
4.10.	Distribución de exportaciones de fruta fresca (M USD/año). Fuente: Obtenido de [18].	31
4.11.	Distribución de toneladas producidas de fruta fresca. Fuente: Obtenido de [18].	32
4.12.	Distribución de huertos frutales Región de Valparaíso [41] y Región Metropolitana [42].	32
4.13.	Distribución de huertos frutales Región de O'Higgins [37] y Región del Maule [38].	33
5.1.	Esquema para la toma de decisiones en la programación de riego. Fuente: Adaptado de [46].	36
5.2.	Diagrama del cálculo de la evapotranspiración de referencia y cultivo. Fuente: Obtenido de [48].	37
5.3.	Estación meteorológica automática (EMA). Fuente: Obtenido de [45].	38
5.4.	Información de evapotranspiración de referencia de diferentes EMA, disponible en: https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/	38
5.5.	Evolución del coeficiente de cultivo en el tiempo. Fuente: Obtenido de [46] . .	39
5.6.	Patrón de mojamiento para diferentes tipos de suelo. Fuente: Obtenido de [47].	40
5.7.	Disposición sistema de riego y parámetros utilizados. Fuente: Obtenido de [40].	43
5.8.	Sectores de riego para un sistema de bombeo. Fuente: Obtenido de [9].	44
5.9.	Ejemplo de sistema de bombeo para predio de 18 hectáreas. Fuente: Obtenido de [51].	45
5.10.	Ejemplo de sistema de bombeo para predio de 50 hectáreas. Fuente: Obtenido de [50].	45
5.11.	Ejemplo de curva de potencia eléctrica en función del caudal de una electrobomba. Fuente: Obtenido de [14].	46
5.12.	Diagrama de bloques para determinar la potencia absorbida por el motor de una electrobomba.	47
5.13.	Diagrama de bloques de la metodología para la estimación de demanda eléctrica riego presurizado.	48
6.1.	Herramienta de Riego: Hoja 1, Evapotranspiración de Referencia.	50
6.2.	Herramienta de Riego: Hoja 2, Evapotranspiración del Cultivo.	50
6.3.	Herramienta de Riego: Hoja 3, Frecuencia de Riego.	51
6.4.	Herramienta de Riego: Hoja 4, Tiempo de Riego.	52
6.5.	Ejemplo de la placa de electrobomba destinada para riego. Fuente: Obtenido de [12].	53
6.6.	Curvas de potencia v/s caudal para las bombas escogidas.	54
6.7.	Herramienta de Riego: Hoja 5, Potencia absorbida.	55
6.8.	Herramienta de Riego: Hoja 6, Output.	55
6.9.	Ejemplo de información ingresada en Explorador Solar para estación meteorológica Los Niches. Fuente: Obtenido de [55].	56

6.10.	Diagrama de bloques de código en Python para construcción curvas de demanda riego presurizado.	57
7.1.	Planta de <i>packing</i> de cerezas de Fruttitta Services, obtenida de https://www.facebook.com/photo/?fbid=681678080689661&set=a.145787040945437&locale=es_	58
7.2.	Pasos metodología general para estimar la demanda eléctrica de un día de <i>packing</i>	59
7.3.	Pasos de metodología para estimar demanda eléctrica del proceso que ocurre en un <i>packing</i>	60
7.4.	Hidrogenfriamiento en <i>packing</i> . Fuente: Obtenido de [56].	62
7.5.	Línea transportadora en planta <i>packing</i> Fruttitta Services [20].	62
7.6.	Demanda eléctrica diaria <i>packing</i> : hidrogenfriado y procesos electromecánicos.	63
7.7.	Demanda eléctrica diaria <i>packing</i> : compresores e iluminación.	64
7.8.	Túnel californiano para pre-frío. Fuente: Obtenido de [58].	65
7.9.	Túnel de Pre-Frío en planta <i>packing</i> Fruttitta Services [20].	65
7.10.	Demanda eléctrica diaria <i>packing</i> : Túnel pre-frío.	66
7.11.	Capacidad de almacenamiento envases Fruttitta, obtenida de: https://fruttitta.c1/es/cerezas/	66
7.12.	Cámara de almacenamiento en planta <i>packing</i> Fruttitta Services [20].	67
7.13.	Demanda eléctrica diaria <i>packing</i> : Cámara de Almacenamiento.	68
7.14.	Grúa horquilla Jungheinrich ETV318 utilizada en el <i>packing</i> [20]. Fuente: Obtenido de [59].	68
7.15.	Demanda eléctrica diaria <i>packing</i> : Carga Grúas horquilla.	69
7.16.	Curva de demanda eléctrica diaria aproximada <i>packing</i> predial por procesos en día de cosecha para caso de estudio.	73
7.17.	Curva de demanda eléctrica diaria aproximada <i>packing</i> predial total en día de cosecha para caso de estudio.	73
7.18.	Curva de demanda eléctrica diaria aproximada <i>packing</i> predial por procesos en día de no cosecha para caso de estudio.	74
7.19.	Curva de demanda eléctrica diaria aproximada <i>packing</i> predial total en día de no cosecha para caso de estudio.	74
8.1.	Tractor Fendt e100 V Vario pasando entre hileras. Fuente: Obtenido de [60]	75
8.2.	Resumen de labores para distintas especies. Fuente: Obtenido de [61]	76
8.3.	Pasos de metodología para estimar consumo eléctrico del uso de tractores eléctricos.	77
8.4.	Tractores fruteros Landini Rex y Kubota MX5100. Fuente: Obtenido de [64] y [65].	80
8.5.	Tractor Fendt e100 V Vario equipado con una trituradora. Fuente: Obtenido de [60]	81
8.6.	Tractor Fendt e100 V Vario equipado con una nebulizadora. Fuente: Obtenido de [60].	82
8.7.	Diagrama de bloques para creación de perfil de demanda eléctrica procesos que usan maquinaria agrícola.	86
8.8.	Calendario demanda eléctrica aplicación de insecticidas antes y después de la cosecha.	87
8.9.	Calendario demanda eléctrica aplicación de fungicidas y herbicidas.	87
8.10.	Calendario demanda eléctrica aplicación de Fungicidas y Poda de Invierno.	88
8.11.	Calendario demanda eléctrica aplicación de insecticidas y cosecha.	89
8.12.	Calendario demanda eléctrica aplicación de insecticidas, cosecha y poda de verano.	90
8.13.	Consumo eléctrico mensual estimado de tractores eléctricos por proceso.	91

8.14.	Consumo eléctrico mensual estimado total de tractores eléctricos.	92
9.1.	Diagrama de bloques código para el cálculo de costo tarifa BT2.	96
9.2.	Gráfico comparativo días y horas de riego según tipo de suelo casos de estudio.	98
9.3.	Información ingresada en Explorador Solar para estación meteorológica Los Niches [55].	99
9.4.	Gráfico comparativo balance de energía mensual para casos de estudios de tres tipos de suelo.	100
9.5.	Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para casos de estudios de tres tipos de suelo.	101
9.6.	Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para distintos tipos de suelo.	102
9.7.	Gráfico comparativo costo mensual suelo arenoso con y sin sistema agrivoltaico.	103
9.8.	Gráfico comparativo costo mensual para distintos tipos de suelo con sistema agrivoltaico.	104
9.9.	Gráfico comparativo entre coeficiente de cultivo cítricos y uva de mesa.	104
9.10.	Gráfico comparativo días y horas de riego para casos de estudio cítricos y uva de mesa.	105
9.11.	Gráfico comparativo balance de energía mensual uva de mesa.	106
9.12.	Gráfico comparativo balance de energía mensual cítricos.	107
9.13.	Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para cítricos.	107
9.14.	Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para uva de mesa.	108
9.15.	Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para cítricos y uva de mesa.	108
9.16.	Gráfico comparativo costo mensual caso de estudio cítricos con y sin sistema agrivoltaico.	109
9.17.	Gráfico comparativo costo mensual caso de estudio uva de mesa con y sin sistema agrivoltaico.	110
9.18.	Gráfico comparativo consumo de energía mensual riego presurizado y tractores eléctricos.	111
9.19.	Gráfico consumo de energía mensual total para riego presurizado y tractores eléctricos.	112
9.20.	Gráfico comparativo balance de energía mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.	113
9.21.	Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.	114
9.22.	Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para caso de estudio riego presurizado y tractores eléctricos.	115
9.23.	Gráfico comparativo costo mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctrico	116
9.24.	Curva de demanda eléctrica diaria aproximada <i>packing</i> predial total en día de cosecha para caso de estudio.	117
9.25.	Curva de demanda eléctrica diaria aproximada <i>packing</i> predial total en día de no cosecha para caso de estudio.	117
9.26.	Gráfico comparativo balance de energía mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y <i>packing</i> predial.	118
9.27.	Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para caso de estudio riego presurizado cerezos y <i>packing</i> predial.	119

9.28.	Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para caso de estudio riego presurizado y <i>packing</i> predial.	120
9.29.	Gráfico comparativo costo mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y <i>packing</i> predial.	121
9.30.	Sistema agrivoltaico en Heggelbach con una capacidad de 194 kWp que cubre un tercio de hectárea. Fuente: Obtenido de [71].	122

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación y contexto

Es posible identificar al cambio climático como uno de los problemas más importantes que está afrontando la sociedad actualmente. Tras años de investigación por parte del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), se puede concluir que la actividad humana influye en este aumento de la temperatura del planeta [1]. En particular, las emisiones de gases de efecto invernadero se identifican como la principal influencia humana, razón por la cual cada vez están surgiendo más iniciativas que buscan la reducción de estas emisiones. Por otro lado, aproximadamente dos tercios de las emisiones de CO₂ a nivel mundial se pueden atribuir al sector energético [2], representando de esta manera una industria de gran importancia para implementar medidas.

En vista de este contexto, actualmente se está dando un proceso de descarbonización de la matriz eléctrica, tanto en Chile como en gran cantidad de países del mundo. En definitiva, con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero que aceleran el calentamiento global, se está optando por aumentar la generación en base a fuentes renovables, reemplazando los medios de generación convencionales a partir de combustibles fósiles. En el contexto chileno, se propone como objetivo la salida de centrales a carbón para el 2050 de acuerdo con el Plan de Carbono Neutralidad [2]. En este panorama de transición energética, no solo debe aumentar la capacidad renovable instalada para reemplazar la generación convencional, sino que también debe ser capaz de abastecer la demanda de energía, que se proyecta que será creciente durante los próximos años [2].

Debido a su gran potencial en Chile, durante los últimos años ha habido un creciente aumento de la capacidad solar y eólica instalada, y se proyecta que en los años siguientes esta tendencia se mantenga [2]. Sin embargo, el aumento de generación en base a energías renovables tiene sus consecuencias en el territorio nacional, ya que estas tecnologías necesitan una mayor cantidad de espacio para producir la misma cantidad de energía que las unidades térmicas [3]. En este escenario se puede identificar un conflicto por el uso de suelo, ya que una mayor necesidad de espacio para generación eléctrica origina competencia con otros sectores que se dedican a otras actividades productivas.

De acuerdo con estudios internacionales, se establece que a nivel mundial el principal conflicto para el desarrollo de las energías renovables ha sido la ocupación de terrenos agrícolas [4]. Al mismo tiempo, respecto a la importancia de estos terrenos, también se proyecta una

alza en la demanda de alimentos, estimándose un aumento de un 50% para el año 2030 [5] con respecto al 2019. Por consiguiente, si bien es necesario aumentar la capacidad renovable, también lo es incrementar la producción agrícola. No obstante, dado que el espacio es limitado, es necesario encontrar soluciones para satisfacer la demanda de suelo tanto del sector energético como del agrícola. En vista de este conflicto, surgen los sistemas agrivoltaicos como una alternativa interesante e innovadora, pues busca justamente destinar un mismo terreno tanto para la generación de energía como para el desarrollo de actividades agrícolas.

Los sistemas agrivoltaicos consisten en términos generales en el montaje de sistemas fotovoltaicos sobre cultivos agrícolas, lo cual tiene posibles sinergias sin necesidad de interferir en el desarrollo normal de sus actividades [6]. La figura 1.1 muestra un ejemplo de como se ven estos sistemas:



Figura 1.1: Ejemplo de sistema agrivoltaico sobre cultivo. Fuente: Obtenido de [7].

Además de ser una fuente de generación de energía que permite el doble aprovechamiento del uso del suelo, se han podido observar otros impactos positivos en sistemas agrivoltaicos. Se pueden identificar ventajas económicas para el agricultor y disminución de la demanda de riego producto del sombreado de los cultivos, entre otras sinergias [6].

Estos sistemas siguen siendo un tema relativamente nuevo, contando con iniciativas piloto en algunos países y de desarrollo comercial principalmente en países desarrollados [6]. En Chile, se puede reconocer a la falta de investigación que hay sobre este tema como una de las principales razones que explican que no exista un amplio desarrollo de esta tecnología [7], motivo que es la mayor motivación de este trabajo. En particular, resulta interesante investigar cómo podría impactar la integración de sistemas agrivoltaicos a un predio agrícola desde el punto de vista de su consumo energético. Además de las sinergias comentadas anteriormente, los terrenos agrícolas tienen procesos que demandan energía y podrían verse significativamente beneficiados al tener una fuente de generación local y renovable. Para comprender estos beneficios, es necesario analizar cómo es el consumo de energía en el sector agrícola, temática que también presenta dificultades debido a la falta de medición de consumos energéticos a nivel de procesos [8].

1.2. Objetivos

Los sistemas agrivoltaicos surgen como una alternativa promisorio para permitir el aumento de capacidad renovable sin tener que competir con los terrenos agrícolas por el uso de suelo. Al integrarse a un predio agrícola, resulta interesante investigar el impacto de estos sistemas desde el punto de vista del autoconsumo energético. Tanto los sistemas agrivoltaicos como el consumo energético del sector agrícola chileno son temas donde es de utilidad ampliar el campo de investigación, y en particular, resulta interesante analizar como convergen ambos temas. A raíz de este contexto es que surge el presente trabajo, cuyos objetivos se presentan a continuación.

1.2.1. Objetivo general

El objetivo general de este trabajo consiste en disponer un análisis del consumo energético asociado al sector agrícola chileno, identificando los procesos más demandantes y su comportamiento, con el fin de encontrar oportunidades para la integración de sistemas agrivoltaicos para el autoconsumo.

1.2.2. Objetivos específicos

Para cumplir este objetivo general, se definen los siguientes objetivos específicos:

1. Identificar los principales procesos que consumen energía en un predio agrícola.
2. Proponer metodologías para estimar la demanda eléctrica de un predio agrícola.
3. Recopilar datos de las variables identificadas recurriendo a estudios nacionales, internacionales y fuentes primarias.
4. Definir casos de estudio y obtener curvas de demanda eléctrica estimada.
5. Evaluar para los casos de estudio el potencial de integración de sistemas agrivoltaicos para el autoconsumo.

1.3. Alcance

El alcance de este trabajo se centra en el estudio del consumo energético dentro de un predio agrícola, considerando aquellos procesos que podrían ser influenciados por la generación local de un sistema agrivoltaico. Se excluyen, por tanto, los procesos de la agroindustria que ocurren fuera del predio agrícola.

Si bien el uso de las metodologías creadas pueda ser extendido al estudio de distintos tipos de cultivos, este estudio se centra en el estudio de frutales. Este alcance se debe a los resultados promisorios obtenidos sobre este tipo de cultivos. En esta misma línea, las herramientas creadas y casos de estudio definidos exploran cultivos de frutales.

Otro alcance de este trabajo es que ante la gran variabilidad del sector agrícola y climas a lo largo de Chile, este estudio se enfoca en la zona central, que también es la región con la mayor superficie dedicada a frutales.

Respecto a los casos de estudio de integrar sistemas agrivoltaicos, estos consideran sistemas fotovoltaicos conectados a la red, sujetos a la normativa actual para clientes regulados de distribución. No se analizan sistemas aislados de la red, ni tampoco otros esquemas de conexión.

1.4. Estructura del documento

El documento se estructura en 9 capítulos, además de la **Introducción** (Capítulo 1). Continúa con el **Marco Teórico y Estado del Arte** (Capítulo 2), donde se abordan conceptos clave sobre el consumo energético en el sector agrícola, los tipos de clientes, y el estado del arte de los sistemas agrivoltaicos y tractores eléctricos. A continuación, en la **Metodología** (Capítulo 3), se detalla el procedimiento seguido para la realización del estudio, describiendo las principales etapas reconocidas. En el **Análisis general del consumo energético en el sector agrícola** (Capítulo 4), se examina la realidad del sector agrícola chileno, con un enfoque en sus procesos y características, para identificar oportunidades de donde centrar los esfuerzos de este trabajo.

El análisis se especifica en los capítulos siguientes, comenzando con el **Consumo energético riego presurizado** (Capítulo 5), donde se presenta una metodología creada para la estimar la demanda eléctrica de este proceso en un predio agrícola. Luego, el capítulo **Herramienta para estimación demanda eléctrica riego presurizado** (Capítulo 6) presenta una herramienta en Excel creada para implementar la metodología anterior en cultivos de frutales y obtener curvas de demanda eléctrica con resolución horaria. Después, el capítulo **Consumo energético packing** (Capítulo 7) presenta la metodología creada para estimar la demanda eléctrica del *packing* en base a fuentes primarias, además de describir los principales procesos identificados en terreno. El capítulo **Consumo energético uso de maquinaria** (Capítulo 8), presenta asimismo la metodología creada en base a fuentes primarias para estimar la demanda de uso de maquinaria, además de una metodología para estimar el consumo eléctrico de reemplazar esta maquinaria por tractores eléctricos.

Posteriormente, en el capítulo **Evaluación de sistemas agrivoltaicos para autoconsumo** (Capítulo 9) se realizan análisis energéticos y tarifarios para los distintos casos de estudio definidos, analizando el comportamiento de la demanda eléctrica y la generación local. Finalmente, el documento concluye con un resumen de los hallazgos, conclusiones y recomendaciones para futuras investigaciones en el Capítulo 10.

Capítulo 2

Marco teórico y estado del arte

2.1. Marco teórico

2.1.1. Antecedentes generales sector agroalimentario

El consumo de energía es un aspecto fundamental para la productividad del sector agrícola. En la actualidad se reconoce una estrecha relación entre agua, energía y alimentos. Esto significa que incrementar la producción de alimentos demandará más recursos de energía y agua, y asimismo, aumentar la disponibilidad de energía facilitará la movilización de agua y la obtención de una mayor cantidad de alimentos [9]. En vista de esta relación, se proyecta una tendencia creciente en el consumo de energía por parte del sector agrícola, impulsada por el crecimiento de la población y la mayor necesidad de alimentos y agua.

En particular, según estudios nacionales se estima que el consumo eléctrico representa entre un 9% y un 18% de los costos totales de la producción primaria de un predio agrícola, lo cual es consistente con fuentes internacionales, donde según datos de la USDA se estima que corresponde a aproximadamente un 17% de los costos productivos [9]. Además del costo económico que significa el consumo de energía, se reconoce también la importancia de la disponibilidad de este recurso, pues muchos predios agrícolas dependen del consumo eléctrico para sus sistemas de riego. Entonces, independientemente de la influencia del costo de la electricidad, el acceso a esta es de suma importancia y debe garantizarse un suministro sin interrupciones. Al respecto, se comenta que aunque los porcentajes puedan no parecer tan altos, basta con observar como se ve afectada la productividad del predio al no contar con acceso a energía en épocas intensivas de la temporada de riego [9].

Por otro lado, se puede reconocer que los procesos productivos que demandan energía en el sector agrícola son intensivos en la generación de emisiones de CO₂, lo cual significa un desafío a enfrentar, ya que este corresponde a un sector sumamente afectado por el cambio climático, a causa de estas mismas emisiones [8]. Ante esto, han surgido estudios internacionales que exploran la alta diversidad de procesos energéticos en las cadenas de valor agroalimentarias, con el fin de identificar oportunidades de integración de energías renovables. Como fuente bibliográfica importante del tema se puede estudiar el informe “*Renewable energy for agri-food systems*”, elaborado por IRENA y FAO [10]. En este trabajo se presenta el siguiente esquema general de una cadena de valor del sector agroalimentario, según la figura 2.1:

Oportunidades energéticas en cadena de valor agroalimentaria



Figura 2.1: Esquema general de una cadena de valor agroalimentaria. Fuente: Basado en [10].

De acuerdo con este informe y el esquema general presentado, se pueden reconocer diversos procesos energéticos desde la producción primaria hasta el consumidor final. Al respecto, en el informe se identifican las siguientes aplicaciones de energía renovable a lo largo de las cadenas agroalimentarias como aquellas que están demostrando mayores beneficios:

1. **Riego con energía solar:** El riego tecnificado se está adoptando ampliamente para mejorar el acceso al agua, permitiendo así mayor resiliencia frente a las consecuencias del cambio climático. De acuerdo con *Bangladesh's Nationally Determined Contribution* bajo el Acuerdo de París, se identifica a la irrigación solar como una medida clave, estimando que las emisiones durante todo el ciclo de vida de las bombas de agua son entre 95 % y 98 % inferiores que las de las bombas alimentadas por electricidad de la red o combustible diésel.
2. **Energías renovables para la agroindustria:** Tras la producción primaria los alimentos pueden ser transportados y procesados en agroindustrias, para lo cual hay consumo energético asociado.
3. **Almacenamiento en frío y refrigeración:** Se reconoce la relevancia de este proceso en la cadena de valor alimentaria para aumentar la vida útil de los productos y evitar pérdida de alimentos. Asimismo, se reconoce un considerable consumo de energía asociado a este proceso, así como la oportunidad de ser abastecido por energías renovables.
4. **Bioenergía sostenible:** Se identifica el potencial de ocupar los residuos generados en la producción de cultivos y ganado como fuente de bioenergía.

Tras haber analizado estos antecedentes generales, se puede reconocer la importancia de las medidas mencionadas en una cadena de valor alimentaria, pues fueron identificadas por IRENA y FAO, entidades relevantes de los sectores energético y agrícola a nivel internacional. Con esta información presente, a continuación se procede a analizar directamente las características energéticas del sector agrícola chileno.

2.1.2. Consumo energético sector agrícola chileno

El sector agroalimentario chileno está experimentando un constante desarrollo debido a su gran influencia a nivel país, pues hoy corresponde el segundo mayor exportador después de la minería del cobre [8]. Para comprender los consumos energéticos asociados a este sector y su influencia en la productividad, se debe reconocer en primer lugar que el sector agroalimentario es muy variado. Por consiguiente, para efectos de este trabajo se busca analizar los procesos que demandan mayor energía y puedan ocurrir en un mismo predio agrícola, con el fin de evaluar el potencial de integración de sistemas agrivoltaicos. La demanda de energía de un predio se satisface mediante el uso de dos fuentes energéticas: electricidad y combustible. Los principales procesos de un predio agrícola se identifican en el informe “Escenario energético del sector agroalimentario”, para el cual se encuestaron empresas del sector agroalimentario entre los años 2010 y 2015. Al respecto, en la figura 2.2 se pueden identificar las siguientes etapas generales para un proceso de cultivo:

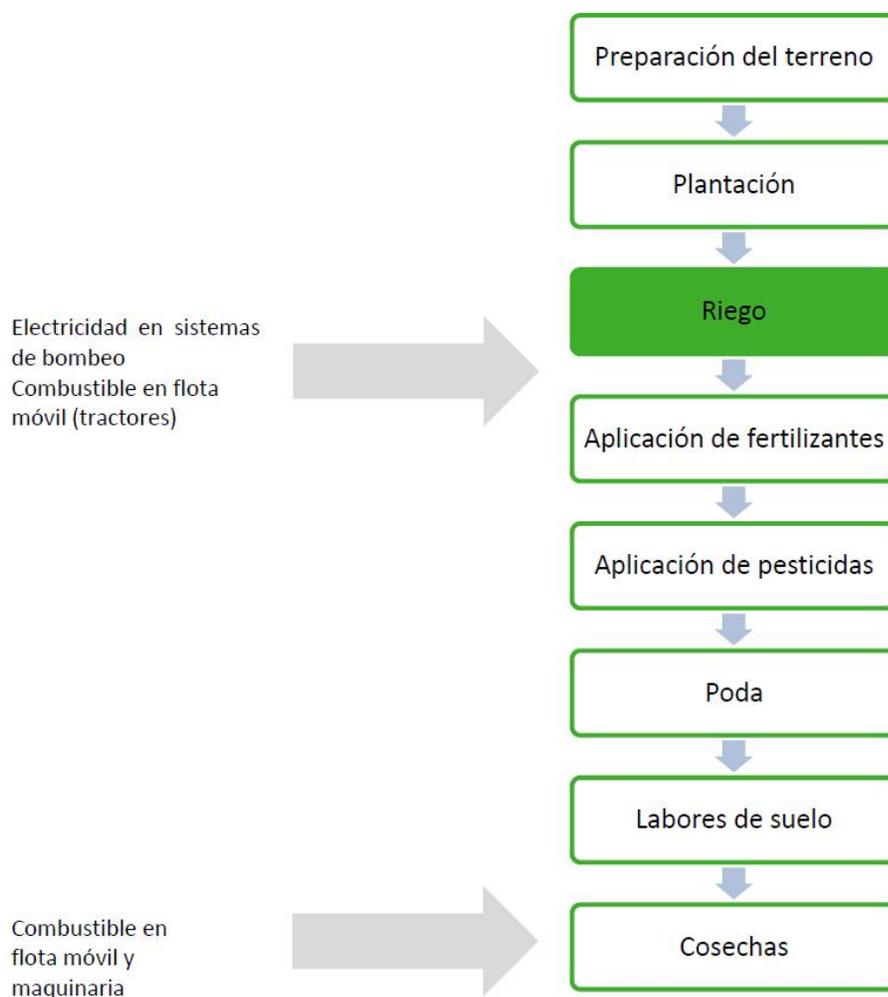


Figura 2.2: Etapas generales de un proceso de cultivo. Fuente: Obtenido de [8].

Al respecto, en color verde se resalta la etapa de mayor demanda energética del proceso, que corresponde al riego, atribuyéndole aproximadamente un 78 % del consumo energético del

sector agrícola de acuerdo con los resultados obtenidos. El 22 % restante se atribuye al consumo de combustible destinado a las demás actividades relacionadas con uso de flota móvil y de maquinaria agrícola. Cabe reconocer que estos resultados son generales y este estudio agrupa cultivos con características y necesidades diferentes, como es el caso de hortalizas y frutas, las cuales contemplan diferentes actividades relacionadas con el uso de maquinaria agrícola. A continuación, la tabla 2.1 presenta un resumen de la sistematización de la información obtenida de las encuestas realizadas:

Resumen Sistematización Energética Agricultura	
Variables	Descripción
Fuente de energía	o Electricidad: 78 % o Combustible: 22 %
Proceso relevante	Sistemas de riego
Equipo relevante	Equipos de impulsión, bombas y flota móvil
Oportunidades de mejora	o ERNC (paneles fotovoltaicos) o Tarifas eléctricas, recorte horas punta.
Indicador General	Fruta/Hortalizas (15 empresas): o 120 – 730 [kWh/ton] o Promedio: 412 [kWh/ton] Uva (7 empresas): o 250 – 1400 [kWh/ton] o Promedio: 610 [kWh/ton]

Tabla 2.1: Resumen sistematización energética agricultura. Fuente: Elaboración propia en base a [8].

Como se puede observar, de acuerdo con la información recopilada y las distintas empresas estudiadas, existe una amplia variación en relación a los datos numéricos obtenidos para el consumo energético por tonelada producida. Mientras tanto, al haber un porcentaje mayor asociado al consumo de energía eléctrica, se reconoce como principal oportunidad de mejora a la integración de paneles fotovoltaicos para generación de electricidad. En definitiva, para la producción primaria de un predio agrícola, se identifican como los procesos más relevantes al riego para consumo eléctrico y al uso de flota móvil para consumo de combustible.

2.1.3. Producción primaria

2.1.3.1. Riego

Al haber identificado al riego como aquel proceso que mayor demanda eléctrica representa para un predio agrícola, a continuación se analizan las características de este consumo. El riego no va a significar necesariamente un alto consumo energético, pues existen diversos métodos de riego, los cuales se pueden diferenciar de manera general en 2 categorías:

1. Riego gravitacional
2. Riego presurizado

A continuación, las figuras 2.3 y 2.4 presentan esquemas generales de ambos tipos de riego:



Figura 2.3: Esquema general sistema de riego gravitacional. Fuente: Obtenido de [11].

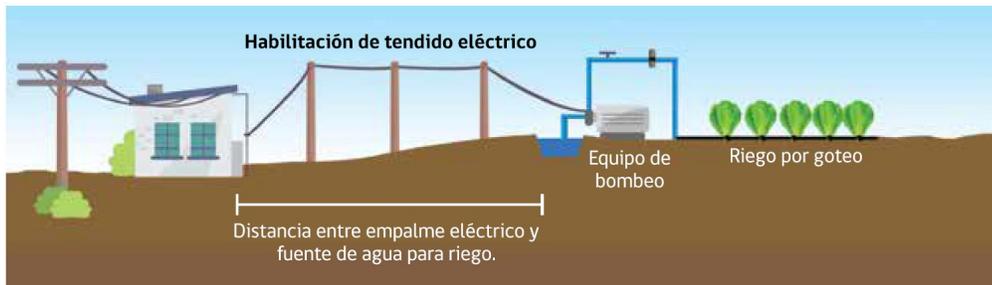


Figura 2.4: Esquema general sistema de riego presurizado. Fuente: Obtenido de [11].

En definitiva, si un predio agrícola cuenta con un sistema de riego gravitacional, no existirá consumo energético asociado a este proceso. En cambio, si se posee un sistema de riego presurizado, será necesario contar con una fuente de energía para su funcionamiento. En particular, el equipo eléctrico que consume energía en este tipo de riego corresponde a una electrobomba, la cual se integra a un sistema de bombeo, cuyas principales componentes se pueden apreciar en la figura 2.5:

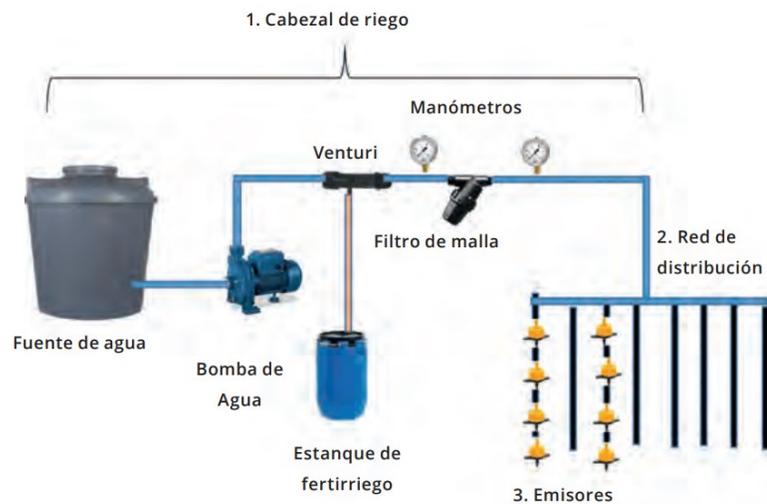


Figura 2.5: Esquema general de componentes de un sistema de riego presurizado. Fuente: Obtenido de [12].

El riego presurizado es un método que consiste en llevar el agua a presión a través de tuberías y aplicarla al suelo mediante emisores que operan con un caudal y presión específicos. Al tratarse de equipos eléctricos, las electrobombas ocupadas para el riego operan a cierta potencia eléctrica, parámetro fundamental para poder estimar el consumo eléctrico que significa el uso de este equipo. Las bombas más comunes en riego agrícola son las centrífugas [13], en las cuales el agua ingresa a la carcasa de la bomba por su parte central, donde se encuentra el impulsor, como muestra la figura 2.6. El impulsor es accionado por el eje de la bomba, el cual es movido por un motor eléctrico.

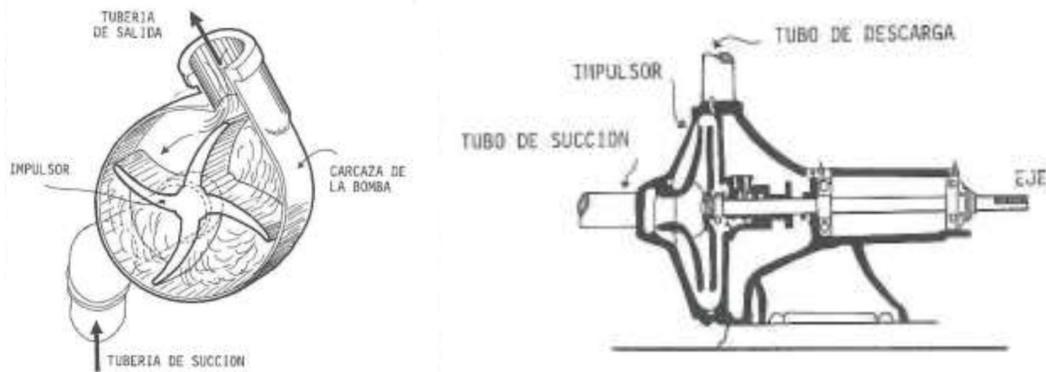


Figura 2.6: Diagrama de una bomba centrífuga (Eje horizontal, impulsor vertical). Fuente: Obtenido de [13].

Los factores que permiten caracterizar la operación una bomba son el caudal que entregan (Q), la presión de trabajo (H) y la potencia necesaria para su funcionamiento (P). Las bombas tienen distintos puntos de operación, los cuales dependen del diseño del sistema de bombeo. Los rangos de operación de caudales, presiones y potencias se especifican en los catálogos publicados por los fabricantes. En dichos catálogos, se relaciona el caudal con la presión, así como la potencia requerida para diferentes diámetros de rodete y distintos niveles de eficiencia de la bomba [12]. Cada bomba posee curvas características que representan las relaciones entre estas variables, como muestra por ejemplo la figura 2.7:

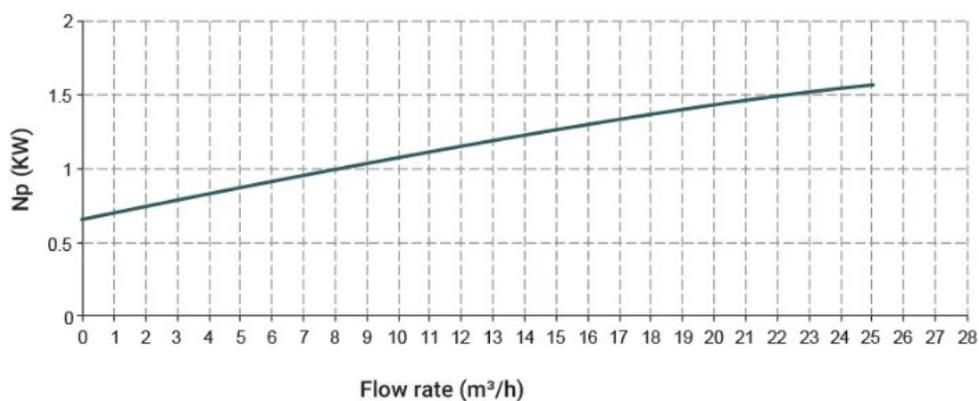


Figura 2.7: Ejemplo de curva de potencia eléctrica en función del caudal de una electrobomba. Fuente: Obtenido de [14].

Este gráfico muestra las curvas de potencia absorbida por el motor en función del caudal suministrado. Es importante destacar que, dado un caudal específico y el diseño adecuado de un sistema de bombeo según la bomba utilizada, se garantiza un flujo de agua uniforme. Esto se mantiene siempre y cuando la frecuencia de la red, que determina la velocidad de giro del motor, permanezca constante [13].

2.1.3.2. Fertirrigación

La fertirrigación es una práctica esencial si se cuenta con un sistema de riego presurizado, debido a que se puede integrar fácilmente. Como se ve en el diagrama de la la figura 2.5, las componentes del sistema de fertirriego generalmente se instalan en el cabezal de bombeo y antes del sistema de filtrado del equipo de riego, con el objetivo de evitar que las impurezas del tanque de fertilizante ingresen a las líneas de riego. La inyección de fertilizantes mediante el uso de Venturi es el método más popular [15], cuyo circuito se puede ver en la figura 2.8:



Figura 2.8: Esquema de instalación de inyector Venturi. Fuente: Obtenido de [12].

El Venturi es un dispositivo de plástico con un estrechamiento que crea succión, permitiendo que al conectarle una tubería el fertilizante pase del depósito a la red principal de riego. Este Venturi se coloca en una tubería de PVC configurada en forma de *by-pass*, paralela a la tubería principal de riego. Cabe mencionar que esta práctica no requiere energía adicional y proporciona el fertilizante de manera constante y regulada a la red de distribución [15].

2.1.3.3. Maquinaria agrícola

Además del riego, que representa el mayor consumo eléctrico de la producción primaria de un predio agrícola, el consumo de combustible se asocia al uso de tractores y maquinaria agrícola. Dependiendo del tipo de cultivo en específico, se requerirán diferentes procesos, los cuales asimismo tienen épocas específicas para llevarse a cabo.

El uso de maquinaria agrícola actualmente depende del consumo de combustible, pues el motor diésel sigue siendo la opción preferida y más utilizada [16]. Los tractores utilizados en la agricultura son versátiles y cumplen diversas funciones dependiendo de los aperos y herramientas que se le monten, como por ejemplo: carro de arrastre, nebulizadora, trituradora

de restos de poda, segadora, grúa horquilla, barra para aplicar herbicida, entre otras. De esta manera, un mismo tractor puede ser utilizado para múltiples labores, como cosecha, podas y tratamientos fitosanitarios, siempre y cuando su potencia de trabajo sea suficiente [17].

A continuación, la figura 2.9 presenta la interacción entre un sistema agrivoltaico perteneciente a la empresa Fraunhofer Chile y el uso de maquinaria agrícola:



Figura 2.9: Interacción entre un sistema agrivoltaico y el uso de maquinaria agrícola. Fuente: Obtenido de [6].

2.1.4. Industria agroalimentaria

Dentro de la cadena de valor de la producción de alimentos, cabe considerar procesos de la industria agroalimentario que puedan ocurrir en un mismo predio agrícola, pues se verían beneficiados por la generación de electricidad al contar con un sistema agrivoltaico. A modo general, la figura 2.10 muestra un esquema simplificado de los requerimientos de electricidad y combustible presentes en la industria agroalimentaria:

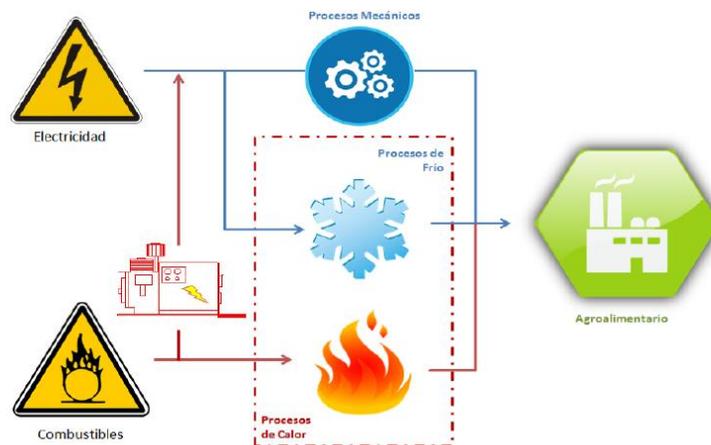


Figura 2.10: Esquema simplificado de procesos energéticos en la industria agroalimentaria. Fuente: Obtenido de [8].

La electricidad se ocupa principalmente para procesos electromecánicos y de frío, mientras que se puede reconocer al consumo de combustible principalmente para procesos de calor y

generación de electricidad. Dentro de esta industria agroalimentaria, se pueden identificar a los procesos que involucra el *packing* después de la cosecha como aquellos que potencialmente podrían ocurrir en un mismo predio agrícola [18].

2.1.4.1. Packing predial

Una unidad de *packing* corresponde al recinto donde se realiza la selección y el embalaje de la fruta fresca destinada a la exportación o al mercado nacional. Para predios agrícolas de cierto tamaño, es conveniente para el productor contar con su propio *packing* para procesar su producción. Esto le permite actuar con mayor rapidez, evitando o reduciendo la deshidratación de la fruta, minimizando las pérdidas y, especialmente en el caso de la fruta destinada a la exportación, clasificando la fruta para proteger mejor sus intereses [19].

Respecto a la temática del *packing*, según el estudio más detallado sobre el tema en Chile, se reconoce que la temática energética ha sido poco investigada en esta industria y que, en general, hay escasa investigación y desarrollo al respecto [18]. Dada esta situación, se identifica la importancia de recurrir a fuentes primarias para obtener información sobre el tema.

Existen numerosas empresas que se dedican a prestar servicios de *packing*, las cuales se denominan *packing* industrial y disponen de varias líneas de producción, túneles de preenfriamiento y cámaras frigoríficas para almacenamiento de corto y largo plazo dependiendo de la fruta. Respecto a plantas de *packing* predial que se integran con la producción agrícola, estas se justifican para frutas que son muy delicadas, con el fin de evitar daños por transporte, donde se reconocen a las siguiente especies [18]:

- Uva de mesa
- Cerezo
- Arándano
- Frambuesa

Productivamente, una planta de *packing* contempla en general los siguientes procesos:

1. Recepción de Fruta
2. Selección
3. Etiquetado y Embalaje
4. Paletizado
5. Prefrío
6. Almacenamiento

A continuación, el esquema de la figura 2.11 presenta un esquema general de los procesos de una planta de *packing* de media complejidad:

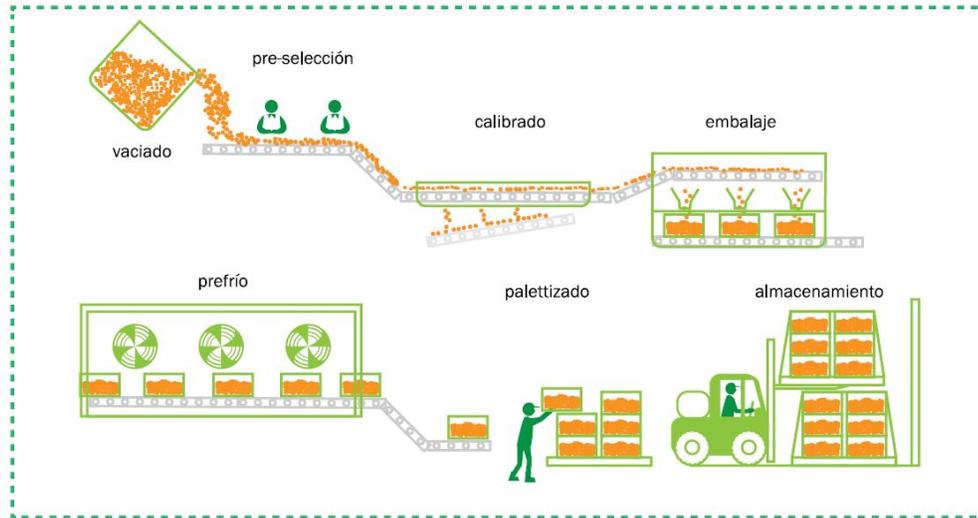


Figura 2.11: Esquema general de una línea de empaquetamiento de media complejidad. Fuente: Obtenido de [18].

Se reconocen también líneas de mayor complejidad para frutas como manzanas y peras, incluyendo procesos térmicos adicionales como lavado, secado, pulido y encerado. Sin embargo, de acuerdo con fuentes primarias consultadas [20], debido a que por lo general estas frutas menos delicadas tienen alto tiempo de almacenamiento, no se justifica la existencia de un *packing* predial para estas, sino que se procesan en plantas de *packing* industriales,

2.1.5. Tarifas eléctricas

En el sistema eléctrico chileno, los consumidores se dividen en diferentes categorías según su capacidad conectada y el régimen bajo el cual adquieren la energía. A continuación, se detallan las características y potencias de los tipos de clientes [21]:

Clientes regulados: Son consumidores finales con una potencia conectada menor a 500 kW. Estos clientes están en sectores donde el mercado tiene características de monopolio natural y, por ende, están sujetos a la regulación de precios mediante tarifas eléctricas.

Clientes libres: Son consumidores finales con una potencia conectada superior a 5000 kW. Estos clientes pueden negociar precios directamente con las empresas generadoras de energía y no están sujetos a la regulación de precios.

Además, la normativa establece que los clientes con una potencia conectada entre 500 kW y 5000 kW pueden elegir a cuál régimen adscribirse por un período de cuatro años.

Respecto a un cliente agrícola, por lo general se trata de clientes regulados, debido a la dificultad de tener un consumo mayor a 500 [kW] y poder optar a ser cliente libre. En esta condición, el cliente agrícola tiene la libertad de escoger la alternativa tarifaria que mejor se acomode a su consumo eléctrico [9]. A continuación se presenta un resumen de las condiciones necesarias y los cargos que se consideran en las diferentes tarifas que existen en el sistema de distribución chileno.

2.1.5.1. Tarifa BT1

Corresponde a la opción tarifaria más fácil de evaluar, ya que solo requiere de un medidor simple de energía. Podrán acceder a esta opción tarifaria únicamente aquellos clientes con una potencia conectada inferior a 10 [kW]. Se compone de los siguientes cargos:

Cargo	Descripción	Unidad
Cargo fijo mensual	Cobro fijo mensual independiente del consumo	[\$/mes]
Cargo único por uso troncal	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por servicio público	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por energía base	Precio unitario de energía por consumo base	[\$/kWh]
Cargo por energía adicional de invierno	Cargo extra aplicado de mayo a septiembre a la energía que excede el límite de invierno	[\$/kWh]

Tabla 2.2: Cargos por tarifa BT1 [22] [23].

2.1.5.2. Tarifa BT2 / AT2

En esta opción también se considera la potencia contratada del cliente. La tarifa se compone de los siguientes cargos:

Cargo	Descripción	Unidad
Cargo fijo mensual	Cobro fijo mensual independiente del consumo	[\$/mes]
Cargo único por uso troncal	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por servicio público	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por energía	Precio por unidad de energía consumida	[\$/kWh]
Cargo por potencia contratada	Precio por unidad de potencia por kW contratados.	[\$/kW/mes]

Tabla 2.3: Cargos por tarifa BT2 / AT2 [22] [23].

2.1.5.3. Tarifa BT3 / AT3

En esta tarifa se toma en cuenta la demanda máxima registrada durante el mes, y está disponible para clientes que cuenten con un medidor simple de energía y de demanda máxima. Se compone de los siguientes cargos:

Cargo	Descripción	Unidad
Cargo fijo mensual	Cobro fijo mensual independiente del consumo	[\$/mes]
Cargo único por uso troncal	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por servicio público	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por energía	Precio por unidad de energía por consumo total	[\$/kWh]
Cargo por demanda máxima	Será cobrado el valor mayor de los siguientes puntos: 1. Demanda máxima de facturación por precio por unidad de potencia. 2. Se considera el 40 % del mayor de los cargos por demanda máxima de los últimos 12 meses.	[\$/kW/mes]

Tabla 2.4: Cargos por tarifa BT3 / AT3 [22] [23].

2.1.5.4. Tarifa BT4 / AT4

Esta opción tarifaria incorpora la potencia máxima tanto dentro como fuera del horario de punta, ofreciendo diversas alternativas para medir estas últimas, las cuales se detallan a continuación. Al respecto, se definen estas horas de la siguiente manera:

Horario Punta: entre las 18:00 y las 22:00 horas desde el 01 de abril hasta el 30 de septiembre [23].

Tarifa BT4.1 / AT4.1

Se incluyen la demanda máxima contratada en horas punta y la demanda máxima contratada en general, por lo que se requiere un medidor simple de energía y un dispositivo que permita controlar los niveles máximos de potencia tanto en horario normal como en horas punta. Esta tarifa se compone de los siguientes cargos:

Cargo	Descripción	Unidad
Cargo fijo mensual	Cobro fijo mensual independiente del consumo	[\$ /mes]
Cargo único por uso troncal	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$ /kWh]
Cargo por servicio público	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$ /kWh]
Cargo por energía	Precio por unidad de energía por consumo total	[\$ /kWh]
Cargo por demanda máxima contratada	Precio por unidad de potencia por kW contratados fuera de punta	[\$ /kW /mes]
Cargo por demanda máxima contratada en horas de punta	Precio por unidad de potencia por kW contratados en horas de punta, se factura todos los meses	[\$ /kW /mes]

Tabla 2.5: Cargos por tarifa BT4.1 / AT4.1 [22] [23].

Tarifa BT4.2 / AT4.2

Se incluyen la demanda máxima contratada fuera de horas punta, y la demanda máxima registrada en horas punta. Por lo tanto, para acceder a esta tarifa se requiere un medidor simple de energía y de demanda máxima en horas punta, además de un limitador de potencia para no exceder la potencia máxima contratada. Esta tarifa se compone de los siguientes cargos:

Cargo	Descripción	Unidad
Cargo fijo mensual	Cobro fijo mensual independiente del consumo	[\$ /mes]
Cargo único por uso troncal	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$ /kWh]
Cargo por servicio público	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$ /kWh]
Cargo por energía	Precio por unidad de energía consumida	[\$ /kWh]
Cargo por demanda máxima contratada	Precio por unidad de potencia contratada fuera de horas punta	[\$ /kW /mes]
Cargo por demanda máxima leída en horas de punta	De abril a septiembre: Precio unitario de potencia por kW máximo medido en horas punta. De octubre a marzo: Precio unitario de potencia basado en el promedio de las dos demandas más altas registradas en los meses de horario de punta del periodo inmediatamente anterior.	[\$ /kW /mes]

Tabla 2.6: Cargos por tarifa BT4.2 / AT4.2 [22] [23].

Tarifa BT4.3 / AT4.3

Se incluyen la demanda máxima suministrada por la distribuidora correspondiente, y la demanda máxima registrada en horas punta. Por lo tanto, para acceder a esta tarifa se requiere un medidor simple de energía, de demanda máxima y de demanda máxima en horas punta. Esta tarifa se compone de los siguientes cargos:

Cargo	Descripción	Unidad
Cargo fijo mensual	Cobro fijo mensual independiente del consumo	[\$/mes]
Cargo único por uso troncal	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por servicio público	Cobro en proporción al consumo de energía	[\$/kWh]
Cargo por energía	Precio por unidad de energía consumida	[\$/kWh]
Cargo por demanda máxima suministrada	Precio unitario de potencia promedio de las dos demandas más altas registradas en los últimos 12 meses, incluyendo el mes actual	[\$/kW/mes]
Cargo por demanda máxima leída en horas de punta	De abril a septiembre: Precio por unidad de potencia en kW medida durante horas punta. De octubre a marzo: Precio unitario de potencia basado en el promedio de las dos demandas más altas registradas en los meses anteriores en horario de punta.	[\$/kW/mes]

Tabla 2.7: Cargos por tarifa BT4.3 / AT4.3 [22] [23].

2.1.6. Net Billing

La instalación de paneles fotovoltaicos para clientes regulados se rige por la Ley 20.571, que permite la autogeneración de energía eléctrica mediante Energías Renovables No Convencionales (ERNC) y cogeneración eficiente. Esta ley, conocida como Net-Billing, otorga a los usuarios de la red eléctrica el derecho a vender sus excedentes de energía a la distribuidora a un precio regulado [24].

La Ley 21.118, aprobada en 2018, modifica la ley de Net-Billing cuyo objetivo es fomentar la generación de energía para clientes regulados. Esta ley amplía la capacidad permitida de instalación, pasando de 100 kW a 300 kW de capacidad nominal [25]. Además, el descuento aplicado a los excedentes en la boleta mensual abarca todos los cargos impuestos por la distribuidora, no solo el costo de la energía, como ocurría bajo la Ley 20.571. A continuación, la figura 2.12 presenta de manera gráfica como se ve la relación entre las curvas de generación solar y demanda eléctrica, además del concepto de excedente:

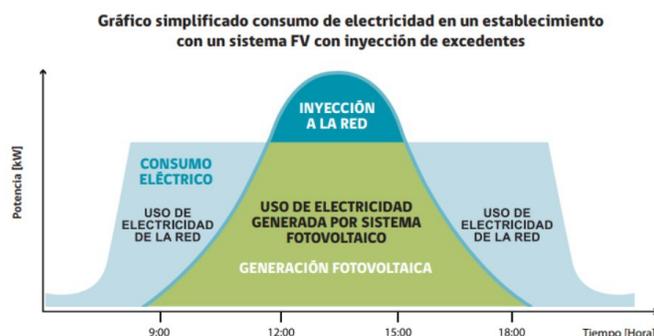


Figura 2.12: Gráfico simplificado de relación entre curvas de generación solar y demanda eléctrica. Fuente: Obtenido de [26].

2.2. Estado del arte

2.2.1. Sistemas agrivoltaicos

La información presentada en esta subsección fue obtenida de Fraunhofer Chile [27], organización que ha demostrado ser pionera en impulsar el desarrollo agrivoltaico en Chile. El concepto agrivoltaico surge en Alemania en 1982 y tiene como objetivo principal combinar la generación de electricidad en un mismo terreno donde haya producción agrícola. Esto se logra mediante la instalación de paneles fotovoltaicos sobre los cultivos, lo cual genera como ventaja más evidente que permite el doble uso de suelo. El esquema general y las principales ventajas para los cultivos se pueden observar en la figura 2.13:

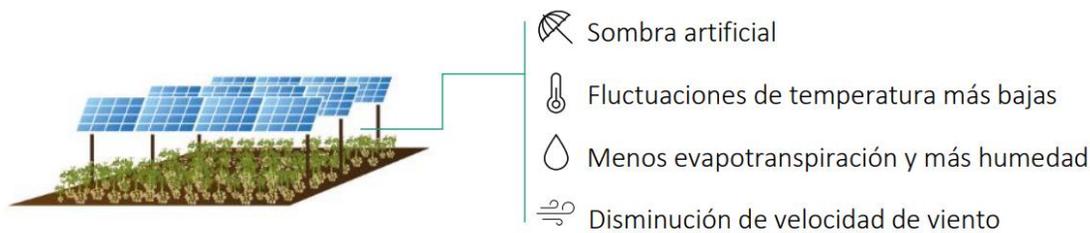


Figura 2.13: Esquema general y principales ventajas para cultivos de un sistema agrivoltaico. Fuente: Obtenido de [27].

Además de las numerosas ventajas que pueden significar estos sistemas para los cultivos, este análisis se centra en reconocer su potencial para el consumo energético del predio. Al respecto, se comenta como la generación de electricidad local puede generar importantes ahorros en los costos de la electricidad. De acuerdo con la normativa actual se espera realizar una conexión de este sistema a la red mediante Ley Net-Billing. Asimismo, se vuelve a reconocer la posibilidad de satisfacer el consumo energético asociado al riego, además de presentar el siguiente resumen de posibles sinergias entre alimento, agua y energía según la figura 2.14:

 Alimentos	 Agua	 Energía
<ul style="list-style-type: none">• “Configuración” de microclima ideal para crecimiento de los cultivos• Protección contra golpes de sol y quemaduras• Descarbonización de la agricultura• Infraestructura para aplicaciones de agricultura inteligente	<ul style="list-style-type: none">• Uso más eficiente de agua de irrigación• Energía limpia para bombeo y tratamiento de agua• Posibilidad de multi uso de agua: limpieza de paneles y riego	<ul style="list-style-type: none">• Nuevos terrenos para instalar capacidad FV• Aumento de eficiencia FV por temperaturas bajas• Aumento de ganancia bifacial por albedo elevado

Figura 2.14: Resumen de sinergias entre alimento, agua y energía. Fuente: Obtenido de [27].

Fraunhofer Chile ha instalado tres plantas pilotos en la Región Metropolitana, con el fin de estudiar sus impactos en el cultivo de hortalizas [7], las cuales han tenido resultados prometedores y consistentes con las principales ventajas identificadas en la figura 2.13. A continuación, la figura 2.15 presenta la planta instalada en Lampa:



Figura 2.15: Planta piloto de Fraunhofer instalada en Lampa. Fuente: Obtenido de [6].

Por otro lado, respecto al uso de este tipo de tecnologías a nivel comercial, en el informe consultado [27] se identifican una amplia variedad de sistemas instalados en el mundo para diferentes tipos de cultivos, como muestra la figura 2.16 ¹:



APV en la viticultura (Francia)¹⁰



APV en la horticultura (Japon)¹¹



APV con arroz abajo (China)¹²



APV con trigo abajo (Italia)¹³



APV en la fruticultura (NL)¹⁴



APV en pastizales (Alemania)¹⁵

Figura 2.16: Resumen de ejemplos de sistemas agrivoltaicos en el mundo. Fuente: Obtenido de [27].

¹ 10 <https://sunagri.fr/>

11 Nagashima (2019). Solar Sharing for Both Food and Clean Energy Production.

12 <https://zhuanlan.zhihu.com>

13 <https://remtec.energy/>

14 <https://www.baywa-re.com/>

15 <https://www.next2sun.de/>

2.2.2. Tractores eléctricos

Se define un vehículo eléctrico (VE) como aquel que puede ser impulsado por un motor eléctrico, que obtiene energía de una batería y que puede recargarse desde una fuente externa [28]. En esta línea, los tractores eléctricos son máquinas agrícolas que emplean electricidad como fuente de energía, en lugar de su consumo convencional de combustibles fósiles como el diésel o la gasolina.

Si bien trata de una tecnología reciente, marcas reconocidas del sector como John Deere y Kubota han estado trabajando en prototipos de tractores eléctricos [29]. Mientras tanto, la empresa alemana Fendt [30] y la empresa norteamericana Monarch ya cuentan con tractores eléctricos para fines comerciales [30] [31]. A continuación, la figura 2.17 presenta sus productos Fendt e100 V Vario y Monarch MK-V:



Figura 2.17: Tractores eléctricos Fendt e100 V Vario y Monarch MK-V.
Fuente: Obtenido de [30] [31].

Se pueden reconocer las siguientes ventajas sobre el uso de tractores eléctricos [31] con respecto a los tractores convencionales:

- **Reducción de emisiones de carbono:** Utilizar un motor eléctrico no genera emisiones de carbono, lo cual no solo representa una ventaja para el medio ambiente. La Agencia de Protección Ambiental (EPA) indica que los motores diésel emiten contaminantes que contribuyen al ozono troposférico, el cual también es dañino para cultivos, árboles y diversas formas de vegetación.
- **Reducción de costos de combustible:** Los agricultores solo necesitan pagar por la electricidad consumida para la recarga de la batería en lugar de gastar en diésel.
- **Reducción de costos de mantenimiento:** Al haber menos piezas en el motor, los tractores eléctricos ayudan a reducir los costos de mantenimiento al no requerir cambios de aceite ni filtros de aire. Estos tractores poseen sistemas simplificados en comparación con los sistemas convencionales de escape, inyección y transmisión, lo que resulta en menos piezas móviles que necesitan mantenimiento.
- **Reducción de ruido:** Los motores eléctricos son más silenciosos, lo que beneficia tanto a los operadores como a quienes trabajan en el predio agrícola.

Sin embargo, también se deben considerar ciertas preocupaciones de los agricultores al momento de confiar en un tractor eléctrico. En primer lugar, la potencia de trabajo del modelo eléctrico debe ser suficiente para cumplir con las labores que realiza el tractor convencional. En segundo lugar, el alto costo inicial de un tractor eléctrico es otro factor que genera preocupación en los agricultores. En tercer lugar, se debe considerar que la duración de la batería y los tiempos de carga deben ser compatibles con las jornadas requeridas [31].

Respecto a las baterías, con el continuo avance de la tecnología, tanto en el ámbito agrícola como en otros sectores, se proyecta que se siga innovando en este tema. Estas innovaciones podrían proporcionar una vida útil más prolongada para tractores eléctricos, una carga más eficiente y una mayor densidad energética. Por ejemplo, las baterías de estado sólido están siendo evaluadas como una posible alternativa a las baterías de iones de litio, sin embargo, es una tecnología que sigue en estado de desarrollo [32].

Cómo último punto a mencionar en esta sección, se puede comentar que en el contexto de Chile, Dercomaq presentó el primer tractor eléctrico al mercado chileno, correspondiendo al modelo Farmtrac FT25G [33]. Este modelo tiene una potencia de trabajo de 25 HP y es producido por la marca Farmtrac, firma europea reconocida internacionalmente. Al respecto, cabe reconocer que una limitante de este tractor es que tiene una baja potencia de trabajo para algunas labores requeridas en el rubro agrícola [17]. A continuación, la figura 2.18 presenta el modelo de este tractor:



Figura 2.18: Primer tractor eléctrico del mercado chileno: Farmtrac FT25G.
Fuente: Obtenido de [33].

Capítulo 3

Metodología

Como metodología se plantean una serie de pasos a seguir y actividades a realizar para cumplir con los objetivos específicos que se desprenden del objetivo general. A continuación, el diagrama de la figura 3.1 resume estos pasos y la metodología empleada en este trabajo:

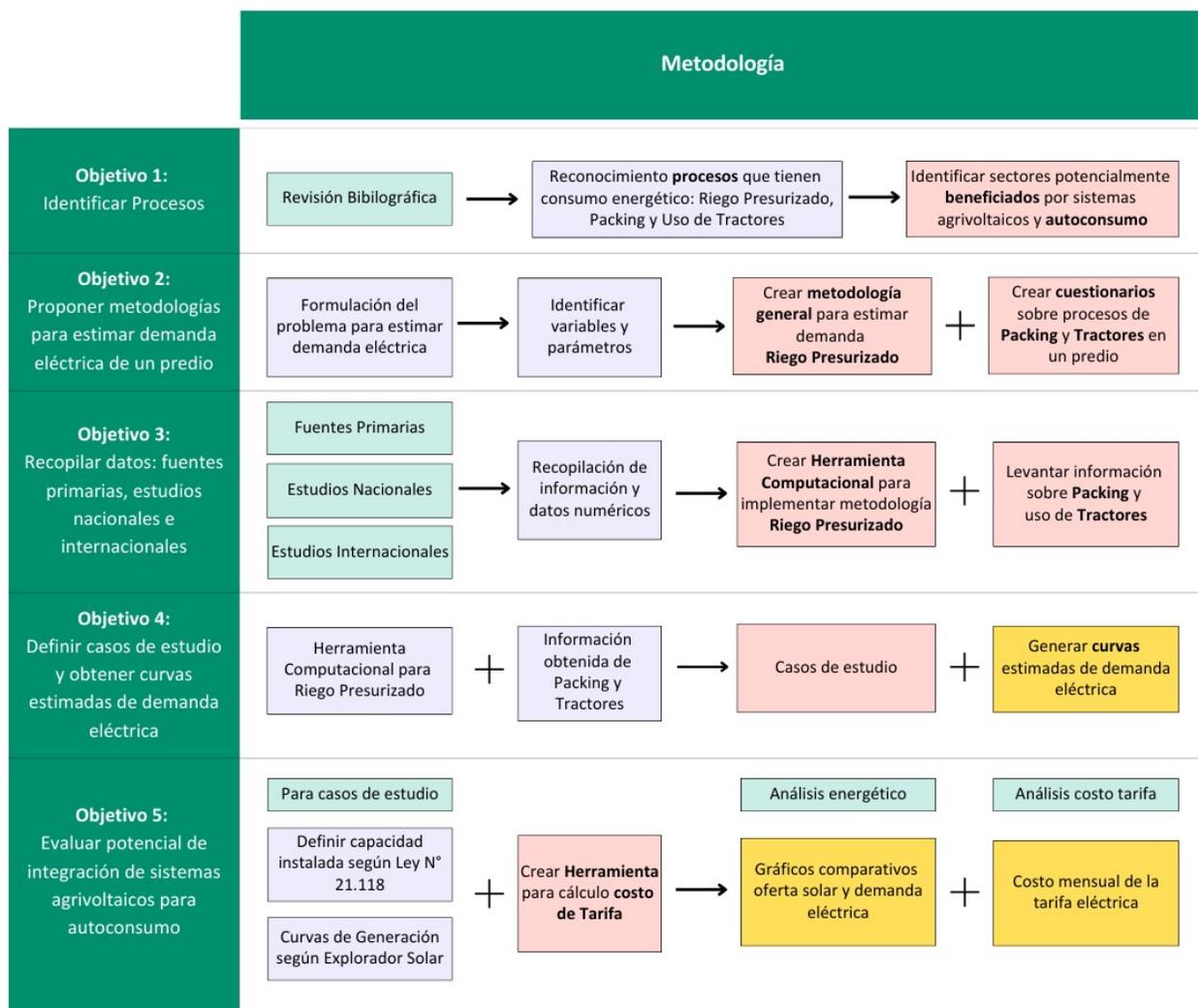


Figura 3.1: Diagrama de la metodología.

Como se puede apreciar en el diagrama, esta metodología se organiza en 5 etapas, donde cada etapa representa un objetivo específico del trabajo. Dentro de cada etapa, se pueden reconocer pasos clave para el cumplimiento de cada objetivo específico, los cuales se ven representados por bloques. Para una mejor comprensión de cómo se desarrolla cada etapa y los pasos necesarios en la metodología, a continuación se presenta una explicación detallada de cada paso, dividiendo esta sección en una explicación para cada etapa:

3.1. Identificación de procesos

En primer lugar, para cumplir con el objetivo específico de identificar los principales procesos que consumen energía en un predio agrícola, se lleva a cabo una revisión bibliográfica del sector agrícola chileno y sus necesidades energéticas. A medida que se identifican los diferentes procesos que pueden ocurrir en un predio agrícola, se puede comprender cuáles tienden a tener un mayor consumo energético y, por lo tanto, podrían beneficiarse más de contar con una fuente de generación local para satisfacer su demanda eléctrica. En este contexto, se busca identificar los sectores que se verían más beneficiados por la implementación de un sistema agrivoltaico para autoconsumo, considerando las características del sector agrícola chileno y su consumo energético.

3.2. Proponer metodologías para estimar la demanda eléctrica de un predio

En segundo lugar, se establece el objetivo específico de proponer una metodología para estimar la demanda eléctrica de un predio agrícola. Una vez identificados los procesos que consumen energía, se buscan maneras de estimar su consumo eléctrico. Se reconoce como principal desafío y limitante de este trabajo la falta de información y datos numéricos, una dificultad que ha sido identificada en los estudios consultados que incluyen la temática del consumo energético del sector agrícola. Por ejemplo, la Comisión Nacional de Riego (CNR) señala que en Chile no se cuenta con datos públicos sobre los niveles de consumo de energía en el sector agrícola, lo cual se atribuye a la complejidad de la recopilación de datos y la gran variabilidad de métodos de riego, cultivos y climas [9]. Asimismo, la Cámara Chileno-Alemana de Comercio e Industria (CAMCHAL) exploró medidas de eficiencia energética en el sector agrícola, reconociendo la ausencia de datos de consumo energético a nivel de procesos como la principal dificultad del estudio [8].

En vista de este panorama, esta investigación propone una formulación del problema para estimar la demanda eléctrica de un predio agrícola. Reconociendo en el marco teórico al riego presurizado como el proceso que mayor energía demanda en el sector agrícola chileno, se procede a identificar las variables y parámetros necesarios para abordar este problema. Posteriormente, se desarrolla una metodología general para estimar la demanda eléctrica del riego presurizado en un predio agrícola, utilizando relaciones y fórmulas matemáticas que integran estas variables y parámetros.

A modo de extensión de la posible demanda eléctrica de un predio, se considera el *packing*, que, en caso de ser predial, también representaría un consumo significativo. Para los procesos asociados a una planta de *packing*, se identifica la necesidad de recurrir a fuentes primarias para obtener datos de consumo energético. Por consiguiente, este trabajo contempla una

visita a terreno a la planta de *packing* de cerezos de Frutitta Services, ubicada en Peor es Nada, Chimbarongo, donde se entrevista a Luis Rodríguez, maestro de máquinas. Con el fin de estimar la demanda eléctrica asociada a los consumos del *packing*, se diseña un cuestionario para recopilar la información necesaria.

Como última extensión de la posible demanda eléctrica de un predio, se explora la futura posibilidad de utilizar tractores eléctricos para reemplazar los tractores diésel. Para lograr esto, se identifica nuevamente la necesidad de recurrir a fuentes primarias para comprender los procesos que demandan maquinaria agrícola, su estacionalidad e intensidad. Por consiguiente, este trabajo contempla una segunda visita a terreno al fundo Agrícola El Laurel, ubicado en Teno, donde se tienen aproximadamente 50 hectáreas para el cultivo de cerezos. El entrevistado es Juan Pablo Prado, administrador de este predio agrícola. Para comprender el uso de tractores en el predio, se diseña un cuestionario con preguntas para comprender cada proceso y por lo tanto, su consumo energético. Asimismo, se propone una metodología que, ocupando la información sobre las lógicas de uso de los tractores diésel, permite obtener una demanda eléctrica estimada en función de un tractor eléctrico que cumple con los requisitos de las labores realizadas.

3.3. Recopilación de datos numéricos e información

Como tercer objetivo específico, se establece la importancia de recopilar información de múltiples fuentes a medida que se van generando nuevas preguntas durante la investigación. Estas fuentes contemplan: fuentes primarias, estudios nacionales e internacionales. En relación con el riego presurizado, una vez que se cuenta con una metodología para estimar su demanda eléctrica, es necesario recopilar la información requerida para aplicarla. Para implementar esta metodología, se desarrolla una herramienta computacional en Excel que integra las variables identificadas y permite el ingreso de *inputs* específicos para el caso de estudio que se desee evaluar.

Respecto al *packing*, este trabajo resume la información recopilada sobre el tema, incluyendo los datos obtenidos en terreno relacionados con los consumos de los procesos identificados. En cuanto al uso de maquinaria agrícola y la eventual integración de tractores eléctricos en el sector agrícola chileno, se presentan de manera general los procesos que requieren el uso de tractores para el cultivo de frutales. Además, se incluye la información recopilada en terreno sobre las fechas, máquinas necesarias, potencia asociada, frecuencia y horario de uso para cada uno de estos procesos. Finalmente, se proporciona información sobre un tractor eléctrico comercializado actualmente que cumple con las condiciones para reemplazar las labores requeridas por este huerto de frutales.

3.4. Definición de casos de estudio y obtención de curvas de demanda eléctrica

Una vez recopilados los datos y teniendo la información disponible, el cuarto objetivo específico es definir casos de estudio para la posterior obtención de curvas de demanda eléctrica estimada, utilizando la herramienta computacional creada, además de la información obtenida en terreno sobre el *packing* y los tractores. La herramienta computacional se crea

para la obtención de una curva de demanda eléctrica de 8760 datos con resolución horaria, mediante la cual también se puede sumar hacia una resolución mensual. Se propone estimar el consumo energético con resolución mensual para los casos de estudio definidos, además de estimar curvas con resolución horaria para días representativos. Dependiendo del caso de estudio y la estacionalidad de los consumos, habrán fechas donde el consumo energético sea más intensivo, y se busca poder analizar esto de manera gráfica.

3.5. Evaluación potencial de integración sistemas agrivoltaicos para autoconsumo

Como último objetivo, se busca evaluar el potencial de integración de sistemas agrivoltaicos en los casos de estudio, con un enfoque en el autoconsumo. Para ello, se puede definir una capacidad instalada conforme a la Ley N°21.118 y utilizar la herramienta Explorador Solar para obtener la energía generada según la ubicación seleccionada, generando curvas de oferta solar. De esta manera, al tener curvas de demanda eléctrica asociadas al predio y curvas de generación solar, es posible realizar un análisis energético comparando el comportamiento de las curvas y la relación entre la oferta y la demanda energética. Además, se puede analizar cómo se vería afectado el costo de la tarifa eléctrica al contar con un sistema agrivoltaico de generación local. Dado que el riego presurizado es el consumo más probable en un predio agrícola con un consumo eléctrico considerable, se evalúa este proceso por separado. Posteriormente, considerando las curvas de demanda eléctrica generadas para el packing y el uso de tractores eléctricos, se explora cómo influiría la inclusión de estos procesos en la realidad del caso de estudio con riego presurizado que integre sistemas agrivoltaicos.

Capítulo 4

Análisis general consumo energético sector agrícola

Ante la gran diversidad de cultivos y prácticas que existen en el sector agrícola chileno, en este capítulo se realiza un análisis general del consumo energético de éste, con el fin de identificar oportunidades de donde conviene enfocar los esfuerzos de este trabajo. Como intuición, se busca el estudio de predios agrícolas cuyo consumo energético sea considerable y se puedan evaluar las sinergias de integrar un sistema agrivoltaico para el autoconsumo.

De acuerdo con la figura 2.2, se identifica al riego como aquel proceso que demanda mayor energía en un predio agrícola, sin embargo, este no necesariamente va a tener un consumo de energía asociado, en caso de que el predio cuente con riego gravitacional [11]. Ante esto, a continuación se analizan las tendencias en los métodos de riego en Chile.

4.1. Sistemas de riego

Aquellos cultivos que incorporen sistemas de riego presurizados son de interés para este trabajo, debido a que tienen un consumo eléctrico asociado. Por consiguiente, se puede observar la evolución de la distribución de sistemas de riego en Chile durante los últimos años, en base a la información obtenida del VII y VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal. A continuación, las figuras 4.1 y 4.2 presentan respectivamente la distribución nacional de métodos de riego y distribución regional de superficie regada para el año 2007:

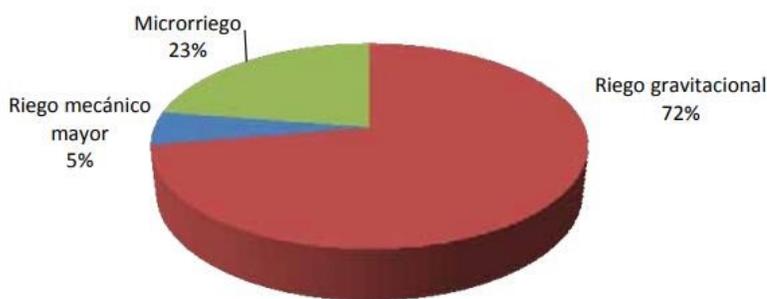


Figura 4.1: Distribución nacional de métodos de riego 2007. Fuente: Obtenido de [34].

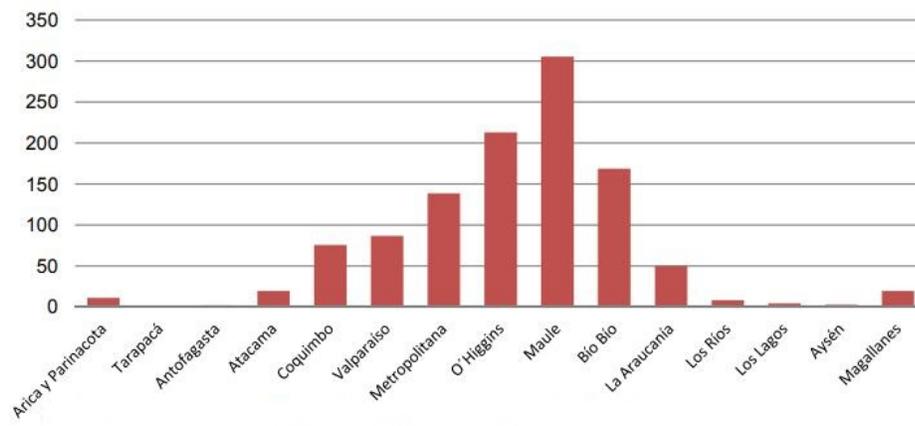


Figura 4.2: Distribución regional de superficie regada 2007. Fuente: Obtenido de [34].

Se puede notar que anteriormente predominaba el riego gravitacional, cuyo consumo energético es considerablemente inferior a los demás tipos de riego². Además, se puede apreciar que las regiones de la zona central de Chile son aquellas que tienen la mayor cantidad de superficie regada, representando de esta manera una oportunidad para encontrar predios con tecnificación del riego. Respecto a los métodos de riego para el siguiente censo durante el año agrícola 2020-2021 (VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal) se obtiene la figura 4.3:

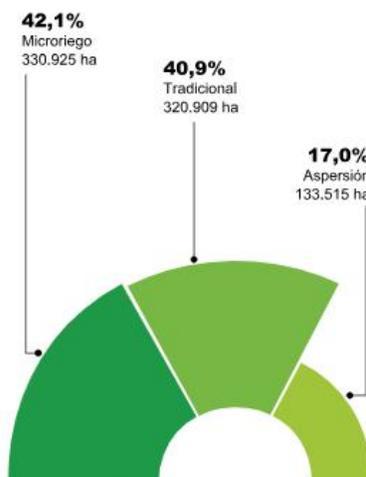
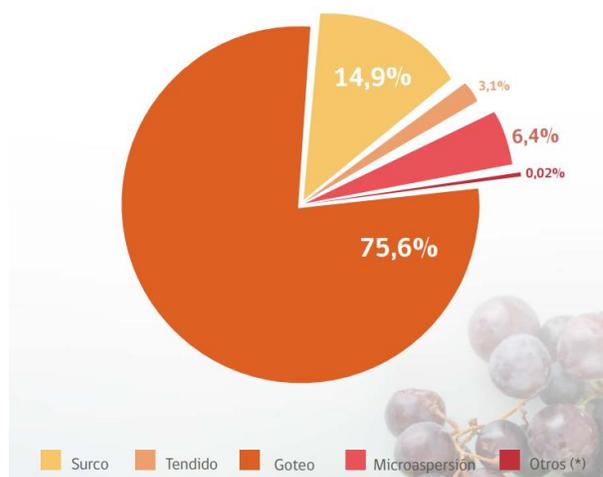


Figura 4.3: Distribución nacional de métodos de riego par año agrícola 2020-2021. Fuente: Obtenido de [35].

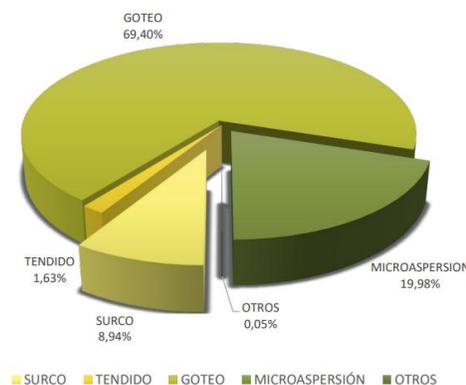
Se puede apreciar como el riego tecnificado ha tenido un aumento considerable entre ambos censos, lo cual se traduce en un aumento de la demanda eléctrica del sector agrícola. Sin embargo, aún hay un alto porcentaje asociado a riego no tecnificado, razón por la cual se recurre a otras fuentes de información para identificar oportunidades. En particular, se ha encontrado que en el sector frutícola, característico por la producción de frutas con fines de exportación [36] hay una industria con alto desarrollo y mayor tendencia a incorporar

² Al riego por goteo también se le conoce como microrriego.

riego tecnificado. Esta afirmación se puede verificar en los catastros frutícolas, presentando a continuación como ejemplos las regiones de O'Higgins y del Maule, debido a que estas se identificaron en la figura 4.2 como aquellas con mayor cantidad de hectáreas regadas. La figura 4.4 presenta la distribución porcentual de la superficie frutal por método de riego:



(a) Región de O'Higgins 2021 [37].



(b) Región del Maule 2022 [38].

Figura 4.4: Distribución porcentual de la superficie frutal por método de riego. Fuente: Obtenido de [37] y [38].

Respecto a estos métodos de riego, tiene sentido que para el cultivo de frutales se ocupe principalmente goteo, seguido por microaspersión, ya que son los métodos más eficientes. Por ejemplo, con el riego por goteo, solo se pierde aproximadamente un 10 % del agua [39], lo que permite irrigar más del doble de superficie con la misma cantidad de agua en comparación con el riego por tendido. La figura 4.5 muestra las eficiencias de aprovechamiento para distintos métodos:

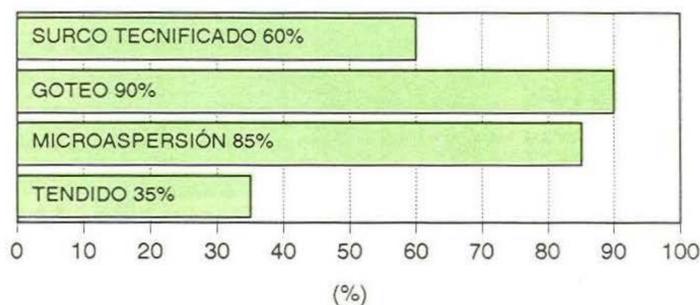


Figura 4.5: Eficiencia de aprovechamiento del agua para distintos métodos de riego. Fuente: Obtenido de [39].

Sin embargo, contar con estos métodos de riego representa mayores costos de inversión [39], lo cual explica que no se adopten tan ampliamente para otro tipo de cultivos que tienen menor grado de tecnificación. En esta misma línea, debido a que el sector frutícola representa la industria con mayor desarrollo del sector agrícola chileno, en cuanto a su alto nivel de tecnificación y su orientación hacia la exportación [36], se vuelve el sector de principal interés

de este estudio no solo por tener mayor consumo eléctrico. Asimismo, al ser una industria más desarrollada, es más esperable que en predios de frutales haya mayor interés en innovación e instalación de sistemas agrivoltaicos.

4.2. Riego presurizado en frutales

Como se vio en la sección anterior, en frutales predomina el riego por goteo y microaspersión. En estos métodos de riego se utilizan emisores que permiten que el agua fluya desde las tuberías laterales hacia las plantas en forma de gotas o aspersión. Estos emisores son conocidos como goteros o microaspersores, cuyas características se pueden ver en la figura 4.6:



Figura 4.6: Tipos de Emisores. Fuente: Obtenido de [40].

A continuación, la figura 4.7 presenta un esquema general de integrar un sistema fotovoltaico para abastecer la demanda de un sistema de riego presurizado, donde los equipos de bombeo son los equipos eléctricos que consumen energía:

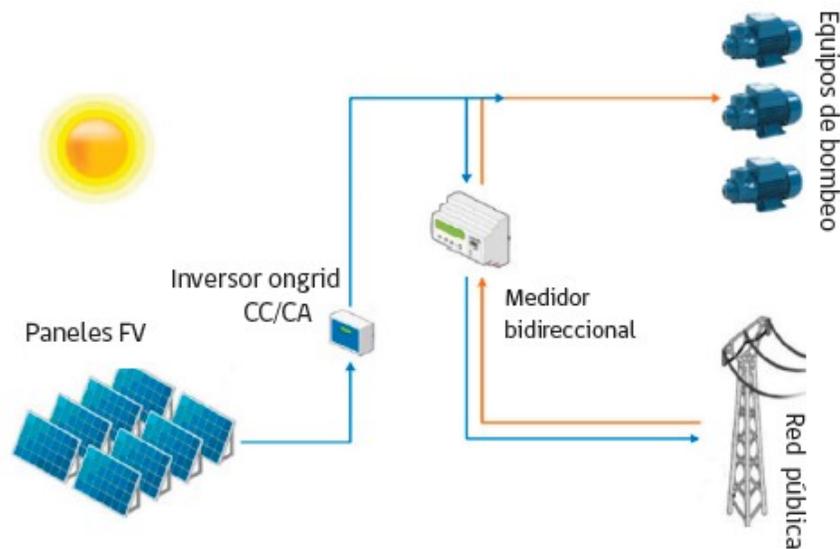


Figura 4.7: Esquema general sistema fotovoltaico integrado a equipos de bombeo. Fuente: Obtenido de [15].

4.3. Potencial agrivoltaico

De acuerdo con la información obtenida de Fraunhofer Chile, organización que ha demostrado ser pionera en impulsar el desarrollo agrivoltaico en Chile, se identifica a la zona central de Chile como una de particular interés debido a su alta demanda eléctrica y superficie dedicada a la agricultura, como muestra de manera gráfica la figura 4.8:

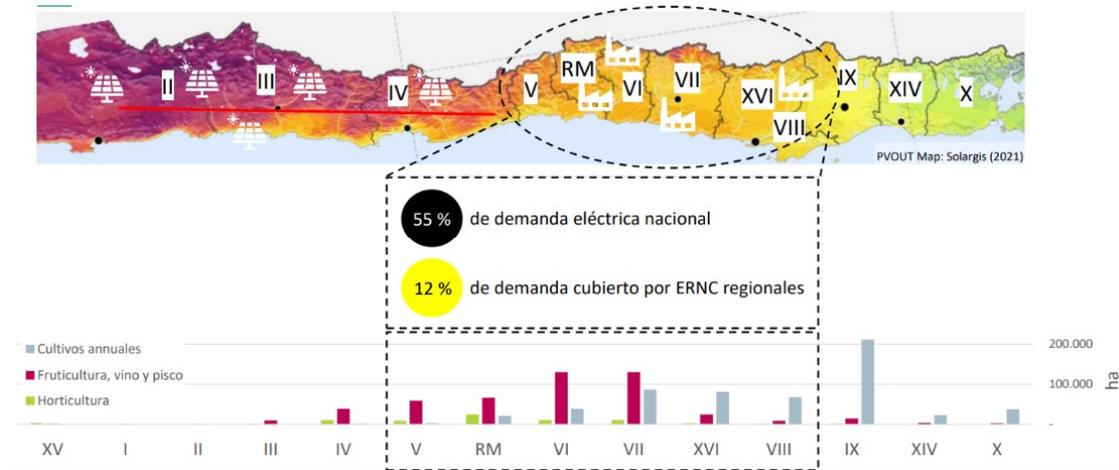


Figura 4.8: Demanda eléctrica y distribución agrícola de zona central de Chile. Fuente: Obtenido de [7].

En definitiva, de acuerdo con Fraunhofer Chile, el mayor potencial de integración de sistemas agrivoltaicos se identifica para la zona central de Chile [7], como muestra la imagen 4.9 :

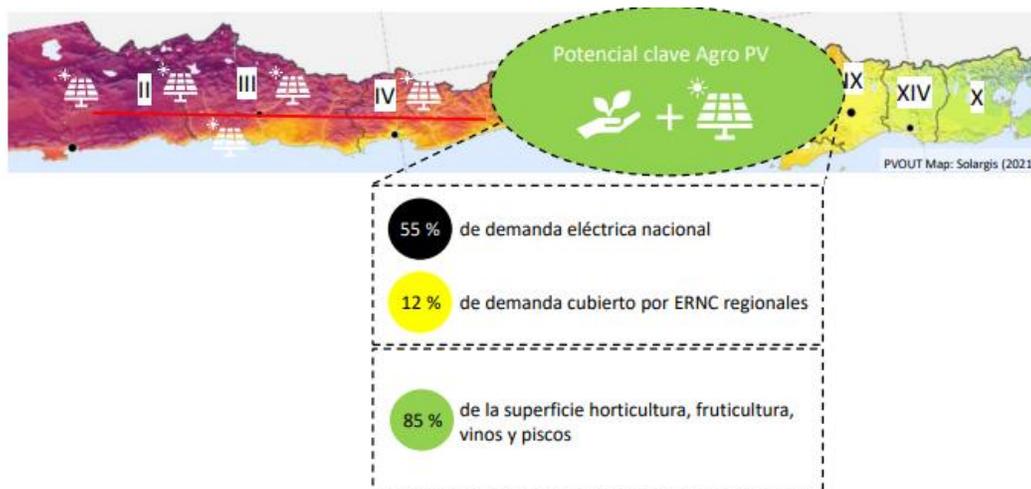


Figura 4.9: Potencial agrivoltaico de zona central de Chile. Fuente: Obtenido de [7].

Al respecto, se indica que la mayor parte de la superficie de esta zona se dedica al cultivo de horticultura, fruticultura, vino y pisco. Sin embargo, de acuerdo con la figura 4.8, entre la V Región y la VII Región la mayor superficie plantada se asocia a fruticultura, vino y pisco.

4.4. Reconocimiento sectores beneficiados por autoconsumo

Como se ha analizado en este capítulo, se reconoce al sector frutícola y a la zona central de Chile como potenciales beneficiarios de los sistemas agrivoltaicos y su generación local. Esta distinción se fundamenta, en primer lugar, en la tendencia de los frutales a utilizar riego presurizado, como se observa en la figura 4.4, y que, según la figura 4.1, la zona central es donde se encuentra la mayor cantidad de superficie regada. En segundo lugar, la zona central presenta el mayor potencial agrivoltaico, según el análisis realizado por Fraunhofer Chile, y al mismo tiempo, es la región con la mayor superficie destinada a la fruticultura.

En particular, se puede asociar al sector frutícola con un mayor consumo energético, debido a su importancia para la economía nacional, lo cual implica un mayor nivel de tecnificación e industrialización. Es notable que el 85 % de la fruta producida en Chile se exporta, mientras que solo el 15 % se destina al mercado nacional [18]. Los resultados de los volúmenes en millones de dólares (MUSD) exportados de fruta fresca para el año 2014 se pueden apreciar en la figura 4.10:

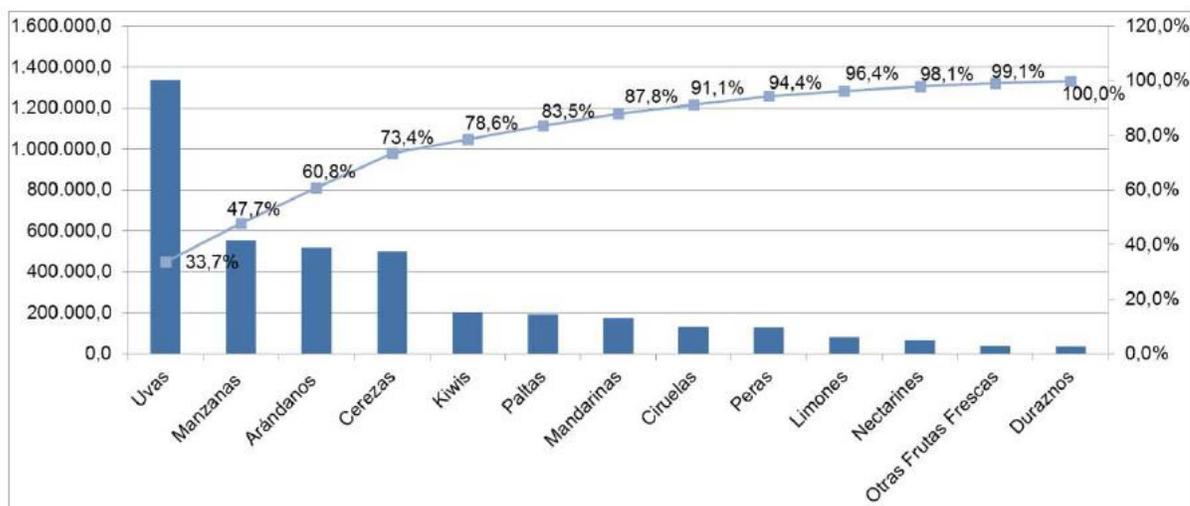


Figura 4.10: Distribución de exportaciones de fruta fresca (M USD/año).
Fuente: Obtenido de [18].

Finalmente, debido a la importancia de esta industria es que también se identifica al *packing* de fruta fresca como un proceso de alto consumo energético. Si bien no hay mucha información respecto a un *packing* predial, se pueden obtener ciertas intuiciones en base a la industria del *packing* en general, donde también se concentra la mayor cantidad de procesamiento de fruta en la zona central, como muestra la figura 4.11:

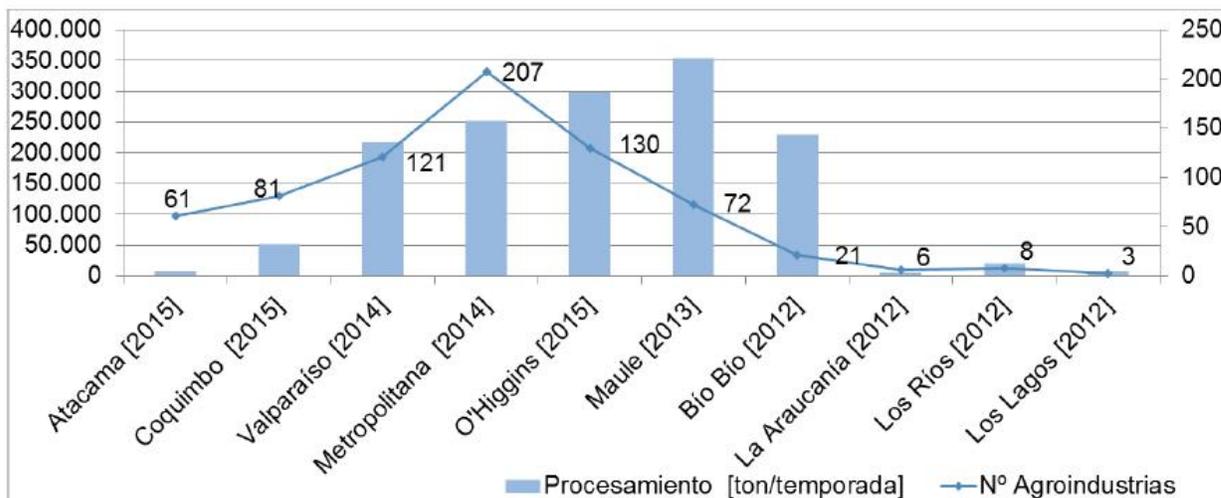


Figura 4.11: Distribución de toneladas producidas de fruta fresca. Fuente: Obtenido de [18].

Por consiguiente, en conclusión se identifican a la zona central y sector frutícola de Chile como aquellos de mayor interés para definir casos de estudio, tanto por la tendencia a haber un mayor consumo energético como por la identificación de un alto potencial para el desarrollo de sistemas agrivoltaicos.

4.5. Tamaño predios frutales

Como última sección de este capítulo, de acuerdo con los Catastros Frutícolas publicados por la Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), se puede obtener la distribución de tamaño de los huertos de frutales por región. A continuación, se presenta esta información de manera gráfica para aquellas regiones que concentran la mayor superficie plantada para fruticultura, de acuerdo con el mapa de 4.8:

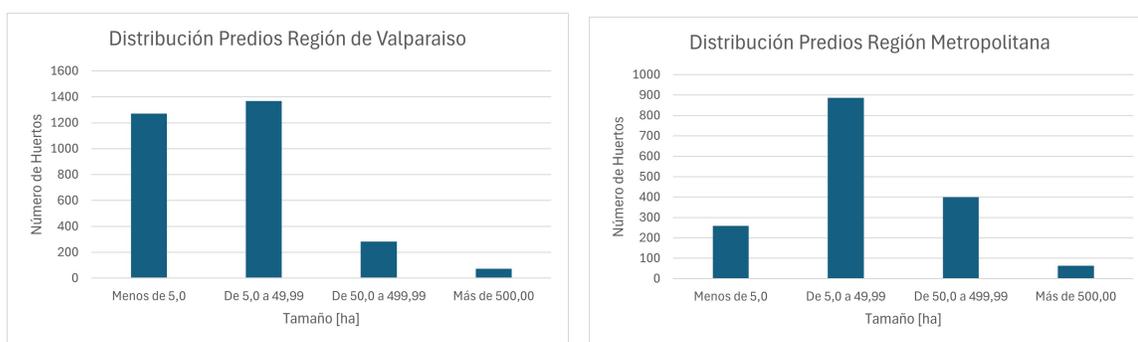


Figura 4.12: Distribución de huertos frutales Región de Valparaíso [41] y Región Metropolitana [42].

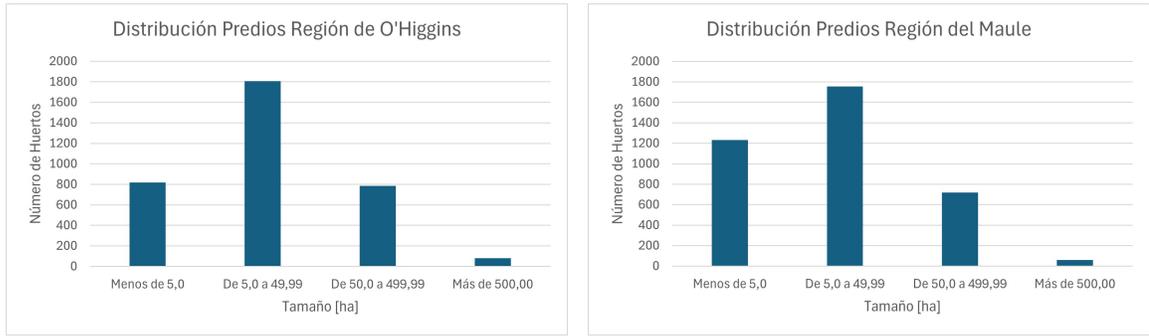


Figura 4.13: Distribución de huertos frutales Región de O'Higgins [37] y Región del Maule [38].

Como se puede observar en los gráficos, existe una tendencia similar en estas regiones para el cultivo de frutales, siendo la gran mayoría de los huertos de frutales de superficies menores a 50 hectáreas.

Capítulo 5

Consumo energético riego presurizado

5.1. Formulación del problema

El consumo eléctrico de un predio agrícola asociado a contar con un sistema de riego presurizado viene dado por el tiempo de uso de la electrobomba que alimenta el sistema. En el documento "Manual de Inspección y Revisión de Sistemas Fotovoltaicos"[43], elaborado por la Comisión Nacional de Riego y el Ministerio de Energía, se presenta la siguiente expresión para calcular la energía consumida:

$$E [kWh] = P \cdot T_r \cdot dias_{mes} \quad (5.1)$$

Donde las variables representan:

- **E**: Energía absorbida por la electrobomba durante un mes (kWh).
- **P**: Potencia eléctrica absorbida por el motor (kW).
- **T_r**: Horas de uso de la electrobomba al mes (h).
- **dias_{mes}**: Cantidad de días del mes.

A continuación, la tabla 5.1 muestra esta metodología aplicada a un caso de ejemplo:

Item energético/mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
(A) Potencia P en [kW] Pedrollo Cpm 170	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	-
(B) Horas de uso en riego diario [horas]	5	5	4	2	1	0	0	0	2	3	5	5	-
(C) Días del mes	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31	-
(AxBxC) Energía consumida-mes [kWh]	267	241	213	103	53	0	0	0	103	160	258	267	1.665

Tabla 5.1: Cálculo de consumo energético de riego tecnificado según ejemplo. Elaboración propia en base a [43].

En particular, se propone extender la metodología propuesta en este manual y desarrollar una metodología que permita estimar el consumo eléctrico de la electrobomba con diferentes resoluciones temporales: horaria, diaria y mensual.

La energía consumida por la electrobomba está directamente relacionada con el tiempo de uso necesario para el riego de los cultivos. Este tiempo de uso varía según el tipo de cultivo, las condiciones climáticas y la época del año. Por lo tanto, es fundamental contar

con una metodología que no solo calcule el consumo energético mensual, sino que también pueda ofrecer una visión del consumo a lo largo de diferentes épocas.

El riego consiste en la distribución adecuada y uniforme de agua en un perfil de suelo con el propósito de reponer el agua consumida por los cultivos entre dos riegos consecutivos. Para comprender adecuadamente la cantidad de riego necesaria y el patrón de riego para un cultivo específico durante el año, se identifica como mejor alternativa a la "Programación de Riego". Este procedimiento se basa en responder las dos siguientes preguntas [44]:

- ¿Cuánto regar?
- ¿Cuándo regar?

Respondiendo adecuadamente estas preguntas se obtiene una estimación precisa sobre el tiempo de riego a lo largo de un año y, por consiguiente, también se puede estimar el consumo eléctrico del predio agrícola. Dado que este método es ampliamente utilizado por agricultores y recomendado por la FAO [45], se concluye que es la manera más apropiada para abordar el problema de estimar el tiempo de uso de la electrobomba.

5.1.1. Programación de riego

En términos generales, la programación del riego se refiere a establecer tiempos y frecuencias de riego necesarias para regar un cultivo [44], con el fin de prevenir tanto la escasez como el exceso de agua en el suelo, los cuales pueden afectar su desarrollo. Ambos extremos impactan negativamente en la producción y la calidad de los frutos.

Para programar el riego, es esencial estimar tanto el consumo de agua de los cultivos como la capacidad de almacenamiento de agua del suelo en la zona explorada por las raíces del cultivo. En este proceso, intervienen principalmente:

- Condiciones del clima
- Características del cultivo
- Características del suelo
- Características del sistema de riego presurizado

Para facilitar la programación del riego, desde los años ochenta se han desarrollado estaciones meteorológicas y sistemas informáticos a nivel mundial que miden variables climatológicas e integran estos datos en modelos bio-matemáticos [46].

Cabe reconocer que esta tecnología ha tenido un notable impacto económico en el sector agrícola, mejorando significativamente la eficiencia del uso del agua y contribuyendo a aumentar la calidad y el rendimiento de los productos agrícolas destinados a la exportación [46]. Asimismo, en Chile también existen estaciones meteorológicas que facilitan la programación de riego [12], tema que se aborda con más detalle en la sección 5.2.1.

La figura 5.1 presenta un esquema general de la toma de decisiones en la programación de riego:



Figura 5.1: Esquema para la toma de decisiones en la programación de riego.
Fuente: Adaptado de [46].

A continuación, se analizan detalladamente todos los parámetros y variables que se consideran en este procedimiento.

5.2. Evapotranspiración del cultivo (demanda hídrica)

Para responder la primera pregunta sobre cuánto regar, se debe conocer la cantidad de agua que debe aplicarse al suelo para reponer tanto el agua absorbida por la planta como la evaporada. Para lograrlo, es necesario determinar la demanda hídrica del cultivo o la evapotranspiración [47].

La evapotranspiración se refiere a la suma de dos procesos distintos en los cuales el agua se pierde: a través de la evaporación en la superficie del suelo y mediante la transpiración de los cultivos [48].

La demanda hídrica de un cultivo en específico viene dada por la siguiente expresión [45]:

$$ET_c = ET_o \cdot K_c \quad (5.2)$$

Donde:

- **ET_c**: Evapotranspiración de cultivo o Demanda hídrica (mm/día).
- **ET_o**: Evapotranspiración de referencia (mm/día).
- **K_c**: Coeficiente de cultivo.

La evapotranspiración de cultivo se ocupa directamente en las ecuaciones para calcular las frecuencias y tiempos de riego. A continuación, se analizan las dos variables que componen la ecuación 5.2.

5.2.1. Evapotranspiración de referencia

La evapotranspiración de referencia (ET_o) se puede determinar utilizando datos meteorológicos. A partir de una consulta con expertos realizada en mayo de 1990, se recomienda ahora el método de FAO Penman-Monteith como el único método estándar para la definición y cálculo de la evapotranspiración de referencia [48]. Este método requiere medir datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento, y consiste en la siguiente expresión:

$$ET_o = \frac{0.480 \cdot \Delta(Rn - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T+273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0.34 \cdot U_2)} \quad (5.3)$$

Donde:

- ET_o : Evapotranspiración del cultivo de referencia (mm/día).
- R_n : Radiación neta en la superficie del cultivo (MJ/m^2).
- G : Flujo de calor del suelo (MJ/m^2).
- T : Temperatura diaria media ($^{\circ}C$).
- γ : Constante psicrométrica ($KPa/^{\circ}C$).
- U_2 : Velocidad del viento a 2 m del suelo (m/ s).
- $(e_s - e_a)$: Déficit de presión de vapor (KPa).
- Δ : Pendiente de la curva de presión de vapor ($KPa/^{\circ}C$).

La figura 5.2 presenta un diagrama del cálculo de la evapotranspiración de referencia y cultivo:

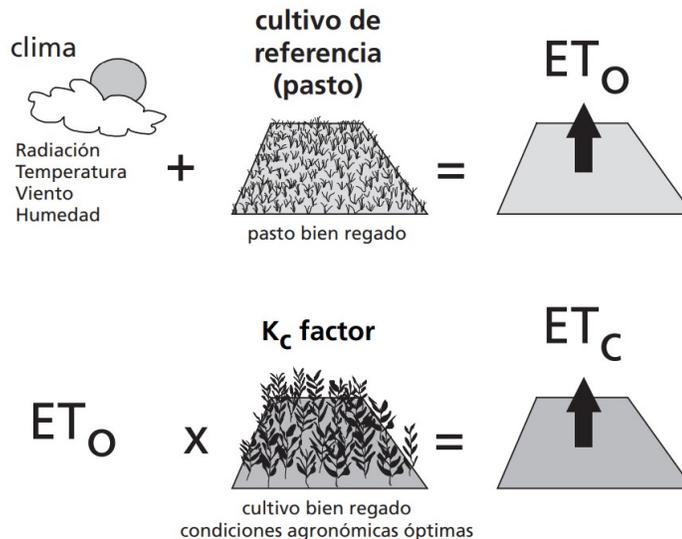


Figura 5.2: Diagrama del cálculo de la evapotranspiración de referencia y cultivo. Fuente: Obtenido de [48].

Como se puede observar, la evaporación de referencia se calcula considerando un cultivo hipotético de pasto bien regado. La ventaja de crear esta referencia es que es posible comparar los valores calculados de ETo en distintas localidades o en diferentes periodos del año, ya que se refieren a la evapotranspiración en la misma superficie de referencia [48].

Para obtener este parámetro, existen estaciones meteorológicas automáticas (EMA), que están equipadas con un radiómetro, un sensor de temperatura y humedad relativa, y un sensor para medir la dirección y velocidad del viento [45]. La figura 5.3 presenta una de estas estaciones:



Figura 5.3: Estación meteorológica automática (EMA). Fuente: Obtenido de [45].

Se puede acceder a la información de estas estaciones a través de la página web <https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/> [12], dispuestas por el Instituto de Investigaciones Agropecuarias (INIA). Como se puede apreciar en la interfaz de la figura 5.4, existen diferentes estaciones meteorológicas disponibles desde las cuales se puede descargar la información registrada. Sin embargo, es importante mencionar que para la utilización de esta información se debe considerar que para algunas estaciones pueden haber días sin información registrada.

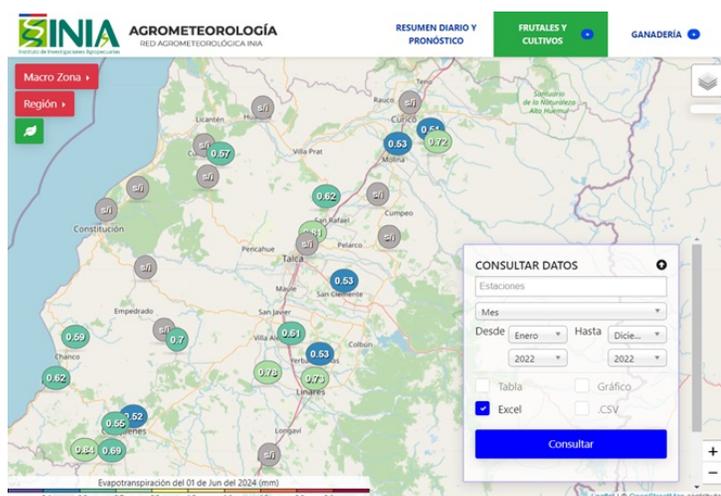


Figura 5.4: Información de evapotranspiración de referencia de diferentes EMA, disponible en: <https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/>.

5.2.2. Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo (K_c) corresponde a un valor adimensional que se ocupa para representar las características específicas de un cultivo según su etapa fenológica. Se consideran factores como el área foliar, conductancia estomática, arquitectura, rugosidad y factores de manejo como la densidad de plantación [48]. La figura 5.5 presenta una curva referencial de la evolución de un coeficiente de cultivo genérico según etapa fenológica:

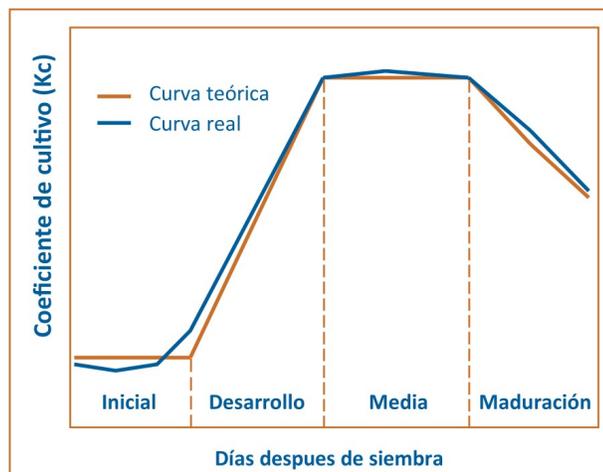


Figura 5.5: Evolución del coeficiente de cultivo en el tiempo. Fuente: Obtenido de [46]

K_c varía según aspectos agronómicos y temporales, pero puede considerarse constante en diferentes condiciones geográficas y entre especies y manejos similares para los mismos estados de desarrollo [48]. Los coeficientes de cultivo de distintos cultivos durante el año se pueden encontrar según valores de literatura, para lo cual los frutales consideran valores mensuales [49]. En particular, los valores utilizados en este estudio se ven con mayor detalle en la sección 6.1.

Al respecto, se puede concluir que esta variable depende de la fecha y del tipo de cultivo.

5.3. Frecuencia de riego

En el riego presurizado, años atrás los programas solían aplicar agua con alta frecuencia (diariamente) para compensar la evapotranspiración del cultivo, sin importar el tipo de suelo. Sin embargo, la experiencia ha demostrado que este método es más adecuado para suelos con baja capacidad de retención de humedad y alta macroporosidad. En suelos más pesados, con mayor capacidad de retención y baja macroporosidad, se han obtenido mejores resultados con riegos de baja frecuencia (cada 2 o 3 días). El riego diario en estos suelos puede causar problemas de aireación, enfermedades y una superficie de suelo mojada limitada [48].

La frecuencia de riego corresponde a la cantidad de días que debe haber entre dos riegos consecutivos, y viene dada por la siguiente expresión:

$$FR \text{ (día)} = \frac{AFA \text{ (mm)}}{ETc \text{ (mm/día)}} \quad (5.4)$$

Donde:

- **FR:** Frecuencia de riegos (día).
- **AFA:** Agua Fácilmente Aprovechable (mm)
- **ETc:** Evapotranspiración de cultivo o Demanda hídrica (mm/día).

Para ello, la ETc se obtiene de la ecuación 5.2, donde para realizar una programación de riego se utilizan valores medios mensuales de la ETc [45], obtenidos ocupando valores medios mensuales de ET_o, es decir:

$$ET_o \text{ (mm/día)} = \frac{ET_o \text{ (mm/mes)}}{\text{número de días del mes}} \quad (5.5)$$

Cabe mencionar que también se puede acceder a la evapotranspiración mensual de una estación meteorológica directamente desde <https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/>.

Para poder comprender el concepto de Agua Fácilmente Aprovechable (AFA), primero se deben aclarar ciertos conceptos sobre las propiedades físicas del suelo.

5.3.1. Propiedades físicas del suelo

La frecuencia depende directamente de las propiedades físicas del suelo. En términos generales, para suelos más arenosos la frecuencia de riego debe ser mayor debido a su baja capacidad de retención de agua. En cambio, en suelos más arcillosos, la frecuencia puede ser menor, ya que estos suelos retienen más agua [47]. La figura 5.6 muestra el patrón de mojado para distintos tipos de suelo:

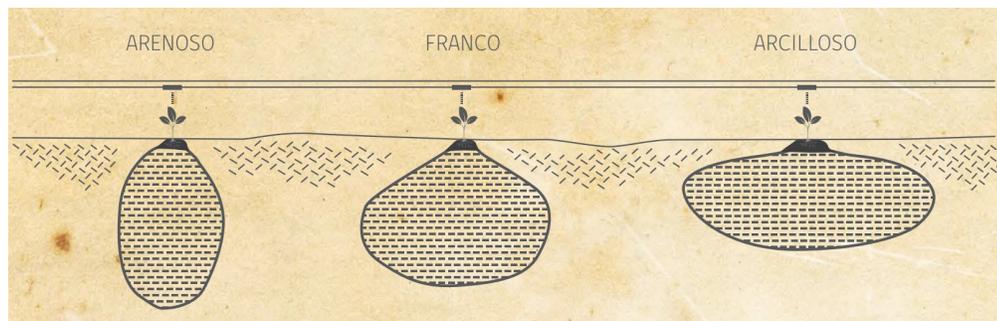


Figura 5.6: Patrón de mojado para diferentes tipos de suelo. Fuente: Obtenido de [47].

El rango ideal de contenido de agua para el crecimiento de un cultivo se determina en función de la Humedad Aprovechable (HA) del suelo, también conocida como Agua Disponible Total (ADT) [45]. El límite superior de la ADT está relacionado con la capacidad de campo (CC), mientras que el límite inferior se asocia con el porcentaje de marchitez permanente (PMP), que junto a la densidad aparente (Db) dependen directamente del tipo de suelo:

- **Capacidad de campo CC (%)**: Es el contenido de agua que permanece en el suelo después de haber sido regado abundantemente y dejado drenar libremente. Es la capacidad de almacenamiento de agua en el suelo disponible para las plantas.

- **Punto de marchitez permanente PMP (%)**: Es el contenido de humedad del suelo en el que las plantas no pueden extraer agua suficiente para mantenerse turgentes, lo que lleva a la marchitez permanente. Representa el punto en que el suelo ya no puede suministrar agua a las plantas.
- **Densidad aparente Db (g/cm³)**: Es la masa del suelo por unidad de volumen, incluyendo los espacios porosos.

Respecto a estos conceptos, se cuenta con rangos de valores establecidos ampliamente usados en la literatura [12] [45] [47], los cuales se presentan en la tabla 5.2:

Textura del suelo	Densidad aparente Db (g/cm ³)	Capacidad de Campo CC (%)	Punto de Marchitez Permanente PMP (%)
Arenoso	1.65 (1.55-1.80)	9 (6-12)	4 (2-6)
Franco arenoso	1.50 (1.40-1.60)	14 (10-18)	6 (4-8)
Franco	1.40 (1.35-1.50)	22 (18-26)	10 (8-12)
Franco arcilloso	1.35 (1.30-1.40)	27 (23-31)	13 (11-15)
Arcillo arenoso	1.30 (1.25-1.35)	31 (27-35)	15 (14-16)
Arcilloso	1.25 (1.20-1.30)	35 (31-39)	17 (15-19)

Tabla 5.2: Resumen de propiedades físicas para distintos tipos de suelo. Elaboración propia en base a [45].

Luego, la expresión para obtener el agua disponible total (ADT) es:

$$ADT = \left(\frac{CC \% - PMP \%}{100} \right) \cdot Db \cdot H \cdot (1 - Pied) \cdot PSM \quad (5.6)$$

Donde:

- **ADT**: Agua disponible total o humedad aprovechable (mm).
- **CC %**: Capacidad de Campo del suelo, base peso (%).
- **PMP %**: Porcentaje de marchitez permanente, base peso (%).
- **Db**: Densidad aparente del suelo (g/cm³).
- **H**: Profundidad de raíces (mm).
- **Pied**: Fracción de piedras presentes en el perfil de suelo.
- **PSM**: Porcentaje de suelo mojado

La profundidad de raíces y fracción de piedras presentes en el perfil de suelo dependerán del caso de estudio en específico. Mientras tanto, el porcentaje de suelo mojado (PSM) es la proporción del área de suelo que está siendo efectivamente humedecida por el sistema de riego, cuyo valor ronda entre 0,4 y 0,5 para riego presurizado en frutales [45].

5.3.2. Agua fácilmente aprovechable

Tras introducir el concepto de agua disponible total (ADT) y las variables de las cuales depende, es importante tener en cuenta que no toda el agua en el suelo está igualmente accesible para el cultivo. Por ello, es necesario regar cuando se haya agotado un porcentaje específico del ADT, conocido como Umbral de Riego (p) o fracción de agotamiento. Así, el Agua Fácilmente Aprovechable (AFA) para se puede estimar de la siguiente manera [45]:

$$AFA = ADT \cdot p \quad (5.7)$$

- **AFA:** Agua fácilmente aprovechable (mm).
- **ADT:** Agua disponible total o humedad aprovechable (mm).
- **p:** Fracción de agotamiento o umbral de riego (%).

En sistemas de riego localizado, el valor del umbral de riego ronda entre el 30 % y 40 % [12].

5.4. Tiempo de riego

Para determinar el tiempo de riego diario, no solo es necesario conocer el agua que requiere el cultivo, sino también hay que considerar las características del sistema de riego y la disposición de plantación del cultivo. La expresión general para determinar las horas de riego necesarias se presenta a continuación [47]:

$$TR = \frac{ET_c}{Ef \cdot IPP} \quad (5.8)$$

Donde:

- **TR:** Tiempo de riego (h).
- **ET_c:** Evapotranspiración de cultivo o Demanda hídrica (mm).
- **Ef:** Eficiencia del sistema.
- **IPP:** Intensidad de precipitación del sistema (mm/h).

Respecto a la eficiencia del sistema, como se vio en la figura 4.5, esta es 0,85 en microaspersión y 0,9 en goteo, valores que son ampliamente utilizados en la literatura [39] [40] [45]. Por otro lado, la intensidad de precipitación del sistema de riego se refiere a la lámina de agua que el equipo entrega en (mm/h), y se obtiene de la siguiente expresión:

$$IPP = \frac{Ne \cdot Qe}{10000} \quad (5.9)$$

Donde:

- **Ne:** Densidad de emisores por hectárea (emisores/ha)
- **Qe:** Caudal del emisor (L/h)

Para lo cual cabe mencionar que se tienen las siguientes equivalencias para las unidades de medida:

$$1 \text{ ha} = 10000 \text{ m}^2 \quad (5.10)$$

$$1 \text{ mm} = 10 \text{ m}^3/\text{ha} \quad (5.11)$$

$$1 \text{ m}^3 = 1,000 \text{ L} \quad (5.12)$$

Al respecto, el caudal del emisor (Q_e) depende del emisor ocupado según criterios de diseño del sistema de riego, mientras que para comprender cómo obtener la densidad de emisores por hectárea se presenta la figura 5.7:

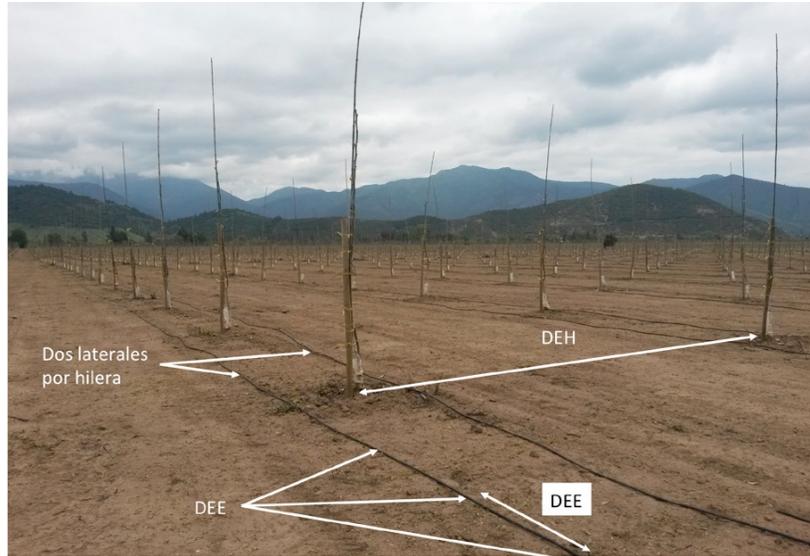


Figura 5.7: Disposición sistema de riego y parámetros utilizados. Fuente: Obtenido de [40].

Entonces, la expresión para calcular la densidad de emisores por hectárea es:

$$Ne = \frac{NL \cdot 10000}{DEH \cdot DEE} \quad (5.13)$$

Donde:

- **NL**: Número de laterales por hilera (1 o 2).
- **DEH**: Distancia entre hileras (m).
- **DEE**: Distancia entre emisores (m).

Como se puede apreciar, para esta variable influyen las condiciones de diseño del sistema de riego, que asimismo se adapta al marco de plantación del cultivo en específico.

5.4.1. Riego por sectores

Respecto al tiempo de riego calculado según la ecuación 6.4, es importante aclarar que el resultado obtenido no corresponde al tiempo de riego del predio agrícola completo. Es necesario introducir el concepto de sectores de riego, para lo cual se cuenta con la figura 5.8:

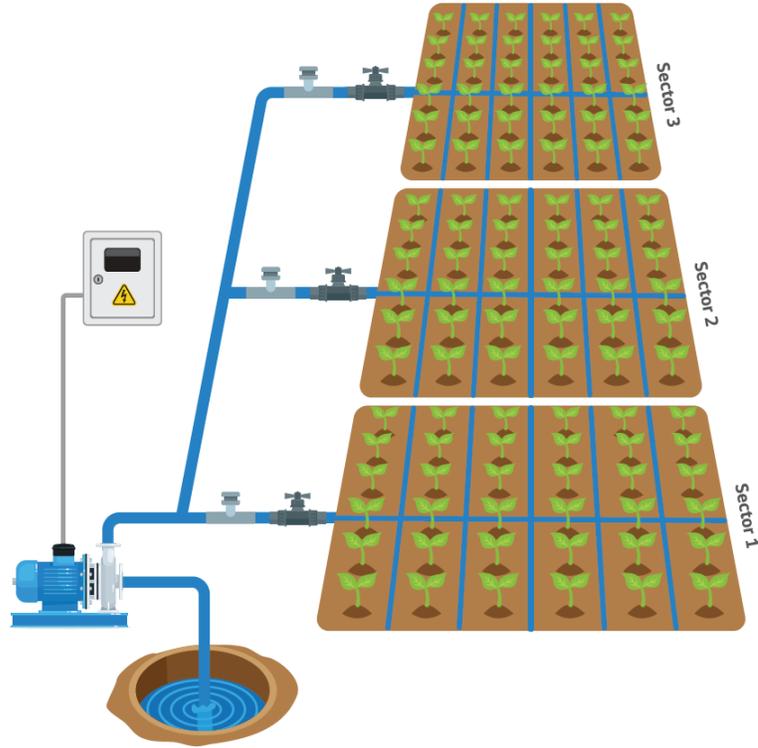


Figura 5.8: Sectores de riego para un sistema de bombeo. Fuente: Obtenido de [9].

En definitiva, debido a que una electrobomba puede suministrar un caudal limitado al sistema de riego, esta no está dimensionada para regar la totalidad del predio. En vista de esto, se distribuye su operación para regar distintos sectores durante el día [50]. Por consiguiente, la fórmula para calcular el tiempo total de riego en un día corresponde a:

$$TR_{total} (h/día) = TR (h/día) \cdot N^{\circ} \text{sectores} \quad (5.14)$$

En la siguiente sección se propone una metodología para estimar la cantidad de sectores de un predio agrícola, en función de la intensidad de precipitación (IPP), el tamaño del predio, la potencia de la electrobomba y su curva de operación.

5.5. Potencia electrobomba

Como se vio en el apartado 2.1.3.1, el riego presurizado ocurre gracias a la operación de una electrobomba centrífuga que impulsa el agua desde una fuente hacia la red de distribución. Al respecto, se ha establecido en varios estudios y confirmado en la práctica que la potencia requerida para la instalación de sistemas de riego presurizados es de 1 HP por hectárea para terrenos planos, lo que equivale a 0,7457 KW de potencia por hectárea [19].

Sin embargo, es importante aclarar que esta estimación no necesariamente implica que se deba contar con una sola electrobomba que se ajuste a las hectáreas del predio. De acuerdo con ejemplos presentados por la Comisión Nacional de Riego (CNR), se puede observar un predio de 18 hectáreas de cultivo de durazneros, cuyo sistema de riego se alimenta por la impulsión de dos bombas, como muestra la figura 5.9



Figura 5.9: Ejemplo de sistema de bombeo para predio de 18 hectáreas.
Fuente: Obtenido de [51].

Este predio cuenta un sistema de riego por goteo con 2 equipos de riego instalados, cada uno con bombas de 10 HP, y cada bomba destinada al riego de áreas diferentes, las cuales asimismo se dividen en sectores [51]. De esta manera, se tiene una potencia total instalada de 20 HP para un predio de 18 hectáreas. Asimismo, se tiene otro ejemplo para un predio más grande de 50 hectáreas, con una potencia instalada de 50 HP. En este predio también ocurre que existen 2 equipos de riego, como muestra la figura 5.10:



Figura 5.10: Ejemplo de sistema de bombeo para predio de 50 hectáreas.
Fuente: Obtenido de [50].

Se cuenta con dos sistemas de goteo para 50 hectáreas alimentados por electrobombas de 20 HP y 30 HP, para el riego de cultivos variedades de cerezas y manzanas. Al respecto, es importante comentar que la ventaja de contar con más de una bomba radica en la lógica de operación del sistema de riego, pues cada bomba puede suministrar un caudal limitado, mientras que con más de un sistema de bombeo existe la posibilidad de ocuparlos al mismo tiempo [17]. De acuerdo con la entrevista realizada a Juan Pablo Prado, quien administra el

fundo Agrícola el Laurel, las bombas del predio operan en paralelo el tiempo necesario según la necesidad hídrica de los sectores que debe regar cada equipo.

En términos generales, para condiciones de presión similares a medida que aumenta la potencia de una electrobomba, mayor es el caudal que puede suministrar, lo cual explica porque a medida que aumenta la superficie a regar, deba aumentar la potencia total del sistema de bombeo [14]. No obstante, dependerá de la decisión de cada agricultor y el diseño del sistema de riego para cada caso en particular de cuantas electrobombas se dispone. Al respecto, para efectos de este estudio se consideran electrobombas de 10 HP, 20 HP y 30 HP como electrobombas representativas a utilizar según el tamaño de un predio.

La cantidad de agua que debe ser inyectada por el sistema de bombeo se determina en función de la intensidad de precipitación (IPP) del sistema de riego. Mediante las equivalencias presentadas en las ecuaciones 5.11 y 5.12, se puede expresar el caudal necesario que debe inyectar la electrobomba por hectárea en función de la intensidad de precipitación, resultando la siguiente ecuación:

$$Q_{\text{demandado}} \text{ (m}^3\text{/h/ha)} = 10 \cdot IPP \text{ (mm/h)} \quad (5.15)$$

Donde:

- **$Q_{\text{demandado}}$** : Caudal demandado por hectárea ($\text{m}^3\text{/h/ha}$)
- **IPP**: Intensidad de precipitación del sistema (mm/h).

De esta manera, el caudal total que la bomba debe inyectar a un sector viene determinado por la cantidad de hectáreas que tiene este sector, es decir:

$$Q_{\text{demandado por sector}} \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_{\text{demandado}} \text{ (m}^3\text{/h/ha)} \cdot \text{Tamaño}_{\text{sector}} \text{ (ha)} \quad (5.16)$$

Por último, la potencia eléctrica absorbida por el motor dependerá de la curva de operación de la electrobomba específica que se esté ocupando y punto de operación en el cual se está trabajando, para lo cual se cuenta con curvas características que relacionan la potencia eléctrica con el caudal suministrado, como muestra el ejemplo de la figura 5.11:

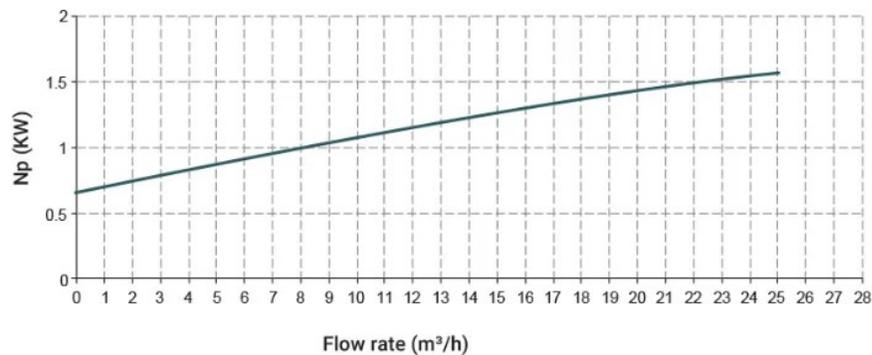


Figura 5.11: Ejemplo de curva de potencia eléctrica en función del caudal de una electrobomba. Fuente: Obtenido de [14].

De esta manera, en un sistema de riego, tras escoger un modelo de electrobomba que se adapte al tamaño del predio, se debe diseñar el sistema de bombeo con el fin de suministrar el caudal demandado. Sin embargo, cabe recordar que la electrobomba tiene sus rangos de operación limitados, por lo cual es necesario la separación de la superficie de riego en distintos sectores. A cada sector se le suministra el caudal demandado el tiempo necesario, lo cual se regula mediante la apertura y cierre de válvulas para que una misma bomba suministre el agua hacia los diferentes sectores.

A continuación, la figura 5.12 presenta un diagrama de bloques sobre los pasos a seguir para determinar la potencia absorbida por el motor en función del tamaño del predio, el número de sectores y las características de la electrobomba utilizada:

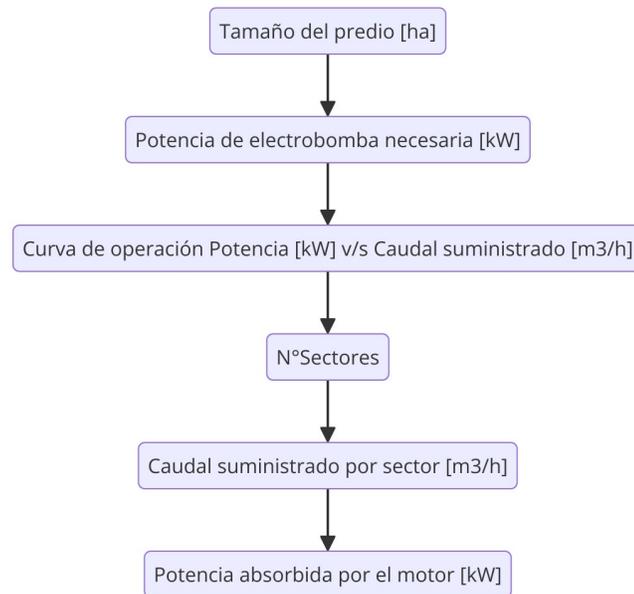


Figura 5.12: Diagrama de bloques para determinar la potencia absorbida por el motor de una electrobomba.

Esta metodología es aplicable tanto para predios agrícolas en los cuales basta con una electrobomba, como para predios más grandes que ocupan más de una. Para este último caso, es necesario hacer una partición del predio y aplicar la metodología de manera individual según la cantidad de bombas utilizadas en las diferentes superficies.

5.6. Resumen metodología para estimación demanda eléctrica riego presurizado

A continuación, a modo de resumen se presenta un diagrama de bloques de todas las variables y parámetros involucradas en la metodología creada para la estimación de la demanda eléctrica del riego presurizado:

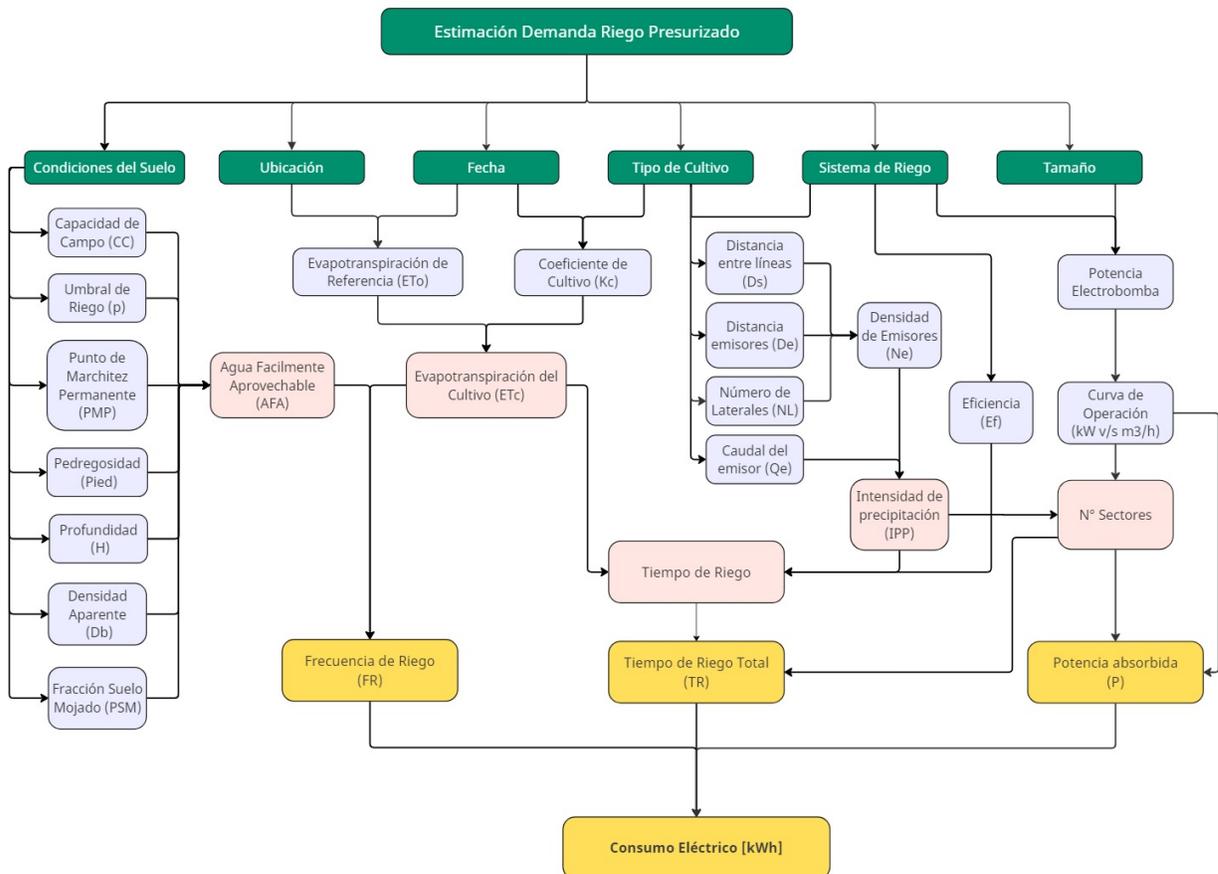


Figura 5.13: Diagrama de bloques de la metodología para la estimación de demanda eléctrica riego presurizado.

Capítulo 6

Herramienta para estimación demanda eléctrica riego presurizado

En este capítulo se presenta la implementación de la metodología creada en el Capítulo 5, para lo cual se diseña una herramienta en Excel que incorpora la relación entre los parámetros y variables identificados para la obtención de las 3 variables necesarias para la estimación de la demanda eléctrica del riego presurizado:

- **DR:** Días de riego (día/mes)
- **TR:** Tiempo de riego (horas/día).
- **P:** Potencia absorbida (kW).

Al respecto, la cantidad de días de riego se obtiene directamente en función de la frecuencia de riego (FR), según:

$$DR \text{ (día/mes)} = \frac{N^{\circ} \text{días por mes}}{1 + FR} \quad (6.1)$$

A modo de explicación general, es necesario ingresar *inputs* para que se realicen los distintos cálculos en vista de las ecuaciones presentadas en el capítulo anterior, para lo cual la herramienta entrega el resultado correspondiente de reemplazar los valores. La herramienta cuenta con 5 hojas de cálculo, cuyo funcionamiento se detalla a continuación, y una última hoja que resume el *output* de la herramienta.

En la sección de Anexos (A) se incluye un enlace para la descarga de esta herramienta.

6.1. Hoja 1: Evapotranspiración de referencia

En la primera hoja de esta herramienta se debe ingresar la información asociada a la evapotranspiración de referencia (ET_o), que se obtiene de la estación meteorológica automática que represente de mejor manera la ubicación que se quiera estudiar. Esta información está disponible en la página web del INIA: <https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/> [12], como se presentó en el apartado 5.2.1. Al respecto, es importante verificar que la estación meteorológica automática que se está consultando posea la totalidad de los datos, lo cual se indica en la columna “% datos”, la cual viene incluida en la descarga. La figura 6.1 muestra la interfaz de esta hoja en la herramienta computacional:

Evapotranspiración de Referencia

INPUT			
	Mes/año	ETo [mm/mes]	% datos
Enero	Ene-2023	178,86	100
Febrero	Feb-2023	153,26	100
Marzo	Mar-2023	134,03	100
Abril	Abr-2023	72,26	100
Mayo	May-2023	47,68	100
Junio	Jun-2023	30,66	100
Julio	Jul-2023	33,8	100
Agosto	Ago-2023	50,93	100
Septiembre	Sep-2023	61,23	100
Octubre	Oct-2023	97,42	100
Noviembre	Nov-2023	117,78	100
Diciembre	Dic-2023	169,3	100

Región:	VI O'Higgins
Estación Meteorológica:	El Tambo, San Vicente, INIA

Eto disponible en:
<https://agrometeorologia.cl/evapotranspiracion/#>

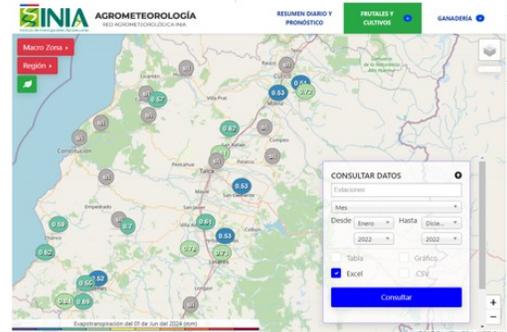


Figura 6.1: Herramienta de Riego: Hoja 1, Evapotranspiración de Referencia.

6.2. Hoja 2: Evapotranspiración del cultivo

Con la información de la estación meteorológica se puede calcular la demanda hídrica, para lo cual se incorpora el coeficiente de cultivo que multiplica la evaporación de referencia según la ecuación 5.2. La herramienta computacional permite escoger de una lista el cultivo que se quiere estudiar, y calcula de manera automática la evapotranspiración del cultivo (ETc) para cada mes. La figura 6.2 muestra la interfaz de esta hoja:

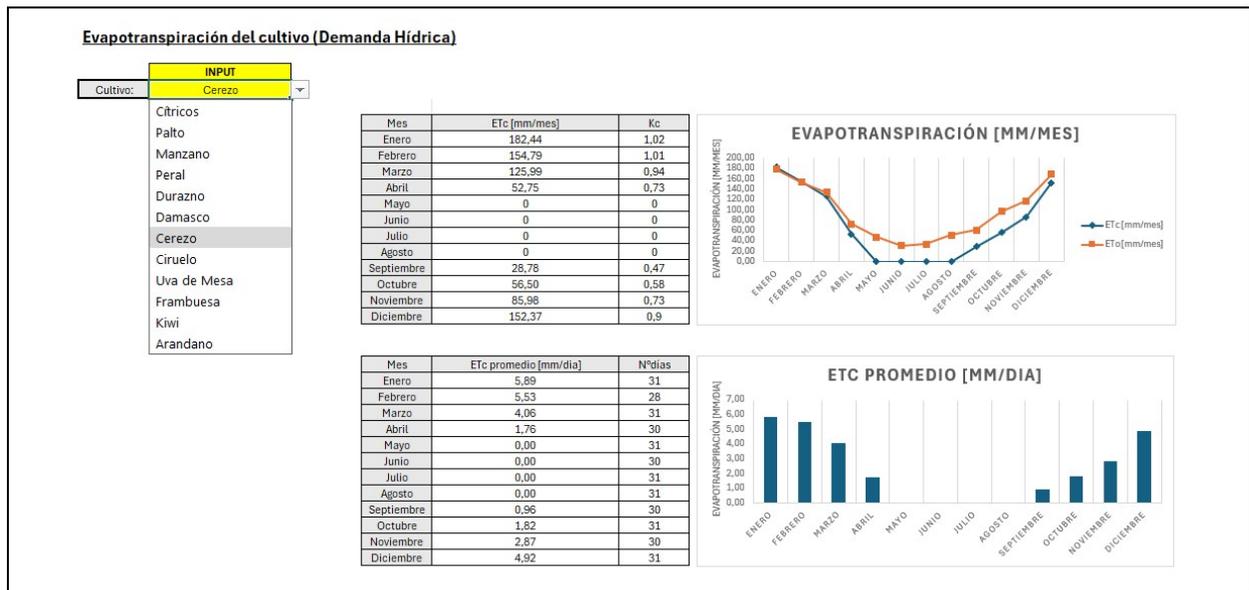


Figura 6.2: Herramienta de Riego: Hoja 2, Evapotranspiración del Cultivo.

Como *inputs* del coeficiente de cultivo (K_c), se considera como referencia principal al trabajo de título “Consumo de agua por la planta de siete especies frutales producidas en Chile”

[49]. En este estudio se evalúan coeficientes de cultivo de distintas zonas del mundo para adaptarlas a las condiciones de Chile, donde cabe mencionar que se concluyen los mismos valores para diferentes regiones, lo cual se corrobora con otras fuentes de información consultadas [48]. Se completó la información de otros coeficientes de cultivo de otros frutales recurriendo a otras fuentes bibliográficas [46] [52] [53].

A continuación, la tabla 6.1 presenta los coeficientes de cultivo incluidos en esta herramienta:

Frutal/Mes	Cítricos	Palto	Manzano	Peral	Durazno	Damasco	Cerezo	Ciruelo	Uva de Mesa	Frambuesa	Kiwi	Arandano
Enero	0,75	0,75	1	0,9	0,73	0,9	1,02	0,9	1,04	0,69	1,15	1
Febrero	0,75	0,75	0,92	0,9	0,68	0,9	1,01	0,9	1,06	0,75	1,15	1
Marzo	0,8	0,8	0,85	0,7	0,58	0,7	0,94	0,7	1,04	0,61	0,8	0,9
Abril	0,8	0,8	0,7	0,65	0,54	0,65	0,73	0,65	1,02	0,61	0,8	0,8
Mayo	0,8	0,8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Junio	0,85	0,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Julio	0,85	0,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Agosto	0,85	0,85	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,7
Septiembre	0,85	0,85	0,6	0	0,57	0	0,47	0	0,56	0,45	0	0,7
Octubre	0,85	0,85	0,7	0,4	0,75	0,4	0,58	0,4	0,8	0,45	0,4	0,8
Noviembre	0,8	0,8	0,78	0,55	0,93	0,55	0,73	0,55	0,89	0,51	0,65	0,9
Diciembre	0,8	0,8	0,96	0,75	0,9	0,75	0,9	0,75	0,97	0,55	0,95	1

Tabla 6.1: Coeficiente de cultivo para diferentes especies frutales [46] [49] [52] [53].

Por último, cabe mencionar que se calcula también la (ETc) promedio por día, la cual sirve de input para obtener la frecuencia de riego (FR) en la siguiente hoja, de acuerdo con la ecuación 5.4.

6.3. Hoja 3: Frecuencia de riego

Para determinar la frecuencia de riego, la herramienta permite escoger de una lista el tipo de suelo. Al respecto, se asocian de manera automática las variables asignadas para (CC), (PMP) y (Db), de acuerdo con los datos bibliográficos de la tabla 5.2, que se pueden ver también en la interfaz de la figura 6.3:



Figura 6.3: Herramienta de Riego: Hoja 3, Frecuencia de Riego.

De acuerdo con las variables identificadas en el apartado , (H) y (Pied) son *inputs* de las condiciones propias del predio agrícola, sin embargo, para efectos de este estudio se utilizaran los valores de 400 mm y 0,3 como valores referenciales obtenidos de ejemplos en la literatura [45]. Respecto a (PSM) y (p) cabe recordar que se identificó que para riego presurizado en frutales estos rondan entre 0,4 y 0,5 [45] y entre 0,3 y 0,4 respectivamente [12].

Con toda esta información, la herramienta calcula de manera automática el resultado de la ecuación 5.7 para calcular (AFA). Luego, dividiendo este resultado por el resultado de la hoja anterior (ETc) promedio por día, se obtiene la frecuencia de riego (FR) mediante la ecuación 5.4.

Por último, se calcula la cantidad de días de riego por mes (DR) en función de la frecuencia de riego (FR), según la ecuación 6.1.

6.4. Hoja 4: Tiempo de riego

Para calcular el tiempo de riego, los *inputs* de esta hoja corresponden a las características del sistema de riego y estas se ocupan para calcular la intensidad de precipitación (IPP) ocupando la ecuación 5.9, como se puede apreciar en la interfaz de la figura 6.4:

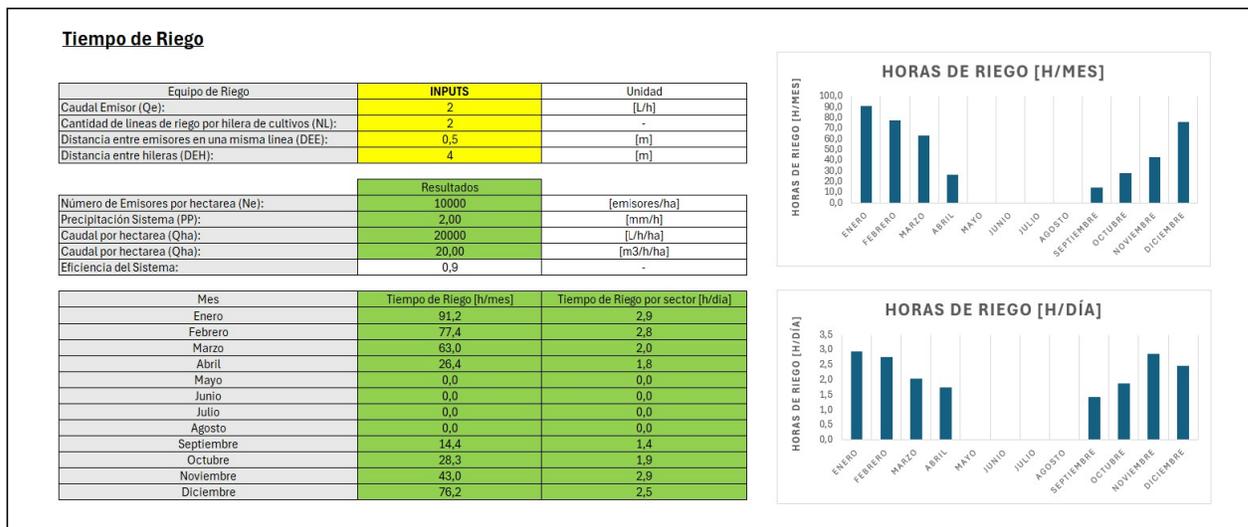


Figura 6.4: Herramienta de Riego: Hoja 4, Tiempo de Riego.

El tiempo de riego se calcula mediante la ecuación , dividiendo la demanda hídrica mensual (ETc) obtenida en la Hoja 2 por la intensidad de precipitación (IPP). De esta manera se obtienen las horas necesarias de riego durante un mes [45]. Luego, la cantidad de horas diaria viene dada por:

$$TR \text{ (hora/día)} = \frac{TR \text{ (hora/mes)}}{DR \text{ (día/mes)}} \quad (6.2)$$

Donde:

- **TR**: Tiempo de riego (hora/mes).
- **DR**: Días de riego (día/mes).

Respecto a los *inputs*, si bien dependerán de las características de cada predio en particular, se pueden identificar ciertos valores referenciales. Las disposiciones más típicas como referencias para frutales de acuerdo con la literatura son dos laterales con goteros de 4 L/h a 1 m sobre la hilera, o dos laterales con goteros de 2 L/h cada 0,5 m sobre hilera [45]. Se reconoce esta disposición como la más común para distintos cultivos, como por ejemplo duraznos, nectarinos, cerezos, ciruelos, uva de mesa y cítricos [45]. Por otro lado, la distancia entre hileras dependerá del marco de plantación que se tenga en el predio agrícola.

6.5. Hoja 5: Potencia absorbida

Para poder estimar la potencia absorbida por la electrobomba, es necesario tener valores referenciales de bombas reales utilizadas para el riego presurizado que tengan su curva de operación disponible.

De acuerdo con los casos reales encontrados, se buscan electrobombas de 10 HP, 20 HP y 30 HP como bombas representativas para abarcar superficies de riego de 10 ha, 20 ha y 30 ha respectivamente [19].

Al respecto, se ocupan bombas encontradas en el catálogo de bombas de la marca Pedrollo “Electrobombas centrífugas normalizadas “EN 733”” [54], utilizadas justamente para la irrigación. Importante es también mencionar que estas bombas, además de presentar su curva de potencia, están diseñadas para operar a una frecuencia de red de 50 Hz, que es la frecuencia de operación del Sistema Eléctrico Nacional (SEN).

Además de las potencias, se buscaron modelos dentro de este catálogo que tuvieran altura manométrica consistente con la utilizada en sistemas de riego. Para ello, se identifica que entre 26 y 46 m.c.a es una altura manométrica consistente para electrobombas destinadas a sistemas de riego, como muestra la placa de la figura 6.5

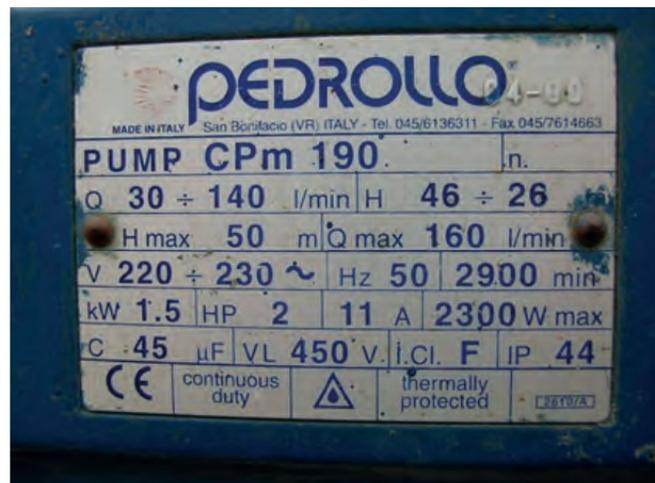


Figura 6.5: Ejemplo de la placa de electrobomba destinada para riego. Fuente: Obtenido de [12].

Por otro lado, para los ejemplos presentados en el apartado 5.5, las bombas de 10 HP, 20 HP y 30 HP operan dentro de este rango [50] [51].

Las bombas escogidas corresponden a los modelos Pedrollo F50/160A 10 HP, F65/160A 20 HP y Pedrollo F80/160A 30 HP. Para obtener sus curvas de operación con resolución de 1 [m³/h], se identificaron los principales puntos de la curva mediante inspección visual, y se programó un código en Python que realizara interpolación cúbica. El resultado se puede apreciar gráficamente en la figura 6.10:

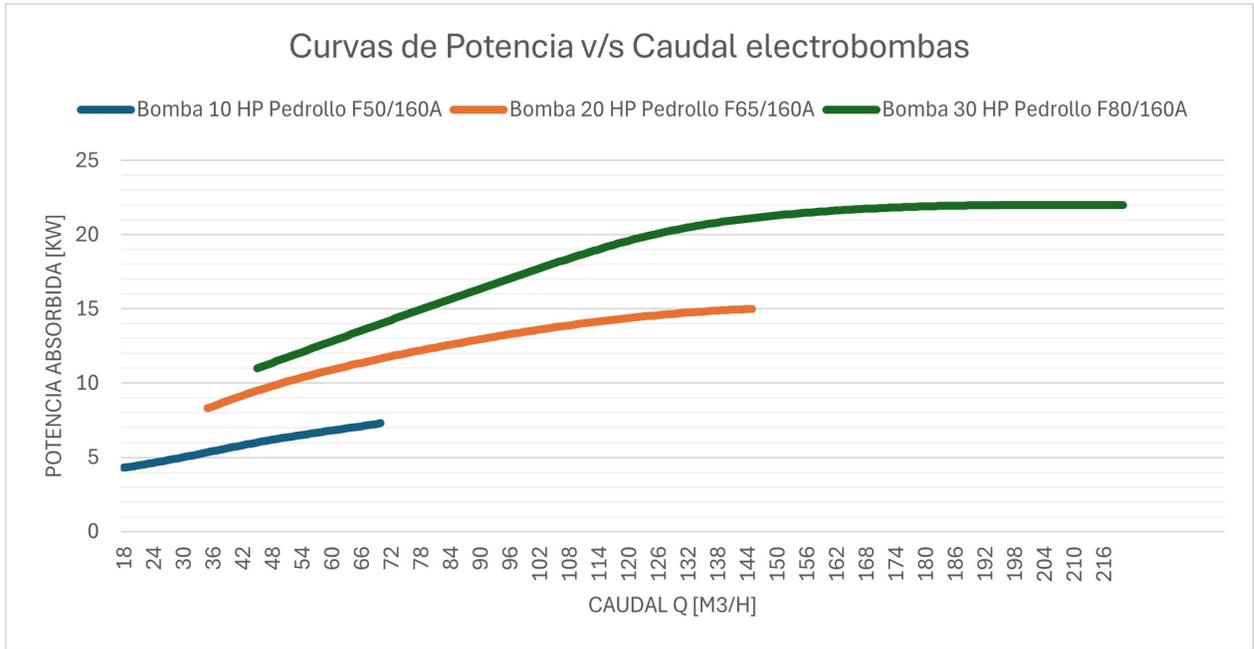


Figura 6.6: Curvas de potencia v/s caudal para las bombas escogidas.

Teniendo estas curvas, el procedimiento consiste en primer lugar en escoger el tamaño del predio a evaluar, que serían 10 ha, 20 ha o 30 ha. En segundo lugar, se debe considerar el caudal demandado, que se obtuvo en la hoja 4 mediante la ecuación:

$$Q_{\text{demandado}} \text{ (m}^3\text{/h/ha)} = 10 \cdot IPP \text{ (mm/h)} \quad (6.3)$$

Con este caudal, debe iterarse el número de sectores, variable que tiene una relación inversamente proporcional con el caudal demandado por sector, según la ecuación:

$$Q_{\text{demandado por sector}} \text{ (m}^3\text{/h)} = Q_{\text{demandado}} \text{ (m}^3\text{/h/ha)} \cdot \text{Tamaño}_{\text{sector}} \text{ (ha)} \quad (6.4)$$

Entonces, la iteración continúa hasta que se tenga un número de sectores válido, es decir, que el caudal que puede suministrar la bomba sea suficiente para abastecer el caudal demandado por sector. La interfaz de la herramienta computacional se puede apreciar en la figura 6.7:



Figura 6.7: Herramienta de Riego: Hoja 5, Potencia absorbida.

Al respecto, en caso de que el caudal no sea suficiente para la demanda de cada sector, la herramienta dará el aviso “AUMENTAR SECTORES” en el cuadro de “Criterio de Diseño” y no habrán resultados asociados a esta hoja debido a que no hay resultado válido. Una vez alcanzado el número de sectores válido, en función de la demanda de cada sector medida en (m³/h), se asocia automáticamente este valor a su potencia respectiva en (kW) de acuerdo a las curvas generadas.

6.6. Hoja 6: Output herramienta

Finalmente, en la última hoja se resumen los resultados de esta herramienta que son necesarios para la estimación de la demanda eléctrica para el tamaño del predio, como muestra la figura 6.8:

Output Herramienta

Número Hectareas:	20	[ha]
Bomba Utilizada:	Bomba 20 HP Pedrollo F65/160A	

Mes	DR [días/mes]	TR [h/día]	P [kW]
Enero	31	8,83	14,799
Febrero	28	8,29	14,799
Marzo	31	6,10	14,799
Abril	15	5,27	14,799
Mayo	0	0,00	14,799
Junio	0	0,00	14,799
Julio	0	0,00	14,799
Agosto	0	0,00	14,799
Septiembre	10	4,32	14,799
Octubre	15	5,65	14,799
Noviembre	15	8,60	14,799
Diciembre	31	7,37	14,799

Figura 6.8: Herramienta de Riego: Hoja 6, Output.

Al respecto, cabe mencionar que como se pudo constatar en casos reales y se explicó en el apartado 5.5, para predios agrícolas de cierto tamaño, se ocupa más de una electrobomba para el riego. Por consiguiente, dependiendo de las hectáreas del caso de estudio, es necesaria la división del predio y la aplicación de esta herramienta de manera separada.

6.7. Código en Python para construcción de curvas de demanda

Finalmente, para construir un vector de 8760 datos que represente la demanda eléctrica del riego presurizado para cada hora del año, se genera un código en Python que procesa las variables del output de la herramienta. La lógica consiste en que para cada mes se deben distribuir los días de riego (DR) respetando la frecuencia de riego (FR). Luego, para cada día de riego es necesario asignar horas de riego según el tiempo de riego (TR), a las cuales después se les asigna la potencia demandada de la electrobomba (P).

Respecto al bloque horario de riego, suponiendo que el agricultor tiene libertad de escoger las horas de riego, este se distribuye con el fin de aprovechar el recurso solar. Para lograr esto, se recurre al uso del Explorador Solar [55], mediante el cual rellenando un formulario es posible obtener la generación solar de un sistema para una ubicación específica. En particular, se considera un sistema con paneles fotovoltaicos bifaciales de capacidad instalada de 1 kW, con el fin de obtener una curva de oferta solar normalizada:

The image shows two panels from the Explorador Solar application. The left panel, titled 'FORMULARIO', contains the following settings:

- SELECCIONE MODELO DE GENERACIÓN:** Bifacial (selected).
- CARACTERÍSTICAS DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO:** Capacidad instalada: 1 kW; Coeficiente de Temperatura del panel (%/°C): -0,45.
- CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN:** Factor de bifacialidad: 0,7; Estacionalidad: Sin Estaciones; Tipo albedo: 0,24.

The right panel, titled 'GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA', shows the following settings:

- Tipo de arreglo:** Fijo Inclinado.
- Inclinación (°):** 28.
- Azimut (°):** -21.
- PÉRDIDAS:** Eficiencia del Inversor (%): 96; Factor de Pérdidas del sistema fotovoltaico (%): 14; Factor de pérdidas Mismatch (%): 6.

Buttons for 'OPTIMIZAR ÁNGULOS' and 'CALCULAR GENERACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO' are visible.

Figura 6.9: Ejemplo de información ingresada en Explorador Solar para estación meteorológica Los Niches. Fuente: Obtenido de [55].

Se dejaron los parámetros por defecto, un tipo de arreglo fijo inclinado y se ocupó la opción de optimizar ángulos. Luego, mediante la información descargada entre los años 2004 y 2016, se realiza un promedio horario de todos los datos, obteniendo de esta manera una curva normalizada promedio del perfil de generación solar.

Luego, para cada día de riego se debe identificar la hora de mayor generación solar y distribuir las horas de riego en torno a esta. Los pasos que sigue el código se pueden identificar en el diagrama de bloques de la figura 6.10:

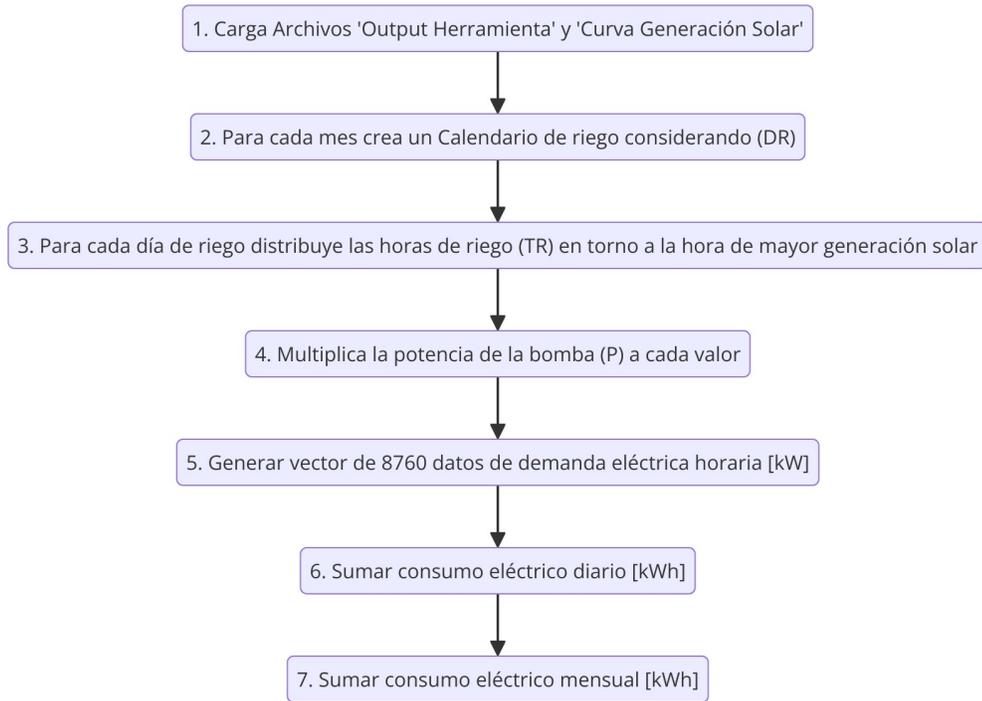


Figura 6.10: Diagrama de bloques de código en Python para construcción curvas de demanda riego presurizado.

En la sección de Anexos (A) se incluye un enlace para la descarga de este código y ejemplos del formato de los archivos utilizados.

Capítulo 7

Consumo energético packing

De acuerdo con lo presentado en la sección 2.1.4.1 del Capítulo 2, de manera general se pueden reconocer los siguientes procesos asociados a una planta de *packing*:

1. Recepción de Fruta
2. Selección
3. Etiquetado y Embalaje
4. Paletizado
5. Pre-frío
6. Almacenamiento

Respecto a información sobre el consumo energético asociado a estos procesos, en la bibliografía se reconoce que esta es escasa y se identifica la necesidad de recurrir a fuentes primarias [18]. Por consiguiente, en el contexto de este estudio se realizó una visita a terreno a la planta de *packing* de cerezas de Fruttita Services ubicada en Peor es Nada, Chimbarongo, con el fin de levantar información sobre los procesos existentes y sus consumos asociados.



Figura 7.1: Planta de *packing* de cerezas de Fruttita Services, obtenida de https://www.facebook.com/photo/?fbid=681678080689661&set=a.145787040945437&locale=es_.

Se entrevistó a Luis Rodríguez, maestro de máquinas de esta planta, quien proporcionó información tanto de los procesos que se llevan a cabo en esta planta, como de la industria del *packing* en general. A continuación, en este capítulo se describen los principales procesos identificados, además de los números obtenidos en terreno para esta planta, que sirven como referencia para la posterior estimación del consumo de un *packing* predial dimensionado para procesar una menor capacidad de fruta por día. Al respecto, cabe recalcar que las cerezas corresponden justamente a frutas delicadas para las cuales se justifica la existencia de un *packing* predial para el potencial procesamiento en un mismo predio agrícola [18].

Tras haber realizado esta entrevista, en función de la información recopilada en terreno y la literatura, se han podido identificar las principales preguntas que corresponde realizar para poder estimar la demanda eléctrica asociada a los procesos más demandantes de un *packing* de fruta, generando de esta manera una metodología aplicable a otros casos.

A modo de antecedentes generales, todos los consumos eléctricos que se presentan en este capítulo corresponden al uso de una serie de equipos eléctricos dimensionados para el procesamiento de 220.000 (kg) diarios de cerezas. Mientras tanto, respecto a las cámaras de pre-frío y frío, cabe reconocer que las plantas de *packing* industriales cuentan con varias, las cuales se van llenando a medida que va ingresando la fruta. La lógica de operación consiste en tener encendidos los equipos eléctricos presentes en estas cámaras únicamente si hay fruta que deba ser procesada [20]. Como último antecedente, cabe mencionar que se indica que a veces en periodos que hay demasiada demanda, es necesario incluir turnos nocturnos. Sin embargo, para efectos de este estudio, solo se considerará el turno diurno, pues se busca obtener conclusiones sobre plantas de *packing* prediales, cuya recepción ocurre a medida que se cosecha la fruta.

7.1. Formulación de problema

En definitiva, con el fin de ser capaz de estimar la demanda eléctrica de un *packing*, es necesario estimar la demanda de cada proceso que consuma electricidad. Para ello, para un día de *packing* es posible identificar los siguientes pasos para poder estimar la demanda eléctrica, según el diagrama de la figura 7.2:

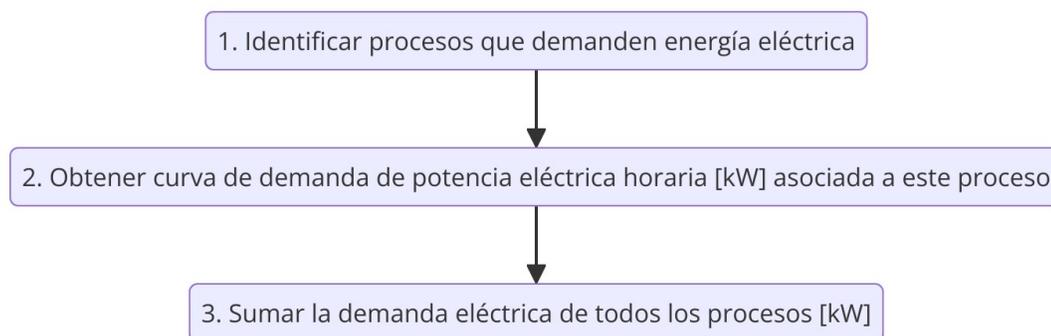


Figura 7.2: Pasos metodología general para estimar la demanda eléctrica de un día de *packing*.

Y en esta metodología general, se puede seguir la siguiente metodología para estimar la curva la demanda eléctrica de cada proceso, según el diagrama de la figura 7.3:

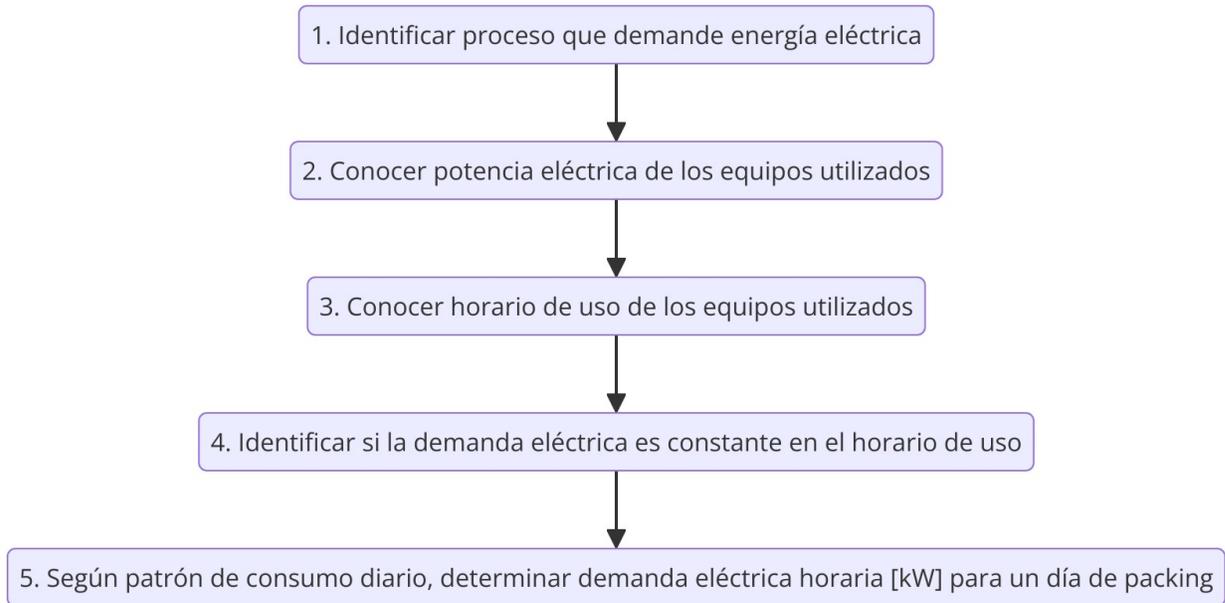


Figura 7.3: Pasos de metodología para estimar demanda eléctrica del proceso que ocurre en un *packing*.

A modo preliminar, respecto a los equipos utilizados para el procesamiento de fruta y su potencia asociada, estos están dimensionados para procesar cierta cantidad de fruta por hora y día [20]. De acuerdo con la información recopilada en terreno y en la bibliografía, se ha diseñado un cuestionario con las preguntas más importantes a realizar con el fin de poder aplicar la metodología presentada en la figura 7.3.

7.2. Cuestionario procesos energéticos packing

En primer lugar, es de suma importancia caracterizar el *packing* y comprender hacia qué época del año se concentra su consumo eléctrico. Esto debido a que un *packing* podría ocuparse para el procesamiento de más de un tipo de fruta, cuyas temporadas de procesamiento son diferentes. No obstante, en caso de un *packing* predial el periodo de consumo estará directamente acoplado a la temporada de cosecha del predio. En la tabla 7.1 se incluyen las siguientes preguntas generales para caracterizar al *packing*:

Características Packing	
1. Tipo/s de fruta/s	¿Qué fruta/s procesa este packing?
2. Capacidad de procesamiento	¿La planta de packing está dimensionada para procesar cuántos (kg/día)?
3. Días de operación	¿En qué fechas está procesando fruta el packing?
4. Intensidad estacional	¿La cantidad procesada por día es constante o varía según la fecha?
5. Intensidad semanal	¿La planta opera durante todos los días de la semana?

Tabla 7.1: Cuestionario demanda eléctrica *packing*: características generales de la planta.

En segundo lugar, en la tabla 7.2 se realizan las siguientes preguntas para identificar los procesos que demandan energía y los equipos utilizados:

Identificación procesos	
1. Procesos	¿Qué procesos requieren de equipos eléctricos para funcionar?
2. Equipos eléctricos	¿Qué equipos eléctricos se ocupan en cada proceso?

Tabla 7.2: Cuestionario demanda eléctrica *packing*: identificación de procesos y equipos utilizados.

En tercer lugar, una vez identificados los procesos que demandan energía, para cada uno de estos es necesario realizar las siguientes preguntas para determinar la demanda eléctrica horaria y estimar el comportamiento de la curva de consumo. Las preguntas se presentan en la tabla 7.3:

Proceso específico	
1. Potencia	¿Qué potencia tienen los equipos eléctricos utilizados en este proceso?
2. Horario	¿Entre qué horas del día operan los equipos eléctricos?
3. Variabilidad	¿Se mantiene constante la demanda eléctrica durante las horas de funcionamiento?
4. Patrón de consumo	En caso de no ser constante, ¿de qué manera varía? ¿se apaga el equipo o tiene potencia variable?

Tabla 7.3: Cuestionario demanda eléctrica *packing*: potencia eléctrica, tiempo de uso y patrón de consumo por proceso.

Dentro de los procesos existentes, se reconocen preguntas adicionales a realizar para las cámaras de pre frío y de almacenamiento, con el fin de poder estimar cuántas cámaras van a estar encendidas. Las preguntas se presentan en la tabla 7.4:

Cámaras de Pre Frío y de Almacenamiento	
1. Capacidad	¿Cuántos (kg) de fruta pueden almacenar las cámaras?
2. Lógica de llenado	¿Se llena primero una cámara, o se van llenando de manera equitativa las cámaras de la planta?
3. Tiempo de almacenamiento	¿Cuánto tiempo permanece la fruta en estas cámaras?

Tabla 7.4: Cuestionario demanda eléctrica *packing*: cámaras de pre frío y de almacenamiento

A continuación, en las siguientes secciones se realiza una descripción general de los procesos identificados en el *packing* de cerezos visitado, además de presentar los resultados obtenidos de la entrevista realizada a Luis Rodriguez [20]. Si bien los consumos presentados están sujetos a la realidad del *packing* visitado, la información recopilada en esta sección busca dar una idea sobre los procesos y los patrones de uso de un caso real.

No obstante, es importante reconocer que, aunque la visita a terreno se realizó en un *packing* industrial, la información recopilada permitió formular el problema y diseñar un cuestionario con el fin de estimar la demanda eléctrica de un *packing*. Esta metodología puede aplicarse tanto a un *packing* industrial como a uno predial.

En la sección de Anexos (A) se incluye un enlace para la descarga de este cuestionario, incluyendo las preguntas realizadas para cada proceso identificado.

En las siguientes secciones se analizan los procesos identificados para este *packing* de cerezas de capacidad de procesamiento de 220.000 (kg/día), además de incluir los resultados obtenidos respecto a los consumos eléctricos de los equipos asociados a cada proceso.

7.3. Recepción de fruta y procesos electromecánicos

7.3.1. Hidroenfriado

El primer proceso de alto consumo eléctrico identificado al recibir la fruta es el de hidroenfriado, que es un sistema diseñado para reducir rápidamente la temperatura de la fruta proveniente del huerto [18]. Este proceso utiliza una ducha de agua muy fría que se aplica a la fruta en contenedores. La figura 7.4 muestra este proceso:



Figura 7.4: Hidroenfriamiento en *packing*. Fuente: Obtenido de [56].

En la planta visitada, los equipos eléctricos utilizados son bombas con estas potencias:

- **Hidroenfriado:** 4 bombas de 10,7 (kW) / 42,8 (kW) para 20.000 (kg/hora) y 220.000 (kg/día)

7.3.2. Selección y embalaje

Posterior al primer golpe de frío, la fruta que ingresa es clasificada en mesas de selección, separando los frutos según su calidad. Esta área generalmente consta de una línea principal con una serie de mesas laterales, donde la selección primaria de la fruta se realiza de manera electrónica utilizando información predefinida. Durante la selección, se separa la fruta que presenta daños o defectos, como machucones, heridas, sobremadurez, tamaño reducido, daños por insectos, entre otras [18]. A continuación, la figura 7.5 presenta una sección de la línea transportadora:



Figura 7.5: Línea transportadora en planta *packing* Frutitta Services [20].

Al respecto, se ocupan motores para el movimiento de las líneas transportadoras [18], y en el caso de la planta visitada se cuenta con la siguiente suma de potencias entre todos los motores involucrados:

- **Selección:** 114 (kW) para 20.000 (kg/hora) y 220.000 (kg/día)

Una vez seleccionada, la fruta pasa a una etapa de embalaje similar a la etapa de selección en cuanto al uso de motores para el movimiento de líneas transportadoras [18], donde la fruta se coloca en cajas. Luego, estas cajas son transportadas mediante correas hasta el área de paletizado. Luego, las cajas con fruta embaladas se apilan de manera ordenada y lógica sobre estructuras llamadas pallets, que pueden ser de madera o plástico

En la planta visitada la potencia total asociada a esta etapa es:

- **Embalaje:** 50 (kW) para 20.000 (kg/hora) y 220.000 (kg/día)

Respecto al horario de funcionamiento de estos procesos, y por lo tanto, las horas que se ocupan los equipos y hay consumo eléctrico, son de 7:00 a 18:00, para las cuales estas máquinas operan constantemente [20]. En particular, si se detiene la maquinaria, demora tiempo volver a habilitar todo, por lo que durante la hora de almuerzo la línea sigue funcionando sin fruta. A continuación, la figura 7.6 presenta las curvas de demanda eléctrica horaria para un día de procesamiento asociada a estos procesos:

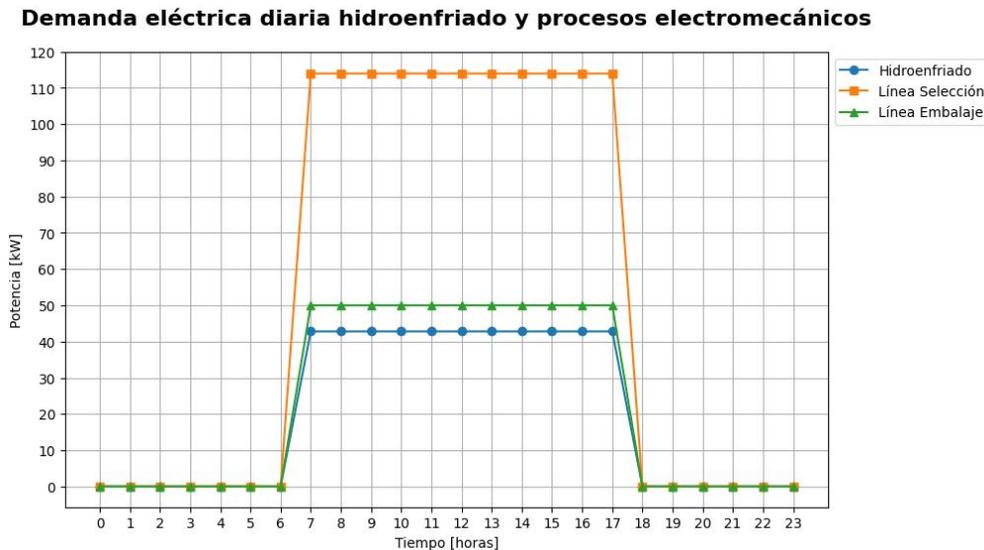


Figura 7.6: Demanda eléctrica diaria *packing*: hidroenfriado y procesos electromecánicos.

7.4. Climatización

Dentro de una planta de *packing* es necesario en primer lugar contar con iluminación para trabajar, ya que corresponde a un espacio cerrado. Las luces de la planta visitada se mantienen encendidas entre las 7:00 y las 23:59 cuando no hay turno nocturno y la potencia demandada corresponde a:

- **Iluminación:** 30 (kW)

Asimismo, las plantas contemplan salas de trabajo, antecámaras, cámaras de pre-frío y cámaras de almacenamiento que deben estar climatizadas a una temperatura específica. Para esto, los equipos que se encargan de regular la temperatura del ambiente son compresores. Dentro de la planta visitada se tienen 3 compresores que operan para la climatización y que se mantenga la temperatura requerida en cada sector. Para lograr esto, un compresor grande de potencia 336 kW opera durante las 24 horas y se tienen 2 compresores de tornillo de 110 kW cada uno con potencia variable:

- **Compresor grande:** 336 (kW)
- **Compresores de tornillo:** 2 de 110 (kW)

Estos compresores de 110 kW son capaces de variar su potencia demandada en un 0 %, 25 %, 50 %, 75 % y 100 %. Si bien sus funcionamientos son variables y depende de las condiciones de trabajo, se indicó que de acuerdo con los flujos de gente y temperatura externa, a las 3 y las 4 de la mañana por lo general estaban apagados, obteniéndose la estimación de la figura 7.7

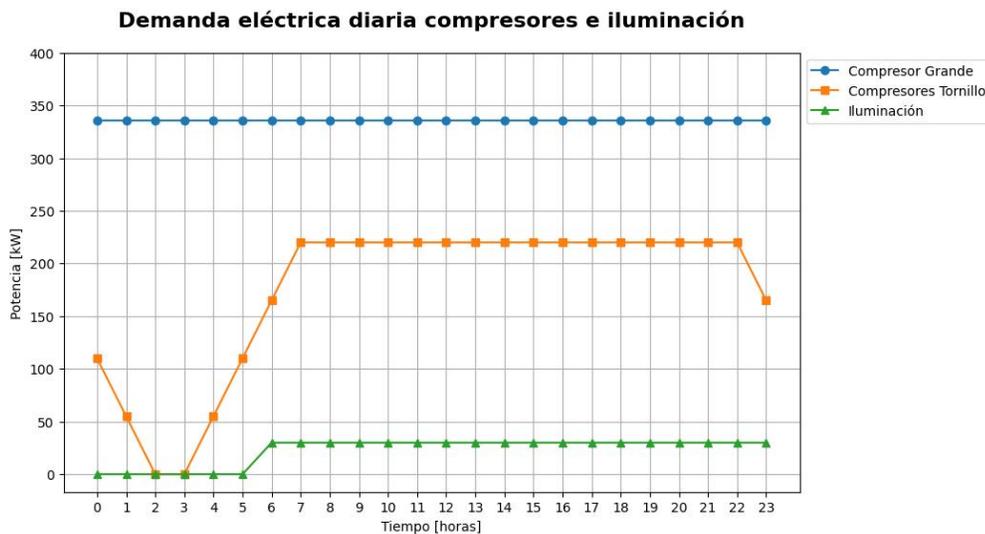


Figura 7.7: Demanda eléctrica diaria *packing*: compresores e iluminación.

7.5. Túnel de pre-frío

Los métodos de preenfriamiento (o enfriamiento rápido) más comunes se llaman por lotes, cuyo objetivo es extraer el calor de la fruta, para bajarla a 0°C, que es la temperatura de almacenamiento. Existen dos tipos principales: el túnel californiano y el túnel vertical. Ambos consisten en una habitación que mide entre 8 y 11 metros de largo, 4 y 6 metros de ancho, y 3 y 5.5 metros de altura. En su interior, ambos tipos de túneles están equipados con evaporadores y ventiladores [57].

Al respecto, el más utilizado en Chile es el túnel californiano [58]. En este túnel, el aire pasa a través de las filas de pallets por los costados, como muestra la figura 7.8:

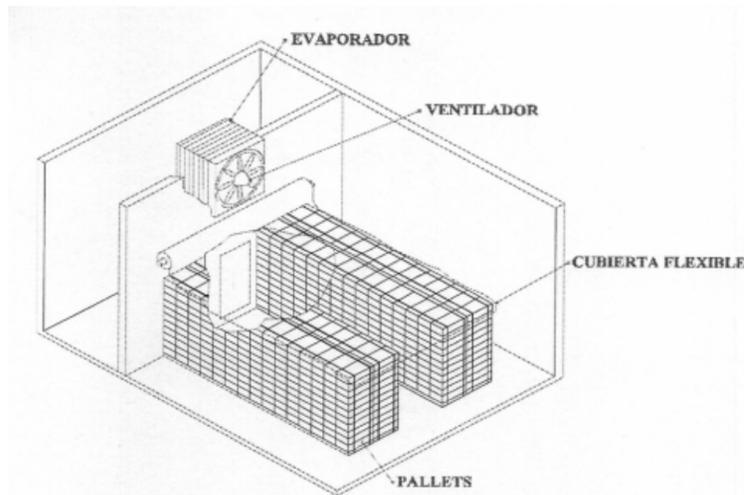


Figura 7.8: Túnel californiano para pre-frío. Fuente: Obtenido de [58].

Para asegurarse de que el aire no ingrese por la parte superior o por el frente de los pallets, los túneles poseen una lona que cubre las dos filas y el pasillo central, cayendo por delante. Al respecto, en la visita de terreno se contaba con 8 túneles de pre-frío de tipo californiano, como se puede apreciar en la figura 7.9:

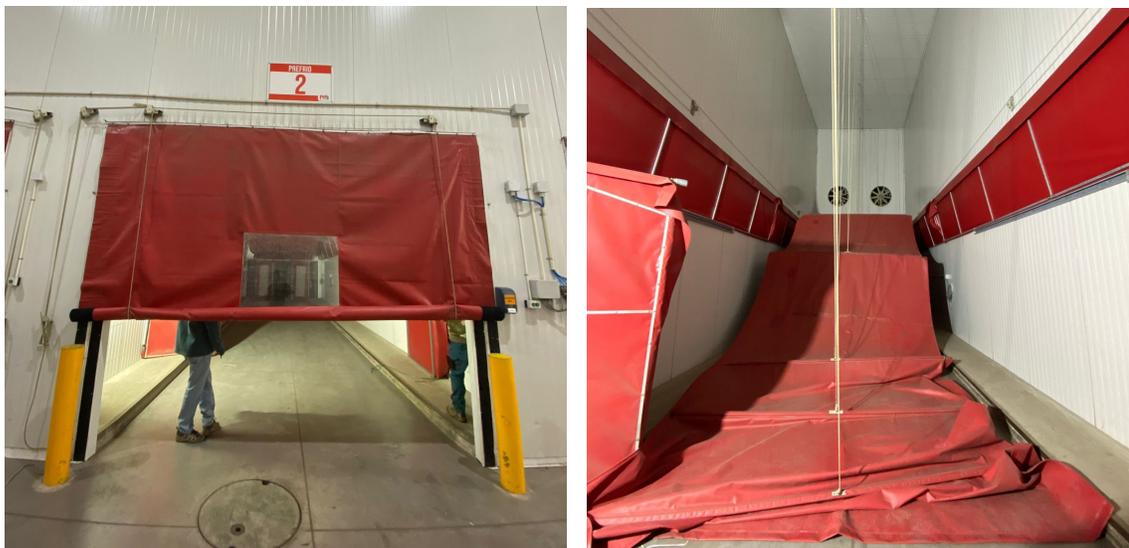


Figura 7.9: Túnel de Pre-Frío en planta *packing* Frutitta Services [20].

Respecto al tiempo de operación, se comenta que este por lo general es de 12 horas [57]. En el *packing* visitado a medida que ingresa la fruta se encienden las cámaras de pre-frío, para lo cual se estima un tiempo de operación de entre las 10:00 y las 23:59, donde cabe mencionar que cada 4 horas se tiene una detención programada de 30 minutos. Sobre los evaporadores de estas cámaras, su consumo eléctrico se asocia al motor de los ventiladores, que es de 5,5 kW y son 2 en total:

- **Túnel Pre-frío:** 2 ventiladores de 5,5 [kW] / 11 (kW) para 24 pallets

Entonces, la curva de demanda eléctrica de una cámara de pre-frío encendida se puede apreciar en la figura 7.10:

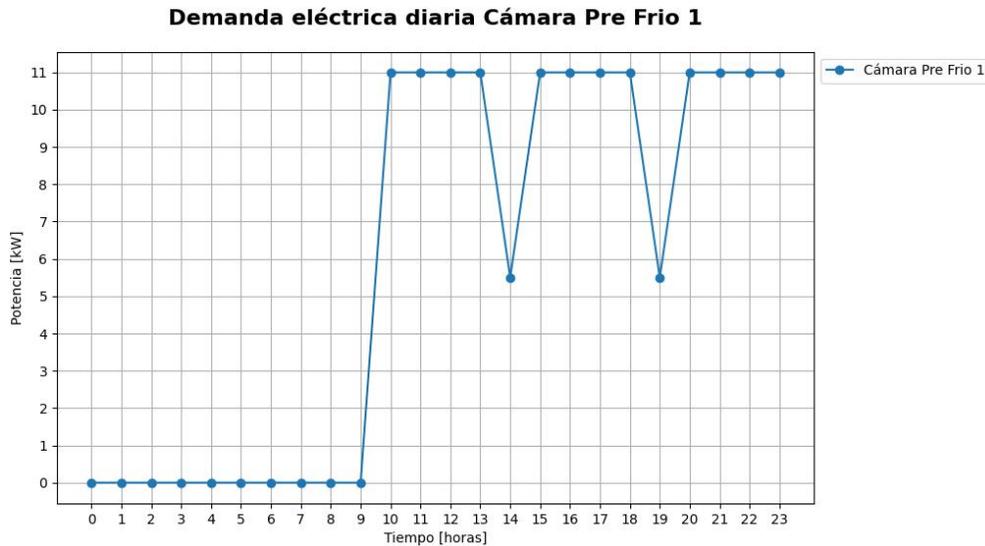


Figura 7.10: Demanda eléctrica diaria *packing*: Túnel pre-frío.

Otro factor importante de una cámara es su capacidad de almacenamiento, que se puede obtener de la capacidad de cada pallet, según la figura 8.7

ESPECIE	TIPOS DE ENVASES	DESCRIPCIÓN	DIMENSIONES	PESO NETO	CAJAS POR PALLET
Cerezas	Cartón	Granel	50x30x9,6	5 Kilos	184

Figura 7.11: Capacidad de almacenamiento envases Fruttita, obtenida de: <https://fruttita.cl/es/cerezas/>.

Entonces, para la capacidad de almacenamiento de los 24 pallets y los elementos que lo componen:

- 184 cajas/pallet
- 5 kg/caja
- 920 kg/pallet
- 22.080 kg/cámara

7.6. Cámaras de almacenamiento

También conocidas como cámaras de mantenimiento, son grandes salas climatizadas donde se almacena la fruta después de haber sido enfriada en los túneles de preenfriamiento. Estas cámaras cuentan con evaporadores y ventiladores en el techo que mantienen el ambiente a 0°C. Es importante destacar que, en esta etapa, todos los calores sensibles ya han sido eliminados, por lo que el sistema de ventilación y enfriamiento solo necesita compensar las ganancias térmicas del exterior y el calor generado por la respiración de la fruta. Por lo tanto, en comparación con su capacidad, la cámara de almacenamiento generalmente, pese a tener mayor volumen, tiene una capacidad de enfriamiento menor que un túnel de preenfriamiento [57].

A continuación, la figura 7.12 presenta como se ven las cámaras de almacenamiento de la planta visitada por fuera y dentro:

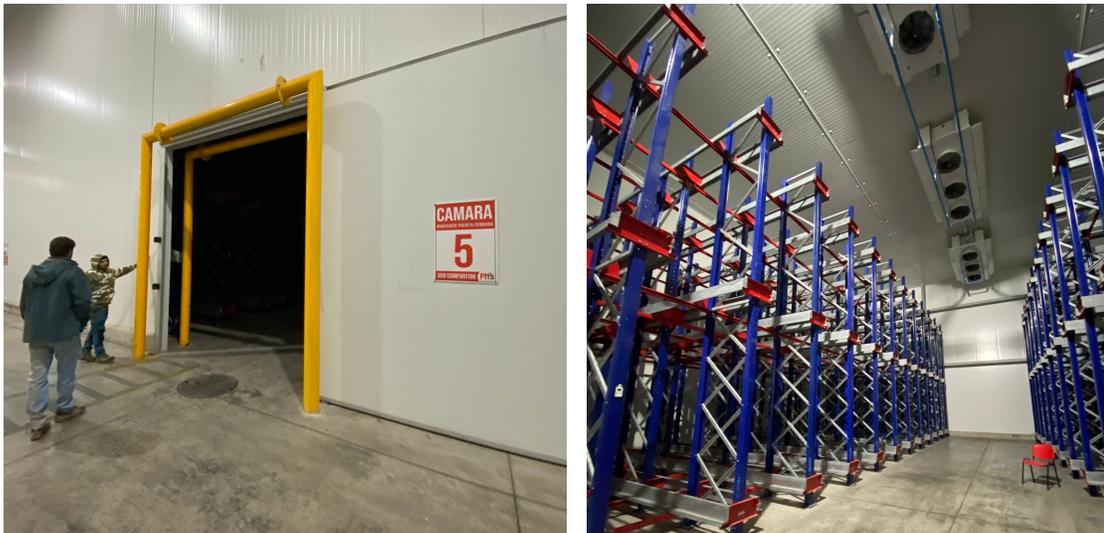


Figura 7.12: Cámara de almacenamiento en planta *packing* Fruttita Services [20].

Respecto al tiempo de almacenamiento, si el productor tuviera la opción de no refrigerar la fruta, siempre elegiría esta alternativa por costos de operación. Por lo tanto, el funcionamiento óptimo de las cámaras frigoríficas en estas plantas siempre será mantener la fruta el menor tiempo posible [18].

Al respecto, se comenta de acuerdo a un estudio que recurre a fuentes primarias, que la fruta suele permanecer almacenada entre 2 y 3 días, sin embargo, no se especificó el tipo de fruta. Este periodo puede prolongarse debido a problemas como la disponibilidad de transporte marítimo o imprevistos [19]. De acuerdo con la entrevista realizada, para los cerezos de este *packing* también se busca mantener su tiempo de almacenamiento el menor tiempo posible, siendo este también generalmente entre 2 y 3 días, llegando a 5 días como mucho al haber inconvenientes [20].

Al igual que en para las cámaras de pre-frío, se cuenta con 8 cámaras de almacenamiento en esta planta, y el consumo eléctrico de cada una se asocia al motor de los ventiladores. Para cada cámara hay 9 ventiladores en total de 1 kW cada uno;

- **Cámara de Almacenamiento:** 9 ventiladores de 1 (kW) / 9 (kW) para 502 pallets

Sobre su tiempo de operación, si hay fruta estas deben mantenerse encendidas las 24 horas del día, con detenciones programadas de 30 minutos cada 5 horas, obteniéndose para cada cámara la curva de demanda eléctrica estimada en el gráfico de la figura 7.15:

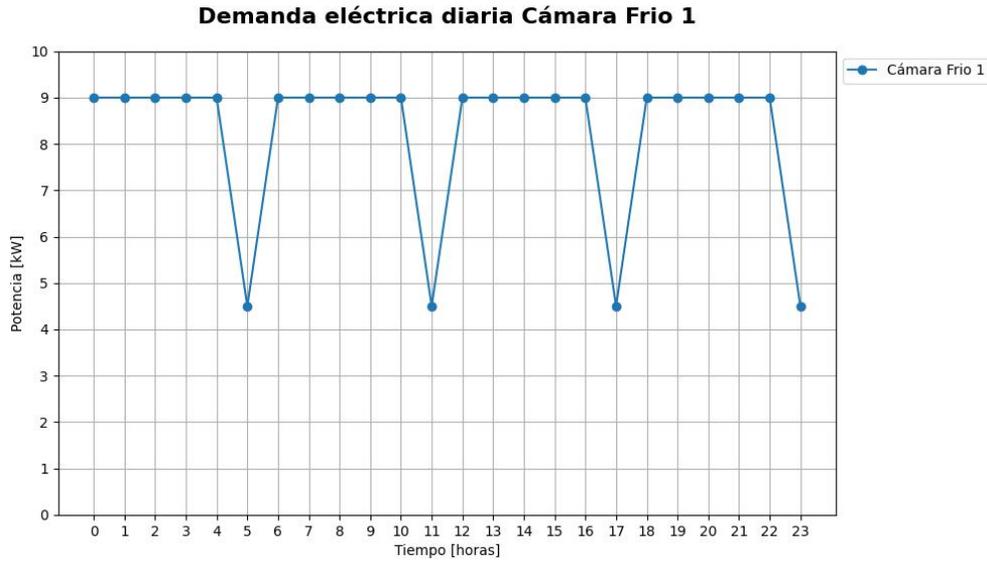


Figura 7.13: Demanda eléctrica diaria *packing*: Cámara de Almacenamiento.

Considerando las capacidades presentadas en la sección anterior, se obtiene que la capacidad de almacenamiento de la cámara de frío es:

- 461.840 kg/cámara

7.7. Transporte pallets

Además de los procesos descritos anteriormente, también se reconoce el consumo de energía asociado al uso de grúas horquilla para el transporte de los pallets entre las distintas salas y cámaras del *packing*. Al respecto, en esta empresa cuentan con 8 grúas en total del modelo Jungheinrich ETV318, como muestra la figura 7.14:

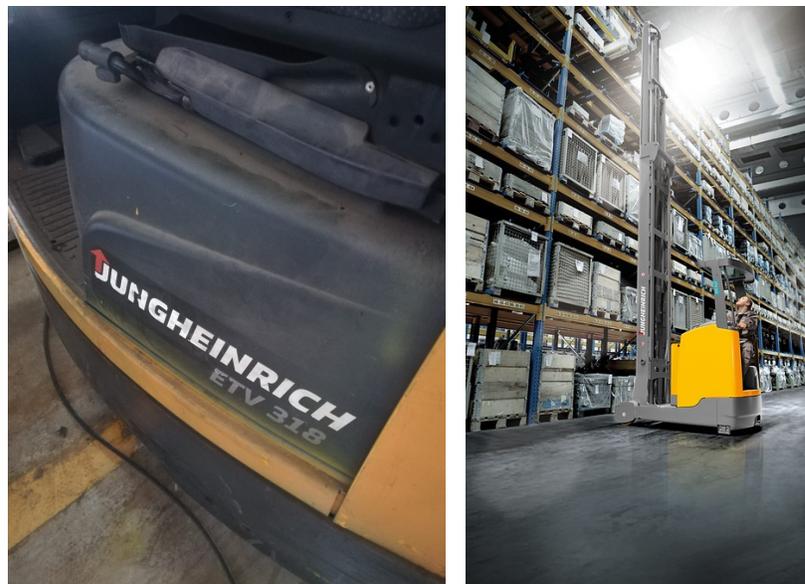


Figura 7.14: Grúa horquilla Jungheinrich ETV318 utilizada en el *packing* [20]. Fuente: Obtenido de [59].

Estas grúas tienen un tiempo de autonomía de aproximadamente 8 horas tras una carga completa de 3 horas con demanda eléctrica de 22 [kW]. Se cuenta con 6 cargadores, dando una potencia total de:

- **Cargador Grúa:** 6 de 22 [kW] / 132 [kW] en total

Sobre su tiempo de uso, se ocupan los 6 cargadores para cargar entre las 4:00 y las 7:00. Además, se dejan cargando grúas durante la hora de almuerzo a las 13:00 y a las 18:00 durante una hora. La curva de demanda eléctrica estimada asociada a la carga de las grúas se puede ver en el gráfico de la figura 7.15:

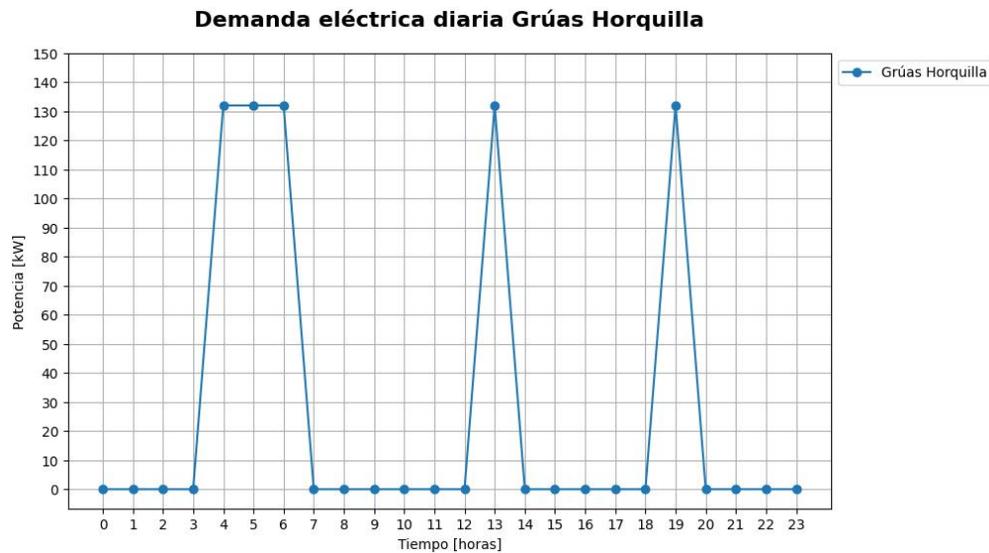


Figura 7.15: Demanda eléctrica diaria *packing*: Carga Grúas horquilla.

7.8. Estimación demanda eléctrica packing predial caso de estudio

De acuerdo con la información obtenida, a continuación, la tabla 7.5 resume los datos de demanda eléctrica horaria asociadas a cada proceso del *packing*:

Hora	Compresor Grande [kW]	Compresor Tornillo 1 [kW]	Compresor Tornillo 2 [kW]	Iluminación [kW]	Hidrocooler [kW]
00:00	336	55	55	0	0
01:00	336	27,5	27,5	0	0
02:00	336	0	0	0	0
03:00	336	0	0	0	0
04:00	336	27,5	27,5	0	0
05:00	336	55	55	0	0
06:00	336	82,5	82,5	0	0
07:00	336	82,5	82,5	30	42,8
08:00	336	110	110	30	42,8
09:00	336	110	110	30	42,8
10:00	336	110	110	30	42,8
11:00	336	110	110	30	42,8
12:00	336	110	110	30	42,8
13:00	336	110	110	30	42,8
14:00	336	110	110	30	42,8
15:00	336	110	110	30	42,8
16:00	336	110	110	30	42,8
17:00	336	110	110	30	42,8
18:00	336	110	110	30	0
19:00	336	110	110	30	0
20:00	336	110	110	30	0
21:00	336	110	110	30	0
22:00	336	110	110	30	0
23:00	336	82,5	82,5	30	0

Hora	Línea Selección [kW]	Embalaje [kW]	Cámara Pre Frio c/u [kW]	Cámara Frio c/u [kW]	Grúas Horquilla [kW]
00:00	0	0	0	9	0
01:00	0	0	0	9	0
02:00	0	0	0	9	0
03:00	0	0	0	9	0
04:00	0	0	0	9	132
05:00	0	0	0	4,5	132
06:00	0	0	0	9	132
07:00	114	50	0	9	0
08:00	114	50	0	9	0
09:00	114	50	0	9	0
10:00	114	50	11	9	0
11:00	114	50	11	4,5	0
12:00	114	50	11	9	0
13:00	114	50	11	9	132
14:00	114	50	5,5	9	0
15:00	114	50	11	9	0
16:00	114	50	11	9	0
17:00	114	50	11	4,5	0
18:00	0	0	11	9	0
19:00	0	0	5,5	9	132
20:00	0	0	11	9	0
21:00	0	0	11	9	0
22:00	0	0	11	9	0
23:00	0	0	11	4,5	0

Tabla 7.5: Resumen datos de demanda eléctrica horaria asociadas a cada proceso del *packing*.

Al respecto, un resultado sumamente importante a considerar es que la cadena de frío es la que tiene la mayor demanda eléctrica asociada, la cual viene determinada por la potencia de los compresores. Asimismo, al estar encendidas las cámaras de pre-frío y almacenamiento también tienen un consumo importante, sin embargo, se identifica a la potencia de los compresores como aquel proceso más demandante de un *packing*.

La manera adecuada de obtener la demanda eléctrica de un *packing* predial sería recurrir directamente a uno y aplicar las metodologías propuestas en el apartado 7.1, lo cual es posible mediante el cuestionario presentado en el apartado 7.2. Sin embargo, en ausencia de estos datos numéricos, y con el fin de obtener una idea aproximada de cómo sería la demanda eléctrica de un *packing* predial para un caso de estudio a evaluar, este trabajo presenta una propuesta de estimación basada en lo realizado en el estudio “Diagnóstico para el fomento de microcentrales menores de 2 MW”, de la Comisión Nacional de Riego (CNR) [19].

En este estudio se destina un capítulo al estudio de la demanda de energía del sector agropecuario, para el cual se recurre a fuentes primarias con el fin de ofrecer una estimación de la potencia eléctrica necesaria para el funcionamiento y el consumo de energía de los rubros analizados, incluyendo plantas de procesamiento de fruta. Al respecto, si bien se analizan el empaquetado de la fruta y el almacenamiento de la fruta por separado, para ambos procesos se asocia una potencia eléctrica necesaria en función de la capacidad procesada por la planta, utilizando las siguientes relaciones: (Potencia (HP)/cajas faena), (Potencia (HP)/toneladas/hora) y (Potencia (HP)/cajas almacenadas) [19].

En vista de estas relaciones, debido a que la planta visitada está dimensionada para el procesamiento de 220.000 (kg/día), se asocia la potencia de los equipos utilizados para procesar fruta a esta capacidad diaria:

- **Potencia instalada equipos del *packing*:** $P \text{ (kW)} / 220.000 \text{ (kg/día)}$

El caso de estudio definido para obtener una aproximación de la demanda eléctrica del *packing* predial corresponde a un huerto de cerezos de 50 hectáreas ubicado en la región del Maule. La elección de este predio se debe a que son las características de donde se realizó la otra visita a terreno para obtener información de fuentes primarias [17]. Según los datos obtenidos, su periodo de cosecha de cerezos se extiende aproximadamente por 7 semanas, desde mediados de Noviembre hasta finales de Diciembre, con actividades de recolección de lunes a sábado. Esto resulta en un total de 42 días de cosecha. Además, de acuerdo con el último Catastro Frutícola realizado por la ODEPA en la región del Maule, la producción anual por hectárea de un huerto de cerezos es de 11.000 kg [38]. Asumiendo una cantidad similar procesada por día, se puede resumir la información para el caso de estudio en la tabla 7.6:

Caso de Estudio	
Tamaño Huerto [ha]	50
Producción Anual [kg/ha]	11.000
Producción Anual [kg/año]	550.000
Días de Cosecha	42
Cantidad cosechada diaria estimada [kg/día]	13.095

Tabla 7.6: Características caso de estudio y cantidad cosechada.

Considerando las capacidades de almacenamiento de las cámaras de pre frío y de almacenamiento, se puede concluir que para esta capacidad procesada por día basta con tener una

sola cámara de pre frío y de almacenamiento. En particular, incluso para el caso extremo identificado de tener que almacenar la fruta 5 días aún quedaría espacio disponible en esta. Respecto al transporte de pallets, se estima que para esta nueva capacidad de procesamiento, basta con una grúa horquilla para las operaciones necesarias, manteniendo sus horarios de carga originales.

Luego, extrapolando las potencias de los equipos a esta planta con una capacidad de 13.095 (kg/día), se pueden obtener las siguientes potencias asociadas a cada proceso:

Hora	Compresor Grande [kW]	Compresor Tornillo 1 [kW]	Compresor Tornillo 2 [kW]	Iluminación [kW]	Hidrocooler [kW]	Línea Selección [kW]
00:00	20	3	3	0	0	0
01:00	20	2	2	0	0	0
02:00	20	0	0	0	0	0
03:00	20	0	0	0	0	0
04:00	20	2	2	0	0	0
05:00	20	3	3	0	0	0
06:00	20	5	5	0	0	0
07:00	20	5	5	2	3	7
08:00	20	7	7	2	3	7
09:00	20	7	7	2	3	7
10:00	20	7	7	2	3	7
11:00	20	7	7	2	3	7
12:00	20	7	7	2	3	7
13:00	20	7	7	2	3	7
14:00	20	7	7	2	3	7
15:00	20	7	7	2	3	7
16:00	20	7	7	2	3	7
17:00	20	7	7	2	3	7
18:00	20	7	7	2	0	0
19:00	20	7	7	2	0	0
20:00	20	7	7	2	0	0
21:00	20	7	7	2	0	0
22:00	20	7	7	2	0	0
23:00	20	5	5	2	0	0

Hora	Embalaje [kW]	Cámara Pre Frío [kW]	Cámara Frío [kW]	Grúa Horquilla [kW]	Total [kW]
00:00	0	0	9	0	36
01:00	0	0	9	0	32
02:00	0	0	9	0	29
03:00	0	0	9	0	29
04:00	0	0	9	22	54
05:00	0	0	4,5	22	53
06:00	0	0	9	22	61
07:00	3	0	9	0	53
08:00	3	0	9	0	56
09:00	3	0	9	0	56
10:00	3	11	9	0	67
11:00	3	11	4,5	0	63
12:00	3	11	9	0	67
13:00	3	11	9	22	89
14:00	3	5,5	9	0	62
15:00	3	11	9	0	67
16:00	3	11	9	0	67
17:00	3	11	4,5	0	63
18:00	0	11	9	0	55
19:00	0	5,5	9	22	71
20:00	0	11	9	0	55
21:00	0	11	9	0	55
22:00	0	11	9	0	55
23:00	0	11	4,5	0	47

Tabla 7.7: Resumen datos de demanda eléctrica horaria aproximada asociadas a cada proceso del *packing* predial para caso de estudio.

Para visualizar la demanda obtenida, para los días de cosecha, es decir, de lunes a sábado, se pueden observar las siguientes curvas de demanda aproximada en la gráfica de la figura 7.16, agrupando los procesos según categorías:



Figura 7.16: Curva de demanda eléctrica diaria aproximada *packing* predial por procesos en día de cosecha para caso de estudio.

Asimismo, la gráfica de la figura 7.17 presenta la demanda eléctrica total para un día de cosecha:

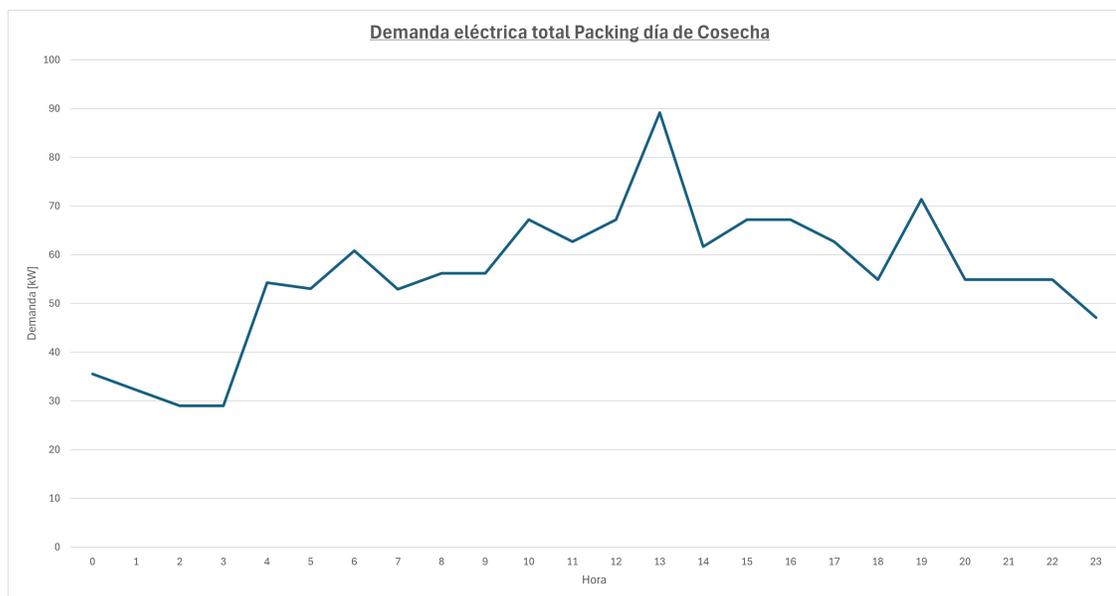


Figura 7.17: Curva de demanda eléctrica diaria aproximada *packing* predial total en día de cosecha para caso de estudio.

Para el día domingo, que no hay cosecha de acuerdo al caso de estudio [17], entonces no habría consumo asociado al procesamiento de fruta por la planta, estando apagados los

equipos eléctricos para los procesos de hidrocooler, línea de selección, embalaje, cámara de pre frío y grúa horquilla. Los equipos que se mantienen encendidos serían los compresores para mantener la temperatura necesaria, la iluminación y las cámaras de frío que almacenan la fruta. La demanda aproximada por proceso para un día de no cosecha se presenta en el gráfico de la 7.18:

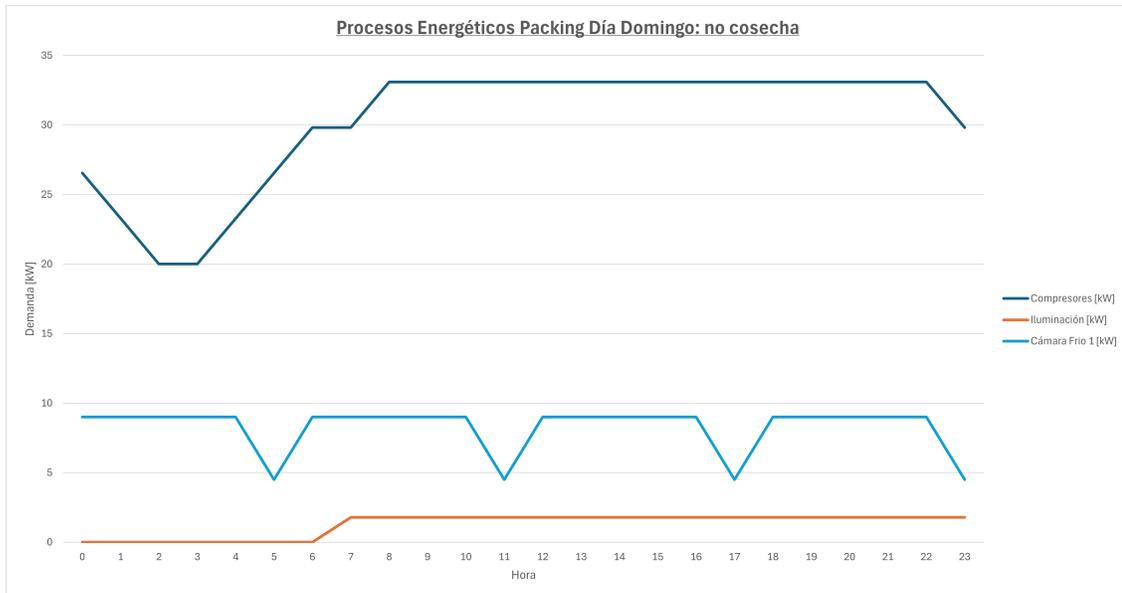


Figura 7.18: Curva de demanda eléctrica diaria aproximada *packing* predial por procesos en día de no cosecha para caso de estudio.

Por último, la gráfica de la figura 7.19 presenta la demanda eléctrica total para un día de no cosecha:

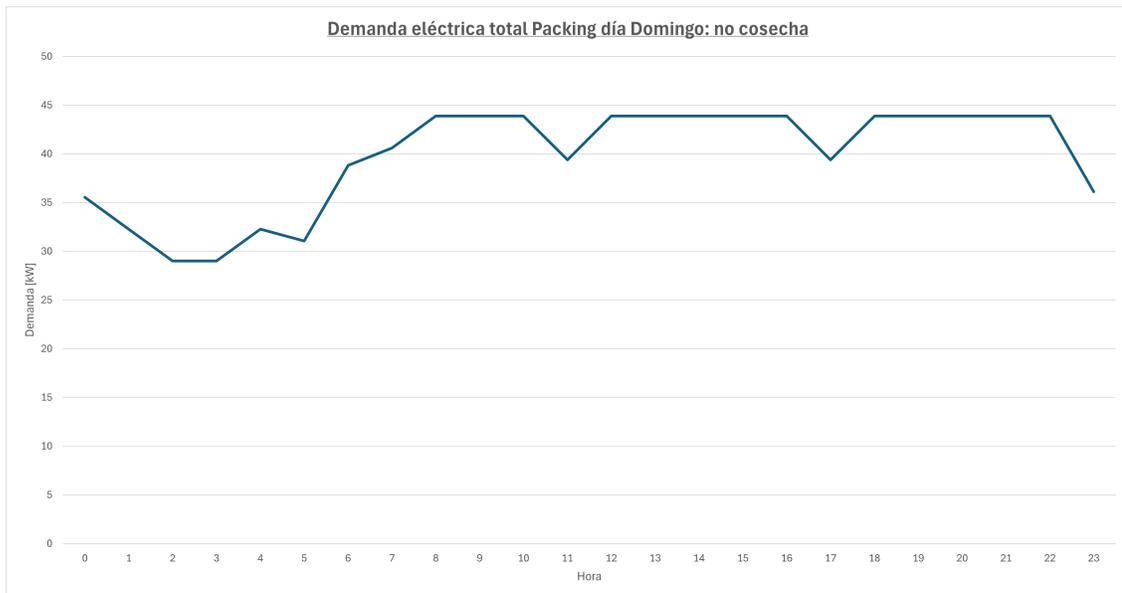


Figura 7.19: Curva de demanda eléctrica diaria aproximada *packing* predial total en día de no cosecha para caso de estudio.

Capítulo 8

Consumo energético uso de maquinaria

El uso de maquinaria agrícola actualmente depende del consumo de combustible, pues el motor diésel sigue siendo la opción preferida y más utilizada [16]. Esto se debe principalmente a que es la tecnología que ha predominado desde sus inicios y a la ventaja de usar un motor diésel, pues los tractores se operan durante varias horas continuas, y muchas veces en tareas de campo complejas, que requieren una gran cantidad de potencia y energía.

Respecto a la maquinaria agrícola pesada, Roger Stirnimann, profesor de ingeniería agrícola en la Universidad de Ciencias Aplicadas de Berna, en Suiza, identifica una serie de desafíos relacionados a esta. Según él, los conceptos totalmente eléctricos son difíciles de aplicar en la maquinaria agrícola pesada, ya que las demandas de potencia son muy altas y los tiempos de operación son prolongados. Además, los tiempos de carga, que aún son relativamente largos con la tecnología actual, representan otro obstáculo. Sin embargo, el especialista en maquinaria agrícola sí cree en que hay una oportunidad importante de desarrollo de la electromovilidad para los tractores más compactos. [16].

En particular, los tractores utilizados en la fruticultura tienden a ser más compactos y ligeros, ya que sus dimensiones deben adaptarse para poder pasar entre hileras, como muestra la figura 8.1:



Figura 8.1: Tractor Fendt e100 V Vario pasando entre hileras. Fuente: Obtenido de [60] .

Según la información recopilada en terreno, las labores en un huerto de frutales requieren tractores compactos con potencias que oscilan entre 50 HP y 100 HP aproximadamente [17]. Asimismo, los modelos de tractores eléctricos identificados en el apartado 2.2.2 del Estado del Arte, que ya están disponibles en el mercado, son compactos y están específicamente diseñados para las tareas en viticultura y fruticultura [30] [31].

Para comprender las necesidades de las labores realizadas en un huerto de frutales, de acuerdo con las etapas generales de un proceso de cultivo identificadas en la figura 2.2 y la información recopilada en terreno [17], se pueden identificar los siguientes procesos que requieren del uso de tractores:

- Cosecha
- Poda de verano
- Poda de invierno
- Tratamientos fitosanitarios

Respecto a estos procesos, estos tienen variabilidad estacional y diferente intensidad en cuanto a la demanda de maquinaria agrícola. A modo ilustrativo de cómo se puede apreciar la variación estacional de distintas labores para frutales, se presentan a continuación cartillas referenciales creadas por la Fundación para la Innovación Agraria (FIA) [61]:

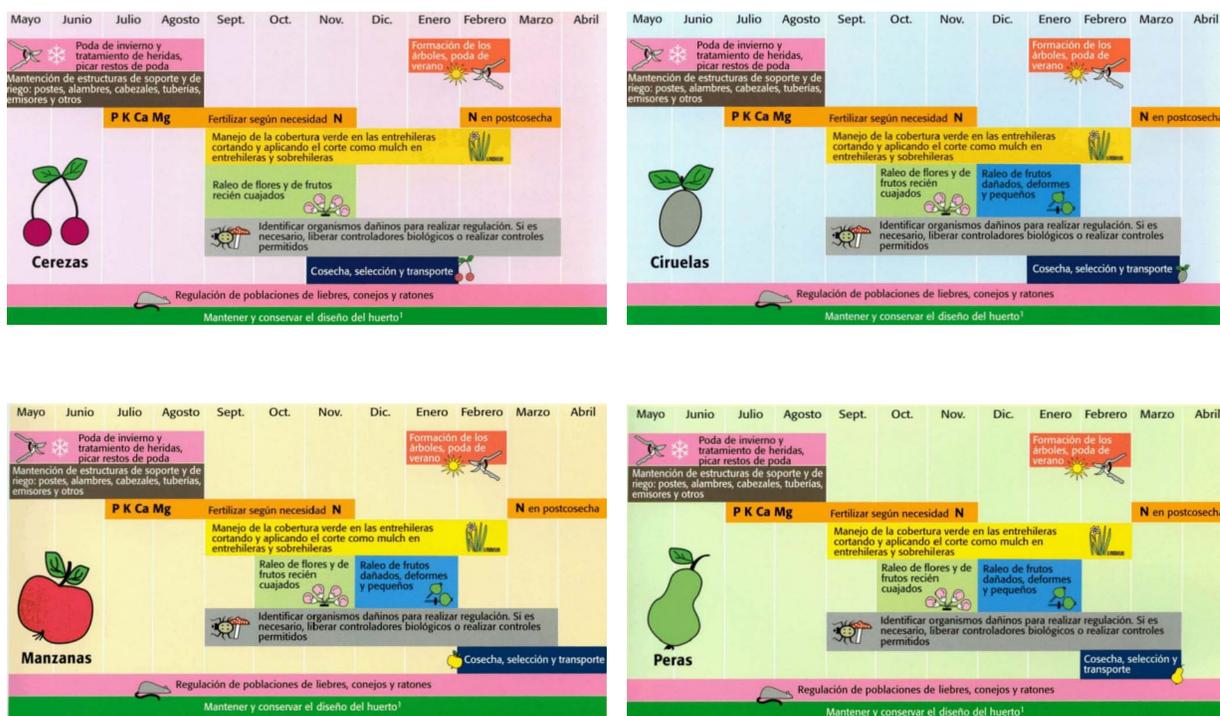


Figura 8.2: Resumen de labores para distintas especies. Fuente: Obtenido de [61]

Al respecto, se puede reconocer que si bien son fechas tentativas, se identifica que los procesos que demandan energía de poda de invierno y verano ocurrirán en periodos similares

para distintos cultivos. Diferente es con respecto a la cosecha, cuya estacionalidad no solo depende del cultivo frutal, sino también de las variedades que se tengan cultivadas en el predio. Si bien desde FIA realizaron estos calendarios para 4 especies, cabe reconocer que los procesos que consumen energía identificados son comunes para otras especies de frutales. De acuerdo con las fuentes consultadas, se puede reconocer que también se dan estos mismos procesos, para especies como paltos [62] y *berries* como arándanos y frambuesas [63].

8.1. Formulación del problema

En definitiva, con el fin de ser capaz de estimar la demanda eléctrica asociada al uso de maquinaria agrícola de un predio, es necesario considerar las necesidades de los tractores eléctricos y evaluar si es factible que cumplan la misma función que un tractor diésel. A modo preliminar, de acuerdo con la información recopilada en terreno [17] y la información encontrada sobre la tecnología actual de tractores eléctricos [30], se puede concluir que es posible ocupar tractores eléctricos para los procesos de un huerto de frutales. Sin embargo, se ha identificado que los tractores deben cumplir los siguientes criterios para cada proceso:

1. Potencia HP suficiente
2. Tiempo de funcionamiento suficiente por carga
3. Tiempo de carga compatible con las jornadas requeridas

Considerando que se cumplan estos criterios, se ha creado la siguiente metodología para la estimación de la demanda de eléctrica del uso de tractores eléctricos para cada proceso, según la figura 8.3:

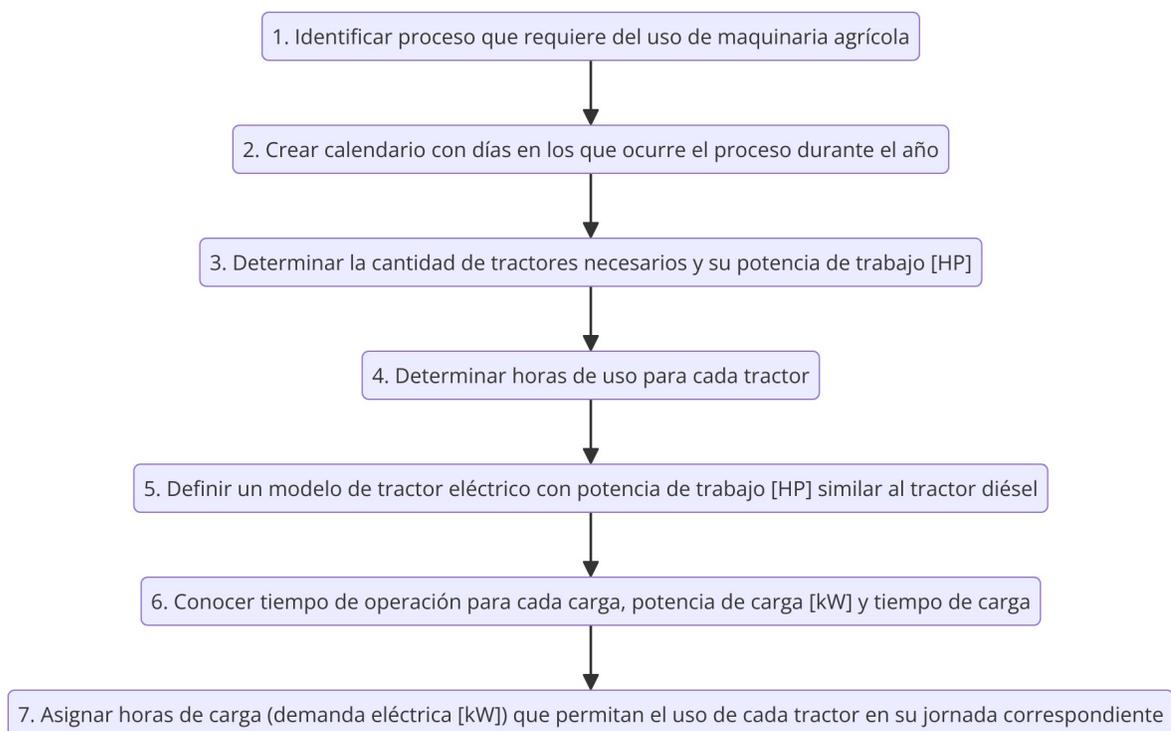


Figura 8.3: Pasos de metodología para estimar consumo eléctrico del uso de tractores eléctricos.

Respecto al paso 1, estos se presentan de manera general en la sección anterior, sin embargo, se ha podido reconocer de acuerdo con las fuentes primarias consultadas que ante la variabilidad estacional de los tratamientos fitosanitarios se pueden identificar los siguientes 6 procesos:

1. Cosecha
2. Poda de invierno
3. Poda de verano
4. Aplicación de herbicidas
5. Aplicación de fungicidas
6. Aplicación de insecticidas

Asimismo, cabe reconocer que durante los periodos de poda de invierno y verano también se ocupan tractores para el tratamiento de suelos [17]. Respecto a los pasos 2, 3 y 4, se identifica la falta de información disponible para poder sacar conclusiones al respecto. Ante esto, para poder conocer los patrones de uso de tractores de un predio es necesario recurrir a fuentes primarias. De acuerdo con la información recopilada en terreno, se ha diseñado un cuestionario con las preguntas más importantes a realizar con el fin de poder aplicar la metodología presentada en la figura 8.3.

8.2. Cuestionario uso de maquinaria agrícola

En primer lugar, en la tabla 8.1 se incluyen las siguientes preguntas generales para caracterizar al predio:

Características Predio	
1. Cultivo	¿Qué cultivo tiene este predio?
2. Tamaño	¿Qué número de hectáreas tiene el predio?
3. Ubicación	¿Dónde se encuentra ubicado el predio?

Tabla 8.1: Cuestionario uso de maquinaria agrícola: características generales del predio.

En segundo lugar, en la tabla 8.2 se realizan las siguientes preguntas para identificar los procesos que demandan energía y la maquinaria utilizada:

Maquinaria agrícola	
1. Procesos	¿Qué procesos requieren el uso de maquinaria agrícola en el predio?
2. Máquinas	¿Que tipo de maquinaria ocupan en cada proceso?

Tabla 8.2: Cuestionario uso de maquinaria agrícola: identificación de procesos y maquinaria utilizada.

En tercer lugar, una vez identificados los procesos, para cada proceso se realizan las siguientes preguntas para comprender el calendario de uso de maquinaria y su consumo asociado, Las preguntas se presentan en la tabla 8.3:

Proceso específico	
1. Época	¿En qué fecha realizan este proceso?
2. Máquinas	¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?
3. Potencia	¿Qué potencia tienen las máquinas?
4. Días	¿Cuántos días se realiza este proceso?
5. Frecuencia	¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de este proceso?
6. Horario	¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?
7. Consumo por hora	¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]
8. Consumo por hectárea	¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]

Tabla 8.3: Cuestionario uso de maquinaria agrícola: calendario de uso y consumo de combustible por proceso.

En la sección de Anexos (A) se incluye un enlace para la descarga de este cuestionario, incluyendo las preguntas realizadas para cada proceso identificado.

A continuación, en las siguientes secciones se realiza una descripción general de los procesos identificados en un huerto de frutales, además de presentar los resultados obtenidos de completar este cuestionario tras la entrevista realizada a Juan Pablo Prado, quien administra el fundo Agrícola el Laurel [17]. Si bien las respuestas a este cuestionario están sujetas a la realidad del predio visitado, la información recopilada en esta sección busca dar una idea sobre los patrones de uso de un caso real y la intensidad de cada proceso.

8.3. Características caso de estudio

En primer lugar, en las tablas 8.4 y 8.5 se presentan las características generales del predio, y la identificación de procesos y maquinaria utilizada respectivamente:

Características Predio		Respuesta
1. Cultivo	¿Qué cultivo tiene este predio?	Cerezo
2. Tamaño	¿Qué número de hectáreas tiene el predio?	50 hectáreas
3. Ubicación	¿Dónde se encuentra ubicado el predio?	Teno. Región del Maule

Tabla 8.4: Características caso de estudio visita a terreno [17].

Pregunta	Respuesta
¿Qué procesos requieren el uso de maquinaria agrícola en el predio?	Aplicaciones de productos fitosanitarios, cosecha, poda, manejo de suelos.
¿Que tipo de maquinaria ocupan en cada proceso?	Tractores. Aperos: pulverizadora, nebulizadora, picadoras de sarmientos, carros de arrastre, grúas horquilla

Tabla 8.5: Resumen información recopilada en terreno sobre procesos y maquinaria utilizada [17].

En este predio se cuenta con 5 tractores fruteros en total, de los cuales 2 corresponden al modelo Landini Rex de 75 HP y 3 al modelo Kubota MX5100 de 51 HP. Los modelos se pueden apreciar en la figura 8.4:



Figura 8.4: Tractores fruteros Landini Rex y Kubota MX5100. Fuente: Obtenido de [64] y [65].

Respecto al uso de estos tractores, se identifica a los Landini Rex, cuya potencia es mayor, como más apropiados para labores que requieren mayor trabajo, como acarreo. Los aperos y herramientas necesarias para cada proceso y labor respectiva se montan directamente a estos tractores. Asimismo, cabe indicar que la empresa cuenta con más tractores de los que tiende a ocupar durante cada día de trabajo [17].

8.4. Procesos en cultivo de frutales

8.4.1. Poda de invierno

La poda de invierno se realiza con el objetivo principal de eliminar ramas muertas o enfermas, aclarado de la copa y la reducción de ramas principales para controlar el tamaño del árbol. Se favorece una mejor penetración de luz y aire, reduce el riesgo de enfermedades y prepara el árbol para una mayor productividad en la próxima temporada [66]. Esta poda ocurre durante los meses de invierno y la tabla 8.6 presenta la información recopilada en terreno:

Pregunta	Respuesta
¿En qué fecha podan?	Junio y Julio
¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?	1 tractor con Carro de Arrastre (Kubota MX5100). 1 tractor con Trituradora (Kubota MX5100)
¿Qué potencia tienen las máquinas?	51 HP (Kubota MX5100)
¿Cuántos días se poda?	
¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de poda?	Lunes a viernes / Trituradora al final de la semana (viernes)
¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?	Jornada laboral (8 horas, 7 horas efectivas considerando 1 hora de almuerzo) / Trituradora 4 horas
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]	4-5 [L/h]
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]	-

Tabla 8.6: Resumen de información recopilada en terreno para poda de invierno [17].

Para este proceso, debido a que la poda es manual, se utiliza maquinaria para el acarreo de escaleras y las herramientas necesarias. Además, es necesario la operación de un tractor con una trituradora enganchada que se ocupa aproximadamente 4 horas al final de la semana para picar los restos de poda que quedaron. A continuación, la figura 8.5 presenta un tractor equipado con una trituradora o picadora de sarmientos:



Figura 8.5: Tractor Fendt e100 V Vario equipado con una trituradora. Fuente: Obtenido de [60] .

8.4.2. Poda de verano

La poda de verano de los árboles frutales se realiza durante el periodo vegetativo principalmente para controlar el crecimiento, mejorar la circulación de aire y luz, y eliminar ramas no productivas [66]. Además, fomenta el desarrollo de yemas frutales para la próxima temporada, mejorando la producción. Como dice su nombre, esta ocurre durante el verano y la tabla 8.7 presenta la información recopilada para este proceso:

Pregunta	Respuesta
¿En qué fecha podan?	Diciembre
¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?	1 tractor Kubota MX5100 con Trituradora
¿Qué potencia tienen las máquinas?	51 HP
¿Cuántos días se poda?	Los días de diciembre en paralelo con la cosecha
¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de poda?	Al final de la semana (Sábado)
¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?	4 horas
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]	4-5 [L/h] Kubota MX5100
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]	-

Tabla 8.7: Resumen de información recopilada en terreno para poda de verano [17].

Durante el mes de diciembre, se realiza la poda manual con tijeras en paralelo con la cosecha, con el fin de aprovechar la mano de obra. Por consiguiente, el uso de maquinaria para la poda se acopla a la cosecha, para lo cual los tractores fruteros también transportan escaleras y las herramientas necesarias para este proceso. El consumo de energía adicional de este proceso corresponde al uso de un tractor con una trituradora de restos de poda que opera durante aproximadamente 4 horas a final de la semana [17].

8.4.3. Cosecha

Respecto a la temporada de cosecha, esta corresponde al proceso de mayor intensidad y donde se requiere mayor uso de maquinaria, tanto en cantidad de máquinas como frecuencia de uso, como muestran los resultados de la tabla 8.8:

Pregunta	Respuesta
¿En qué fecha cosechan?	Mediados de Noviembre a finales de Diciembre (7 semanas aproximadamente)
¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?	2 tractores Landini Rex, 1 tractor Kubota MX5100. Aperos: Grúa Horquilla y Carros de Arrastre
¿Qué potencia tienen las máquinas?	75 HP (Landini Rex), 51 HP (Kubota MX5100)
¿Cuántos días se cosecha?	42 días aproximadamente
¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de cosecha?	Lunes a sábado
¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?	Entre 6 am y 2 pm (8 horas, 7 horas efectivas considerando 1 hora de almuerzo)
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]	6-7 [L/h] Landini Rex / 4-5 [L/h] Kubota MX5100
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]	-

Tabla 8.8: Resumen de información recopilada en terreno para cosecha [17].

En este caso, la cosecha debe ser realizado temprano, con el fin de que la fruta cosechada este a la menor temperatura posible. Ante la intensidad de la cosecha, es necesario del uso de 3 tractores, de los cuales dos se ocupan con carros de arrastre para transportar tanto los bins de fruta cosechada como herramientas. El otro tractor equipado con una grúa horquilla tiene como finalidad el movimiento de bins y carga de los carros de arrastre. La cosecha se prolonga durante aproximadamente 7 semanas, para las cuales la frecuencia es intensiva, pues se debe cosechar todos los días a medida que van madurando las diferentes variedades. No se cosecha los domingos únicamente porque resulta más caro contratar la mano de obra [17].

8.4.4. Tratamientos fitosanitarios

Respecto a los tratamientos fitosanitarios, se pueden separar en las siguientes categorías:

- Aplicación de fungicidas
- Aplicación de herbicidas
- Aplicación de insecticidas

Para la aplicación de fungicidas e insecticidas, se hace uso de una nebulizadora, como muestra la figura 8.6:



Figura 8.6: Tractor Fendt e100 V Vario equipado con una nebulizadora. Fuente: Obtenido de [60].

Para la aplicación de herbicidas, es necesario montar al tractor una pulverizadora con una barra para aplicar herbicida.

Al respecto, cabe mencionar que a diferencia de los procesos anteriores, es sumamente variable la necesidad de aplicación de estos tratamientos fitosanitarios. En definitiva, depende de muchos factores, principalmente climáticos, tales como la temperatura, viento, humedad, lluvia, entre otras. Para esto, en un predio agrícola se cuenta con un calendario foliar anual con las necesidades de cada tratamiento, el cual sin embargo está sujeto a variaciones dependiendo de las condiciones externas. Por consiguiente, la información presentada a continuación corresponde a una estimación para efectos de este estudio en vista del calendario del año anterior [17].

8.4.4.1. Aplicación de fungicidas

Los fungicidas se ocupan para evitar el desarrollo de hongos, por lo cual estos concentran su operación en los meses de mayor humedad, aplicándose típicamente en mayo, junio y julio. La figura 8.9 presenta la información recopilada:

Pregunta	Respuesta
¿En qué fecha se aplican fungicidas?	Mayo, Junio y Julio
¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?	1 tractor con Nebulizadora (Kubota MX5100)
¿Qué potencia tienen las máquinas?	51 HP (Kubota MX5100)
¿Cuántos días se aplican fungicidas?	
¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de fungicidas?	1 día por semana
¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?	Jornada laboral (8 horas, 7 horas efectivas considerando 1 hora de almuerzo)
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]	4-5 [L/h]
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]	-

Tabla 8.9: Resumen de información recopilada en terreno para aplicación de fungicidas [17].

Cabe mencionar que el número de días por semana puede variar en función de las lluvias existentes.

8.4.4.2. Aplicación de herbicidas

Los herbicidas se ocupan para el control de malezas, para lo cual se aplican durante los meses de mayo y septiembre, presentándose en la tabla 8.10 la información recopilada para este proceso:

Pregunta	Respuesta
¿En qué fecha se aplican herbicidas?	Mayo y Septiembre
¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?	1 tractor con Pulverizadora (Kubota MX5100)
¿Qué potencia tienen las máquinas?	51 HP (Kubota MX5100)
¿Cuántos días se aplican herbicidas?	
¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de herbicidas?	1 día por semana
¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?	Jornada laboral (8 horas, 7 horas efectivas considerando 1 hora de almuerzo)
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]	4-5 [L/h]
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]	-

Tabla 8.10: Resumen de información recopilada en terreno para aplicación de herbicidas [17].

8.4.4.3. Aplicación de insecticidas

Respecto a los insecticidas, estos se aplican en primavera y verano, con mayor frecuencia hacia la temporada de cosecha [17]. Se estima la necesidad de aplicar insecticidas dos días por semana, semana por medio durante los periodos pre y post cosecha, y dos días por semana durante todas las semanas del periodo de cosecha. La información recopilada para ambos periodos se presenta en las tablas 8.11 y 8.12:

Pregunta	Respuesta
¿En qué fecha se aplican insecticidas?	Octubre, Enero y Febrero
¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?	1 tractor Kubota MX5100 con Nebulizadora
¿Qué potencia tienen las máquinas?	51 HP
¿Cuántos días se aplican insecticidas?	
¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de insecticidas?	2 días semana por medio
¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?	4 horas 8 PM (baja temperatura de las hojas)
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]	4-5 [L/h]
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]	

Tabla 8.11: Resumen de información recopilada en terreno para pesticidas antes y después de la cosecha [17].

Pregunta	Respuesta
¿En qué fecha se aplican insecticidas?	Noviembre y Diciembre
¿Qué máquinas ocupan? ¿Cuántas máquinas ocupan?	1 tractor Kubota MX5100 con Nebulizadora
¿Qué potencia tienen las máquinas?	51 HP
¿Cuántos días se aplican insecticidas?	
¿Ocurre en días seguidos o cómo funciona el calendario de insecticidas?	2 días por semana
¿Cuántas horas se ocupa la maquinaria agrícola por día?	4 horas 8 PM (baja temperatura de las hojas)
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/h]	4-5 [L/h]
¿Está cuantificado el uso de combustible asociado a este proceso? [L/ha]	

Tabla 8.12: Resumen de información recopilada en terreno para insecticidas durante la cosecha [17].

Su horario de operación es de aproximadamente 4 horas diarias durante la noche. Se identifica a las 20:00 como la hora donde suele iniciar este proceso, debido a que las temperaturas ya han bajado lo suficiente para poder aplicar estos pesticidas sin dañar a las hojas.

8.5. Tractor eléctrico compatible con procesos

De acuerdo con la metodología propuesta en la figura 8.3, con el fin de estimar el consumo eléctrico de reemplazar el uso de tractores diésel por eléctricos, es necesario primero entender las lógicas de uso de los tractores fruteros. Luego, se debe definir un modelo de tractor eléctrico basado en la tecnología actual que pueda desempeñar las tareas descritas.

Al respecto, cabe recordar los siguientes criterios definidos para determinar si un tractor eléctrico es compatible con las operaciones de un tractor diésel y sus necesidades:

1. Potencia HP suficiente
2. Tiempo de funcionamiento suficiente por carga
3. Tiempo de carga compatible con las jornadas requeridas

Para obtener una estimación del consumo eléctrico, se ha seleccionado el tractor eléctrico Fendt e100 V Vario, mencionado en el Estado del Arte, apartado 2.2.2. Este tractor, diseñado específicamente para la viticultura y fruticultura [30], se destaca como el modelo de la tecnología actual que mejor cumple con los criterios establecidos. Además, proporciona información clara sobre la potencia eléctrica, los tiempos de carga de la batería y la duración de funcionamiento. A continuación, se presentan sus características más relevantes [30] [67]:

1. **Potencia:** 75 HP
2. **Tiempo de uso:** Aproximadamente 5 horas por carga
3. **Carga lenta:** Potencia de carga: 22 kW / Tiempo de carga: 5 horas
4. **Carga rápida:** Potencia de carga: 80 kW / Tiempo de carga: 45 minutos para recargar de 20 % a 80 %

De acuerdo con estas características, el tractor eléctrico Fendt e100 V Vario puede perfectamente realizar las tareas que originalmente realizaban los tractores Landini Rex de 75 HP y Kubota MX5100 de 51 HP. Aunque el modelo Fendt e100 V Vario de 75 HP podría estar sobredimensionado para las tareas del tractor Kubota MX5100 de 51 HP, se ha decidido utilizar este modelo para las estimaciones debido a la falta de un tractor eléctrico que cumpla con los criterios definidos y tenga una potencia similar al Kubota. Por lo tanto, las siguientes estimaciones se basan en las características del Fendt e100 V Vario.

8.6. Estimación demanda eléctrica maquinaria agrícola la caso de estudio

Con la información recopilada en terreno y el tractor eléctrico Fendt e100 V Vario es posible aplicar la metodología propuesta en la figura 8.3, para lo cual es necesario asignar horas de carga para cada proceso. Ante esto, se ocupa la siguiente lógica:

1. Priorizar cargas lentas si la cantidad de tractores necesarios a utilizar lo permite.
2. Establecer horarios de carga en torno a horas de mayor generación solar para aprovechar recurso en vista de contar con un sistema agrivoltaico.
3. En relación con los puntos anteriores, buscar cargar un tractor el día anterior durante las horas de día, con el fin de evitar cargarlo durante la noche que no hay generación solar.

Esta lógica está sujeta a la estacionalidad de cada proceso, la coincidencia de estos y la cantidad de máquinas disponibles. En particular, cabe considerar que los siguientes procesos coinciden:

1. Aplicación de Fungicidas y Herbicidas en mayo
2. Aplicación de Fungicidas y Poda de Invierno en junio y julio
3. Aplicación de Insecticidas y Cosecha en noviembre
4. Aplicación de Insecticidas, Cosecha y Poda de Verano en diciembre

En las siguientes secciones se presentan los horarios asignados considerando todos estos factores. Una vez definidos todos los horarios de carga, se generaron códigos de Python para cada proceso, siguiendo el diagrama de bloques mostrado a continuación, con el fin de crear vectores de consumo eléctrico:

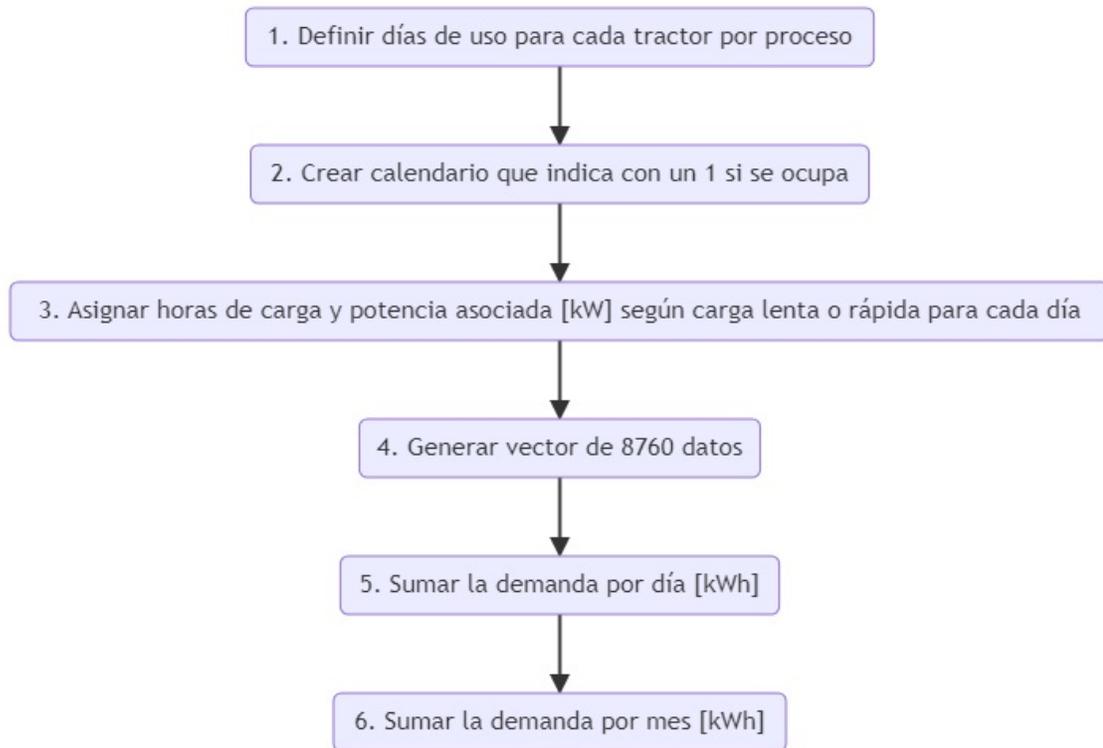


Figura 8.7: Diagrama de bloques para creación de perfil de demanda eléctrica procesos que usan maquinaria agrícola.

Luego, con los perfiles de demanda obtenidos, se creó un calendario para visualizar mejor esta información. Este calendario se utiliza para representar de manera más clara los horarios de carga que se describen a continuación, utilizando el año 2023 como referencia.

8.6.1. Insecticidas antes y después de la cosecha

Para los meses de enero, febrero y octubre el único proceso activo es la aplicación de insecticidas, con una frecuencia de 2 veces por semana, semana por medio. Para esto, debido a que se ocupa el tractor con nebulizadora aproximadamente a las 20:00 durante 4 horas, se asignan horas de carga diurnas con el fin de aprovechar la generación solar. En particular, para este caso de estudio se establece entre las 11:00 y las 16:00 como horas de alto recurso solar, de acuerdo con los perfiles obtenidos del Explorador Solar para la ubicación del predio agrícola en Teno [55]. Se define el siguiente patrón de carga para los días de uso del tractor:

1. **Tractor de aplicación Insecticidas antes y después de la cosecha:** Carga lenta entre 11:00 y 16:00 días miércoles y viernes

La figura 8.8 presenta la visualización de la demanda eléctrica horaria para las primeras semanas de enero, patrón similar al que ocurre en febrero y octubre:

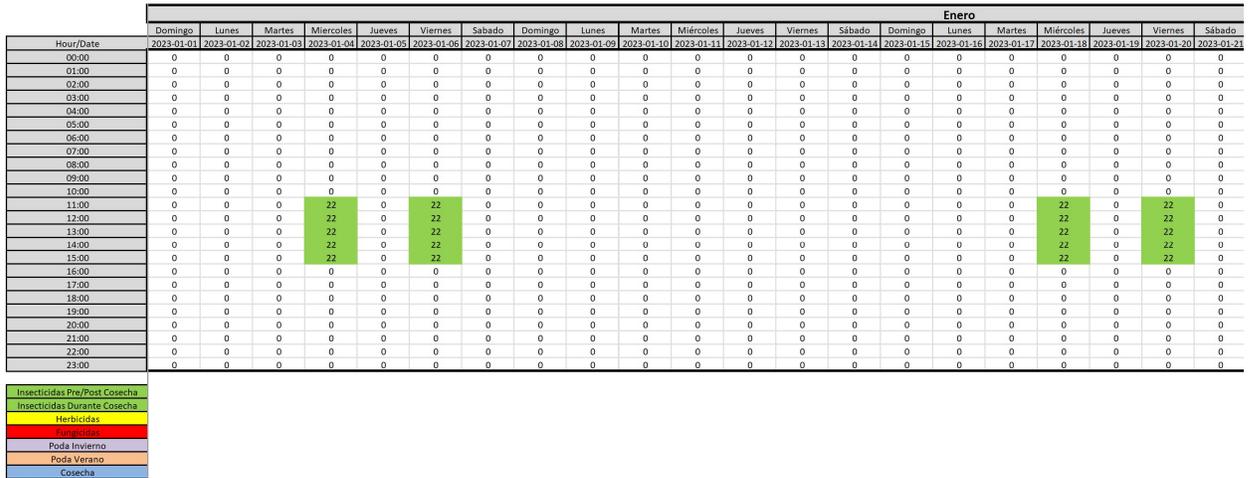


Figura 8.8: Calendario demanda eléctrica aplicación de insecticidas antes y después de la cosecha.

8.6.2. Fungicidas y herbicidas

Durante el mes de mayo es necesario la aplicación tanto de fungicidas como herbicidas, contemplando ambos un día por semana, con tiempo de uso de una jornada laboral (8 horas, 7 horas efectivas considerando 1 hora de almuerzo). En vista de este escenario, debido a que no hay mayor demanda de tractores eléctricos, se dejan cargados días anteriores a su operación, mientras que se ocupa la hora de almuerzo del día de operación para una carga rápida que permita seguir utilizando el tractor en la tarde. Se definen los siguientes días para llevar a cabo las cargas por proceso:

1. **Tractor de aplicación Fungicidas:** Carga lenta entre 11:00 y 16:00 día sábado. Carga rápida a las 14:00 en día de uso (lunes)
2. **Tractor de aplicación Herbicidas:** Carga lenta entre 11:00 y 16:00 día domingo. Carga rápida a las 14:00 en día de uso (martes)

La figura 8.9 presenta la visualización de la demanda eléctrica horaria para las primeras semanas de mayo considerando estos dos procesos:

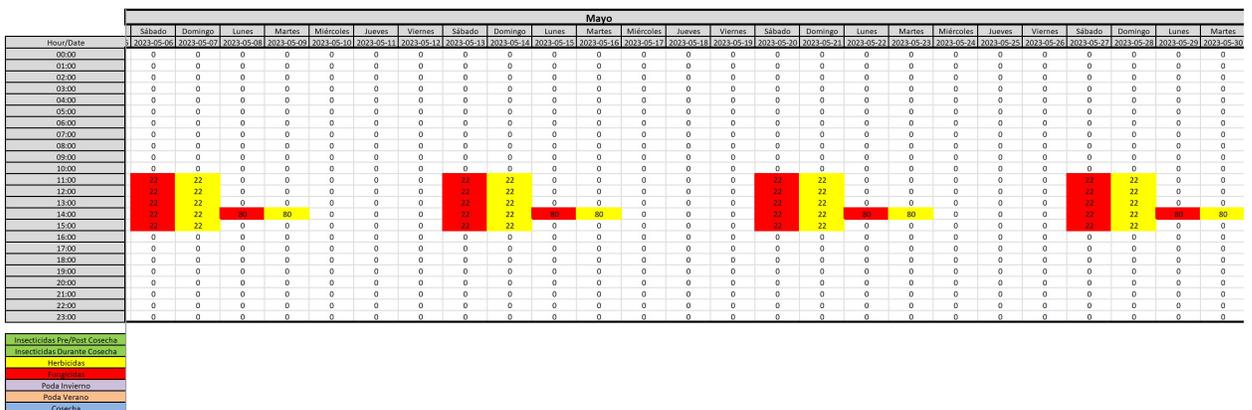


Figura 8.9: Calendario demanda eléctrica aplicación de fungicidas y herbicidas.

Cabe indicar que para el mes de septiembre que también toca aplicar herbicidas, se mantiene el mismo patrón. Respecto a la hora de almuerzo y carga en torno a las 14:00, esta se definió de esta manera con el fin de que no coincidiera con la hora de almuerzo y carga de la poda de invierno, proceso que se analiza a continuación

8.6.3. Fungicidas y poda de invierno

Para los meses de junio y julio es necesario la aplicación de fungicidas y realización de poda de invierno. Para ello, se mantienen los patrones de carga de los fungicidas, es decir:

- **Tractor de aplicación Fungicidas:** Carga lenta entre 11:00 y 16:00 día sábado. Carga rápida a las 14:00 en día de uso (lunes)

En relación con la poda de invierno, dado que esta se lleva a cabo de lunes a viernes durante la jornada laboral, se sigue una lógica similar a la mencionada anteriormente. El tractor se carga durante las horas diurnas del día anterior al que se va a utilizar. Es decir, el tractor que se utilizará el lunes se deja cargando mediante carga lenta durante el día domingo. De manera análoga, esto se aplica para los demás días de la semana. Además, se considera una carga rápida para el tractor en uso durante la hora de almuerzo, a las 13:00.

Debido a que para la poda de invierno, es necesario pasar un tractor al final de la semana durante aproximadamente 4 horas para triturar los restos de la poda. En vista de esto, también se incluye una carga lenta durante las horas diurnas del día viernes, resultando el siguiente patrón de carga para este proceso:

- **Tractores de poda de invierno:** Carga lenta entre 11:00 y 16:00 de domingo a viernes. Carga rápida a las 13:00 de lunes a viernes.

La figura 8.10 presenta la visualización de la demanda eléctrica horaria para las primeras semanas de mayo considerando estos dos procesos:

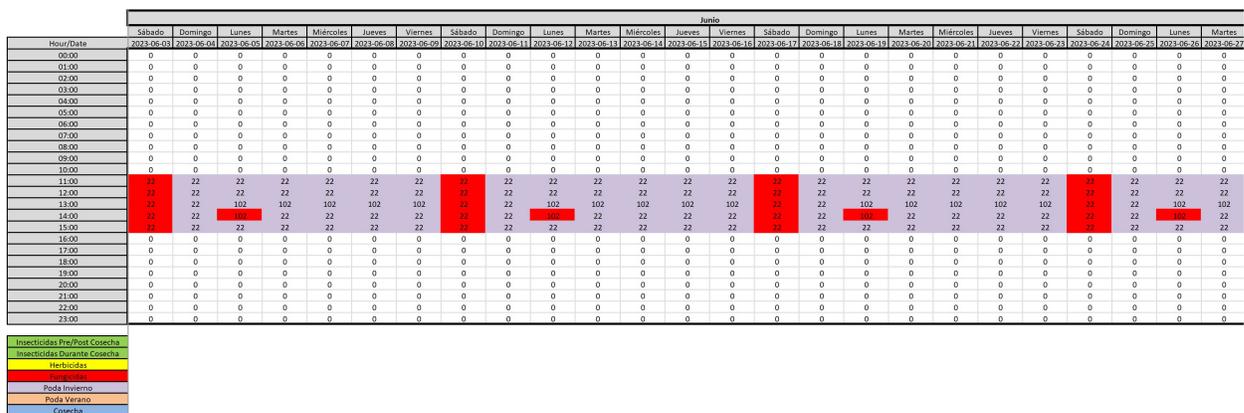


Figura 8.10: Calendario demanda eléctrica aplicación de Fungicidas y Poda de Invierno.

Respecto al valor de demanda eléctrica de 102 kW, cabe aclarar que este corresponde a la suma de la carga lenta de 22 kw de un tractor y la carga rápida de 80 kw del otro.

8.6.4. Cosecha, insecticidas y poda de verano

Para el mes de noviembre una vez que empieza la temporada de cosecha coinciden los procesos de cosecha y aplicación de insecticidas, para lo cual es necesario un mayor uso de tractores y más intensidad, habiendo menos horas para cargar los tractores que permitan el aprovechamiento del recurso solar. Para el proceso de cosecha, este contempla 3 tractores operando entre 6:00 y 14:00 (8 horas, 7 horas efectivas considerando 1 hora de almuerzo) de lunes a sábado. Mientras tanto, la aplicación de insecticidas requiere de aproximadamente 4 horas durante 2 días por semana a las 20:00.

Considerando las necesidades de estos tractores, se definen los siguientes patrones de carga:

- **Tractores de cosecha:** Carga rápida entre 12:00 y 15:00 día domingo para los 3 tractores por separado para usar al día siguiente. Carga rápida entre 16:00 y 19:00 de lunes a viernes para los 3 tractores por separado para usar al día siguiente. Carga rápida a las 10:00 de lunes a sábado para los 3 tractores simultáneamente para poder continuar uso durante días de cosecha.
- **Tractor de aplicación insecticidas durante cosecha:** Carga lenta entre 11:00 y 16:00 para días de uso días lunes y miércoles

La figura 8.11 presenta la visualización de la demanda eléctrica horaria para las semanas de noviembre considerando estos dos procesos:

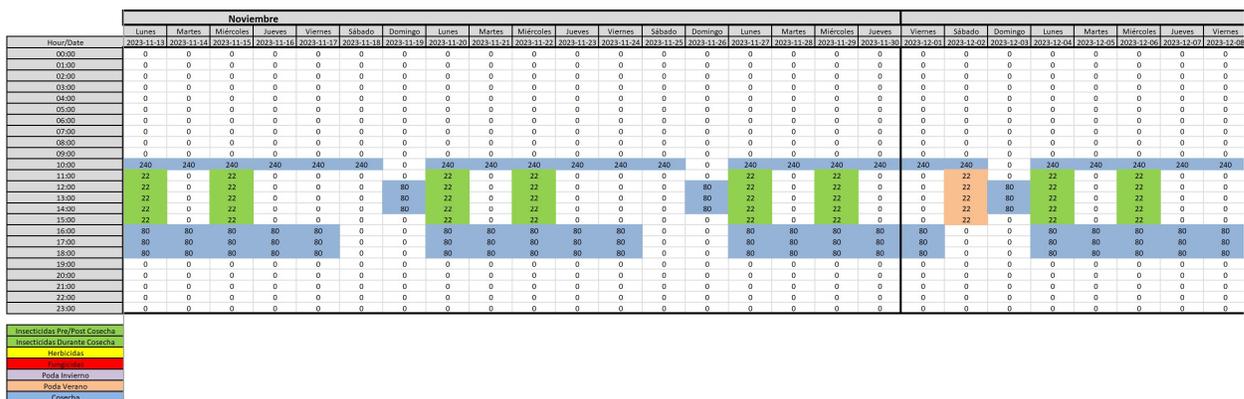


Figura 8.11: Calendario demanda eléctrica aplicación de insecticidas y cosecha.

Asimismo, para el mes de diciembre, debido a la poda de verano también es necesario pasar un tractor al final de la semana durante aproximadamente 4 horas triturando los restos de la poda. Considerando este proceso, es que también se incluye una carga lenta durante las horas diurnas del día sábado, resultando el siguiente patrón de carga para este proceso:

- **Tractores de poda de verano:** Carga lenta entre 11:00 y 16:00 día sábado.

Luego, la figura 8.12 presenta la visualización de la demanda eléctrica horaria para las semanas de diciembre considerando estos tres procesos:

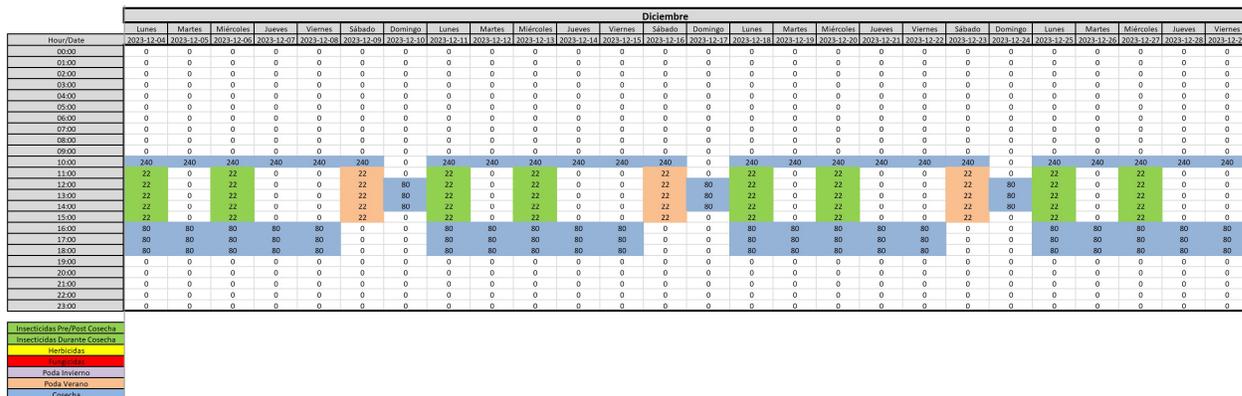


Figura 8.12: Calendario demanda eléctrica aplicación de insecticidas, cosecha y poda de verano.

Como se puede observar, la mayor demanda de electricidad se concentra en este mes, lo cual se atribuye en primer lugar a la intensidad de uso de maquinaria que implica la temporada de cosecha. En segundo lugar, debido a que para este mes ocurren también los procesos de aplicación de insecticidas y poda de verano. A continuación, se analiza la distribución de consumo eléctrico mensual para este perfil estimado de demanda eléctrica.

8.6.5. Consumo eléctrico mensual estimado tractores eléctricos

Debido a que esta estimación se realiza para obtener la demanda eléctrica con resolución horaria, es posible analizar también el comportamiento del consumo eléctrico con resolución mensual. Para ello, se suma la demanda eléctrica horaria para cada mes por proceso, obteniendo el siguiente en la 8.13:

Mes	Cosecha [kWh]	Poda Invierno [kWh]	Poda Verano [kWh]	Fungicidas [kWh]	Herbicidas [kWh]	Insecticidas [kWh]	Total [kWh]
Enero	0	0	0	0	0	440	440
Febrero	0	0	0	0	0	440	440
Marzo	0	0	0	0	0	0	0
Abril	0	0	0	110	110	0	220
Mayo	0	110	0	840	840	0	1.790
Junio	0	4.620	0	760	0	0	5.380
Julio	0	4.430	0	950	0	0	5.380
Agosto	0	0	0	0	0	0	0
Septiembre	0	0	0	0	760	0	760
Octubre	0	0	0	0	0	440	440
Noviembre	7.680	0	0	0	0	990	8.670
Diciembre	12.240	0	550	0	0	880	13.670

Tabla 8.13: Resumen de consumo eléctrico mensual por proceso para estimación demanda eléctrica maquinaria agrícola caso de estudio.

Cabe mencionar con respecto a los consumos de abril, que los 110 kWh para herbicidas y fungicidas respectivamente se deben a las cargas de los días sábado y domingo para ocupar los tractores en la primera semana de mayo. Para visualizar esta información de mejor manera, esta se grafica, cuyo resultado se presenta en la figura 8.13:

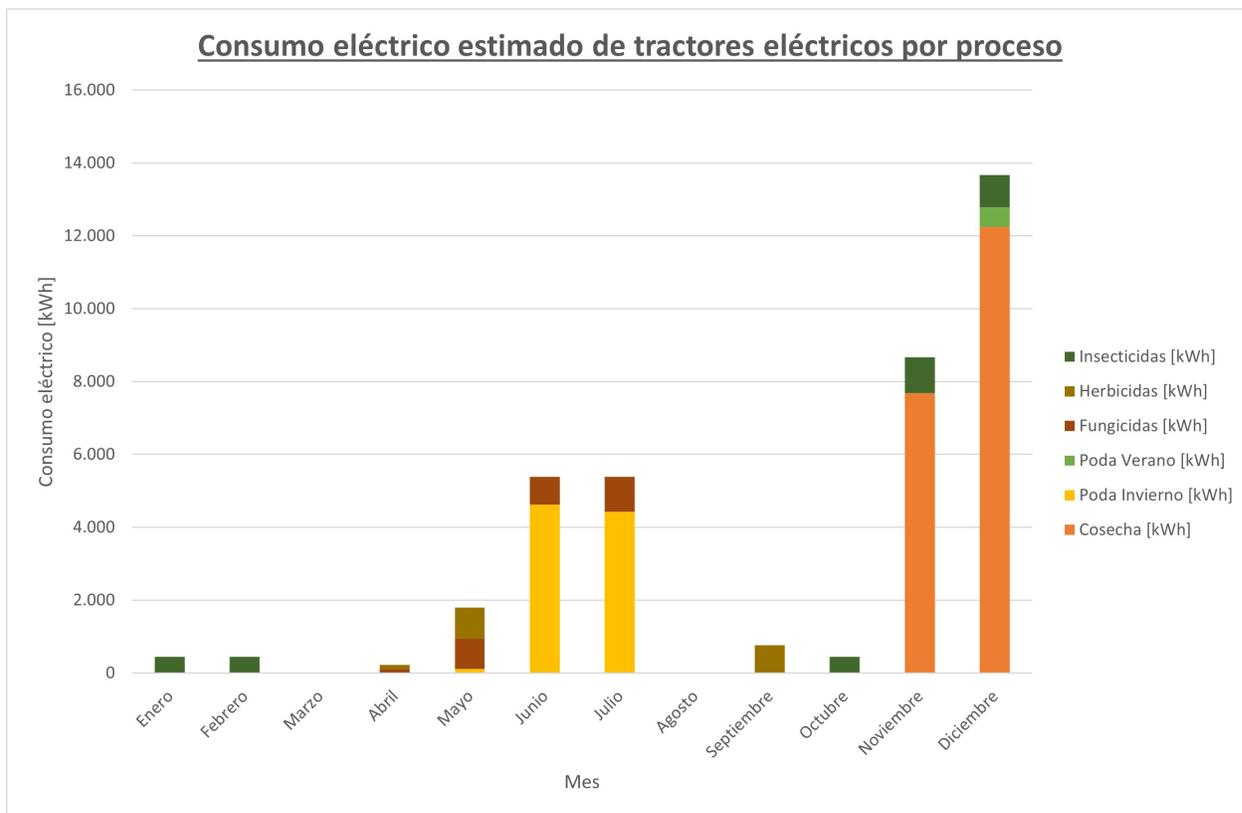


Figura 8.13: Consumo eléctrico mensual estimado de tractores eléctricos por proceso.

Como se puede observar, el mayor consumo eléctrico se asocia a la temporada de cosecha, debido a la cantidad de tractores necesarios y la intensidad de su uso. También es interesante notar el alto consumo asociado a la poda de invierno, lo cual representa un aumento en el consumo eléctrico durante los meses invernales.

Según los resultados preliminares de la herramienta de riego, los cultivos tienen un menor consumo eléctrico relacionado con el riego durante el invierno. Esta observación sugiere que el uso de tractores, al generar un consumo eléctrico significativo en invierno, podría ser suplido por la generación local si se cuenta con sistemas agrivoltaicos.

Finalmente, la figura 8.14 presenta una gráfica del consumo eléctrico estimado total del uso de tractores eléctricos:

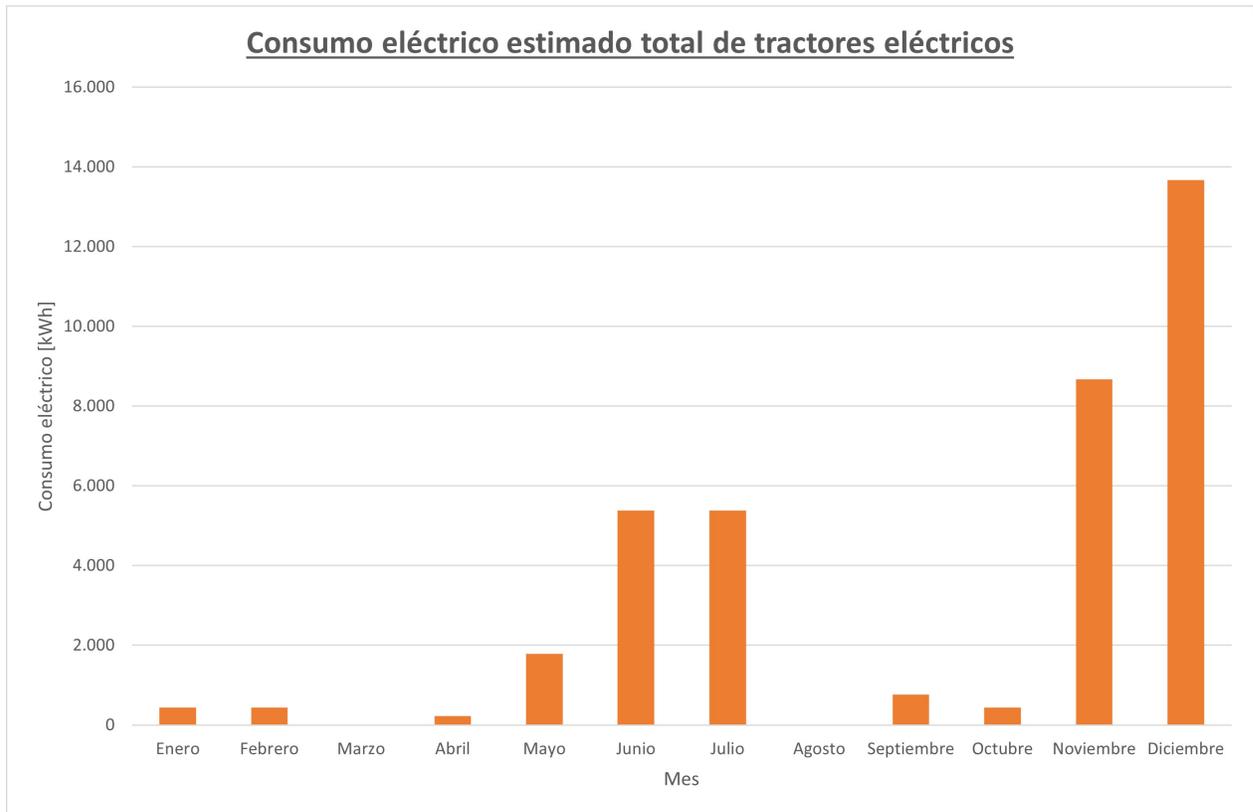


Figura 8.14: Consumo eléctrico mensual estimado total de tractores eléctricos.

Capítulo 9

Evaluación de sistemas agrivoltaicos para autoconsumo

A continuación, en esta sección se evalúan casos de estudio con el fin obtener conclusiones sobre el potencial de integración de sistemas agrivoltaicos para autoconsumo. Para ello, se realiza un análisis energético en los casos de estudio definidos, comparando el comportamiento de la generación solar con la demanda eléctrica.

Para evaluar el costo mensual asociado a la tarifa eléctrica, se tiene en cuenta que todos los casos de estudio cuentan con una potencia instalada superior a 10 kW, lo que imposibilita el uso de la tarifa BT1/AT1. En su lugar, se opta por utilizar la tarifa BT2/AT2, ya que permite un análisis que se enfoque de mejor manera en la influencia de la generación local y el impacto que tiene que la energía se destine para autoconsumo o inyección, evitando que los resultados de costo total se vean afectados por la influencia de las horas punta. A continuación, se presenta la herramienta utilizada para calcular el costo de esta tarifa:

9.1. Código para cálculo costo de Tarifa BT2

La metodología para el cálculo de la Tarifa BT2 consiste en la creación de un código de Python que calcule la siguiente expresión para cada mes:

$$\text{Costo Total } [$/mes] = CF + CSP \cdot E + CT \cdot E + CE \cdot E + CP \cdot P - VI \cdot I \quad (9.1)$$

- **E**: Energía consumida [kWh]
- **P**: Potencia contratada [kW]
- **I**: Energía inyectada [kWh]
- **CF**: Cargo fijo mensual [\$/mes]
- **CSP**: Cargo por servicio público (cargo único por uso troncal) [\$/kWh]
- **CT**: Cargo por transporte [\$/kWh]
- **CE**: Cargo por energía [\$/kWh]
- **CP**: Cargo por potencia contratada [\$/kW/mes]

- **VI:** Valor de inyección de la energía [$\$/kWh$]

Al respecto, de acuerdo con la Ley 21.118, en caso de que en un mes el valor asociado a la energía inyectada a la red implique que el costo de la tarifa sea negativo, este costo se descuenta del mes siguiente [25]. Para realizar el cálculo y distinguir entre energía consumida e inyectada, el código lee un archivo de *input* que posee la potencia eléctrica horaria neta, que se obtiene de la resta del vector de demanda eléctrica y el vector de generación solar. De esta manera, aquellos valores que sean positivos corresponden a demanda eléctrica, mientras que aquellos valores que sean negativos corresponden a inyecciones a la red.

Cabe mencionar que el *input* tiene una columna horaria que incluye 17520 datos, los cuales corresponden a la resolución horaria de 2 años, con 8760 datos cada uno. La segunda columna corresponde a la potencia eléctrica y e incluye el perfil anual obtenido 2 veces, una vez para cada año. La razón de esto es que los valores de la tarifa dependen de tramos de consumo en los cuales se consideran los últimos 12 meses, por lo que es necesario tener meses anteriores para los meses estudiados.

Como valores referenciales para calcular los costos mensuales de esta tarifa se ocupan los datos numéricos de la distribuidora Cooperativa Eléctrica de Curicó [68], considerando los valores para la comuna de Curicó. Los cargos y valores numéricos para la tarifa de suministro eléctrico BT2 se encuentran en la tabla 9.1:

Tarifa	Nombre del cargo	Cargo Decreto Tarifario 11T de 2016	Tramo de consumo	Unidad	C/IVA (\$)
BT2	Administración del servicio	Cargo fijo mensual	Todos	\$/mes	1.046,93
	Servicio Público	Cargo por uso del sistema de transmisión	Todos	\$/kWh	23,35
			M1		0,75
			M2		1,60
			M3		2,67
			M4		3,41
			M5		3,73
	Cargo por energía	Cargo por Energía	P1	\$/kWh	92,16
			P2		99,38
			P3		108,85
	Cargo por potencia contratada	Cargo por potencia contratada presente en punta	P1	\$/kW/mes	18.487,36
			P2		19.831,05
			P3		19.831,05
		Cargo por potencia contratada parcialmente presente en punta	P1		13.852,87
P2			15.132,57		
P3			15.132,57		

Tabla 9.1: Cargos y valores para tarifa de suministro eléctrico BT2 [68]

Asimismo, el valor de la inyección se presenta en la tabla 9.2:

Tipo de inyección de energía	Tramo de consumo	Unidad	Neto (\$)
Para clientes en opciones tarifarias BT	Todos	\$/kWh	104,772

Tabla 9.2: Valor de inyección para clientes BT [68].

Respecto a los tramos de consumo, primero se tienen los de fondo de estabilización de tarifas, Ley 21.472:

- Tramo 1 (M1): consumo menor o igual a 350 kWh.
- Tramo 2 (M2): consumo superior a 350 kWh y menor o igual a 500 kWh.

- Tramo 3 (M3): consumo superior a 500 kWh y menor o igual a 1000 kWh.
- Tramo 4 (M4): consumo superior a 1000 kWh y menor o igual a 5000 kWh.
- Tramo 5 (M5): consumo del mes superior a 5000 kWh.

Luego, están los tramos de consumo mecanismo de protección al cliente, Ley 21.472:

- Tramo 1 (P1): consumo promedio últimos 12 meses inferior a 350 kWh.
- Tramo 2 (P2): consumo promedio últimos 12 meses sobre 350 hasta 500 kWh.
- Tramo 3 (P3): consumo promedio últimos 12 meses superior a 500 kWh.

Respecto a la potencia máxima contratada, esta se acuerda por un período de 12 meses, y en este caso se define como la potencia máxima demandada durante el año. El costo asociado a esta potencia depende si el cliente se califica del cliente como presente en punta o parcialmente presente en punta, para lo cual se cuenta con un cargo diferente según la categoría, como se puede ver en la tabla 9.1. Al respecto, la compañía distribuidora define que un cliente se clasifica como presente en punta de acuerdo a los siguientes criterios [69]:

- Si durante periodos consecutivos de 60 minutos en las horas de punta, el cociente entre la potencia media utilizada por el cliente y su potencia contratada supera 0,85, y este hecho ocurre al menos 5 veces al mes.
- Si el cociente entre la demanda media del cliente durante las horas de punta y su potencia contratada es mayor o igual a 0,5

Dentro del código se ocupará el segundo criterio para determinar el costo que se aplicará al caso de estudio, para lo cual cabe recordar que la definición de horario punta es: entre las 18:00 y las 22:00 horas desde el 01 de abril hasta el 30 de septiembre [23]. La demanda media se obtiene según la siguiente ecuación:

$$D_{\text{media}} = \frac{E_{\text{punta}}}{H_{\text{punta}}} \quad (9.2)$$

- D_{media} : Demanda media en horas de punta
- E_{punta} : Consumo de energía durante las horas de punta del año
- H_{punta} : Número de horas de punta en el año

Luego, la relación que se debe cumplir para considerar a un cliente como presente en punta corresponde a:

$$\frac{D_{\text{media}}}{P} \geq 0.5 \quad (9.3)$$

Finalmente, considerando todo lo expuesto en esta sección, los pasos que sigue el código generado para el cálculo del costo de la tarifa se pueden apreciar en el siguiente diagrama de bloques:

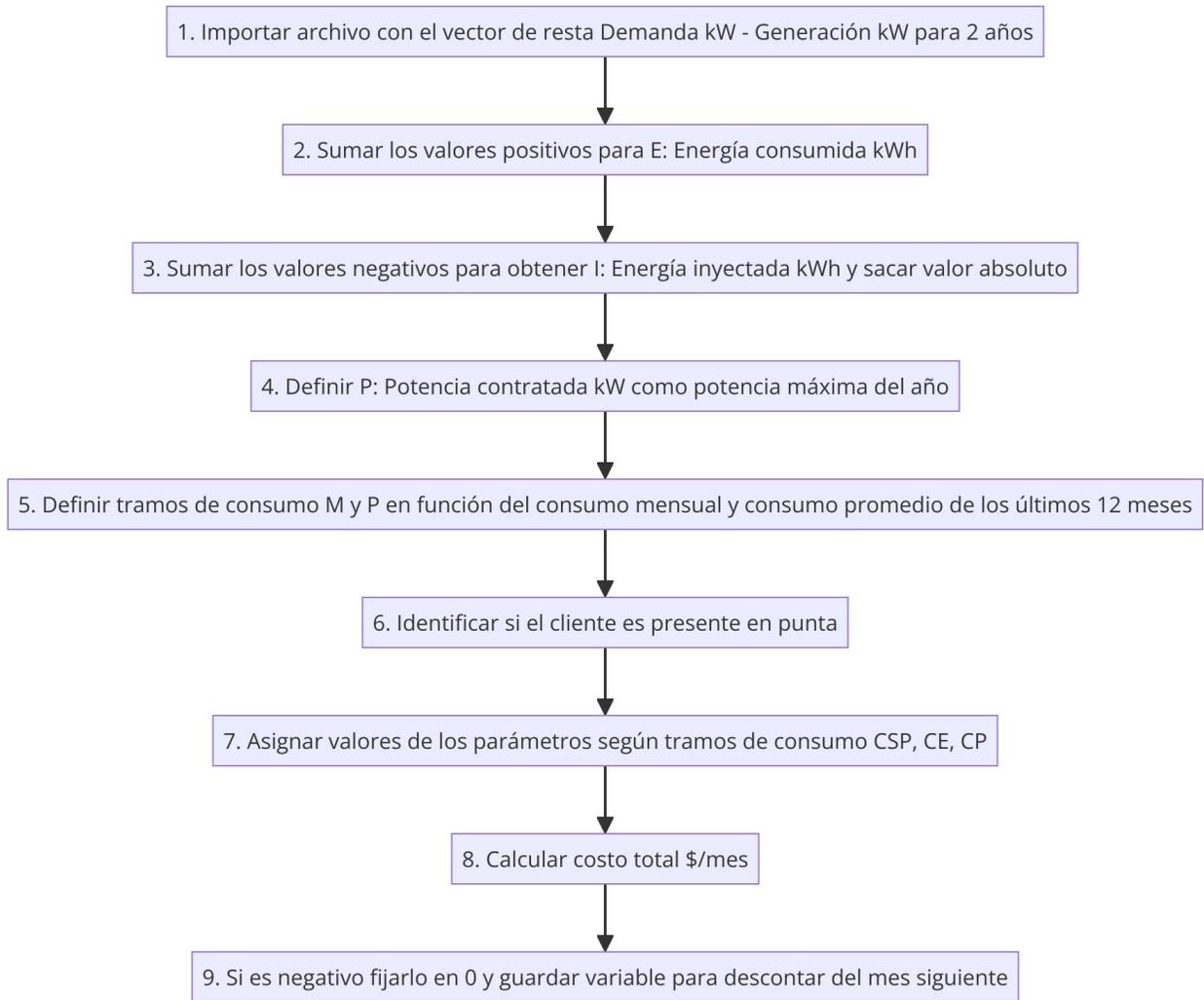


Figura 9.1: Diagrama de bloques código para el cálculo de costo tarifa BT2.

9.2. Riego presurizado

Los primeros casos de estudio seleccionados corresponden a aquellos que involucran exclusivamente riego presurizado. Esto se debe a que este proceso ha sido identificado como el más relevante en la actualidad y el consumo que más probablemente se pueda abastecer por integrar sistemas agrivoltaicos. Para ello, si bien la herramienta creada permite la realización de incontables combinaciones, a continuación se presentan los casos de estudio definidos que otorgan los resultados que se han considerado más valiosos para este estudio, y de los cuales se pueden obtener conclusiones sobre oportunidades de autoconsumo.

En particular, cabe reconocer que debido a que los coeficientes de cultivo identificados en la tabla 6.1 siguen tendencias similares durante el año para la mayoría de los cultivos, la demanda hídrica tendrá asimismo comportamientos similares. De esta manera, para muchos cultivos si bien se obtienen diferencias en cuanto a la cantidad de horas que debe regarse el predio cada mes, la comparación de muchos resultados tiende a ser repetitiva, lo cual no permite la obtención de conclusiones muy diferentes entre si.

De acuerdo con las figuras 4.12 y 4.13, la mayor cantidad de predios agrícolas de la zona central de Chile tienen una superficie instalada menor a 50 hectáreas, para lo cual se definen casos de estudio de 30 ha y 50 ha. En particular, según los resultados obtenidos de la herramienta de riego creada, aumentar el tamaño de un predio requerirá una bomba de mayor potencia y/o más bombas para satisfacer la demanda de riego, lo que resultará en un mayor consumo de energía. Sin embargo, las variables de tiempo de riego (TR) y frecuencia de riego (FR) no se ven significativamente afectadas. Respecto a esta última variable, la frecuencia de riego depende directamente del tipo de suelo del predio agrícola, factor que se analiza a continuación.

9.2.1. Tipos de suelo y frecuencia de riego

9.2.1.1. Análisis energético

A continuación se realiza un análisis sobre cómo se ven afectadas las curvas de demanda eléctrica para distintos tipos de suelo, y por consiguiente, predios con riego de alta o baja frecuencia. Para esto, se define como caso de estudio al cultivo de un huerto de manzanos de 30 hectáreas en la región del Maule. Se toman los datos de evapotranspiración de referencia de la estación meteorológica Los Niches, Curicó, AGRICHILE.

Para el sistema de riego, se consideraron dos laterales con goteros de 2 L/h cada 0,5 metros sobre hilera y una distancia entre hileras de 4 metros [70]. Se obtienen los resultados de la herramienta computacional para suelos arenoso, franco y arcilloso, como se muestra en la tabla 9.3:

Región:	VII Maule						
Cultivo:	Manzano						
Número Hectáreas [ha]:	30						
Bomba Utilizada:	Bomba 30 HP Pedrollo F80/160A						
Tipo de Suelo:	Arenoso		Franco		Arcilloso		
Mes	DR [días/mes]	TR [h/día]	DR [días/mes]	TR [h/día]	DR [días/mes]	TR [h/día]	P [kW]
Enero	31	8,1	15	16,8	15	16,8	22,00
Febrero	28	6,6	14	13,3	14	13,3	22,00
Marzo	31	4,4	15	9,2	10	13,8	22,00
Abril	15	4,0	10	6,0	6	9,9	22,00
Mayo	0	0	0	0	0	0	22,00
Junio	0	0	0	0	0	0	22,00
Julio	0	0	0	0	0	0	22,00
Agosto	0	0	0	0	0	0	22,00
Septiembre	15	3,0	7	6,4	5	8,9	22,00
Octubre	15	5,7	10	8,6	7	12,3	22,00
Noviembre	30	4,1	15	8,3	10	12,4	22,00
Diciembre	31	7,2	15	14,9	15	14,9	22,00

Tabla 9.3: Resultados herramienta computacional riego presurizado para distintos tipos de suelo.

Esta información se puede apreciar de manera gráfica en la figura 9.2:

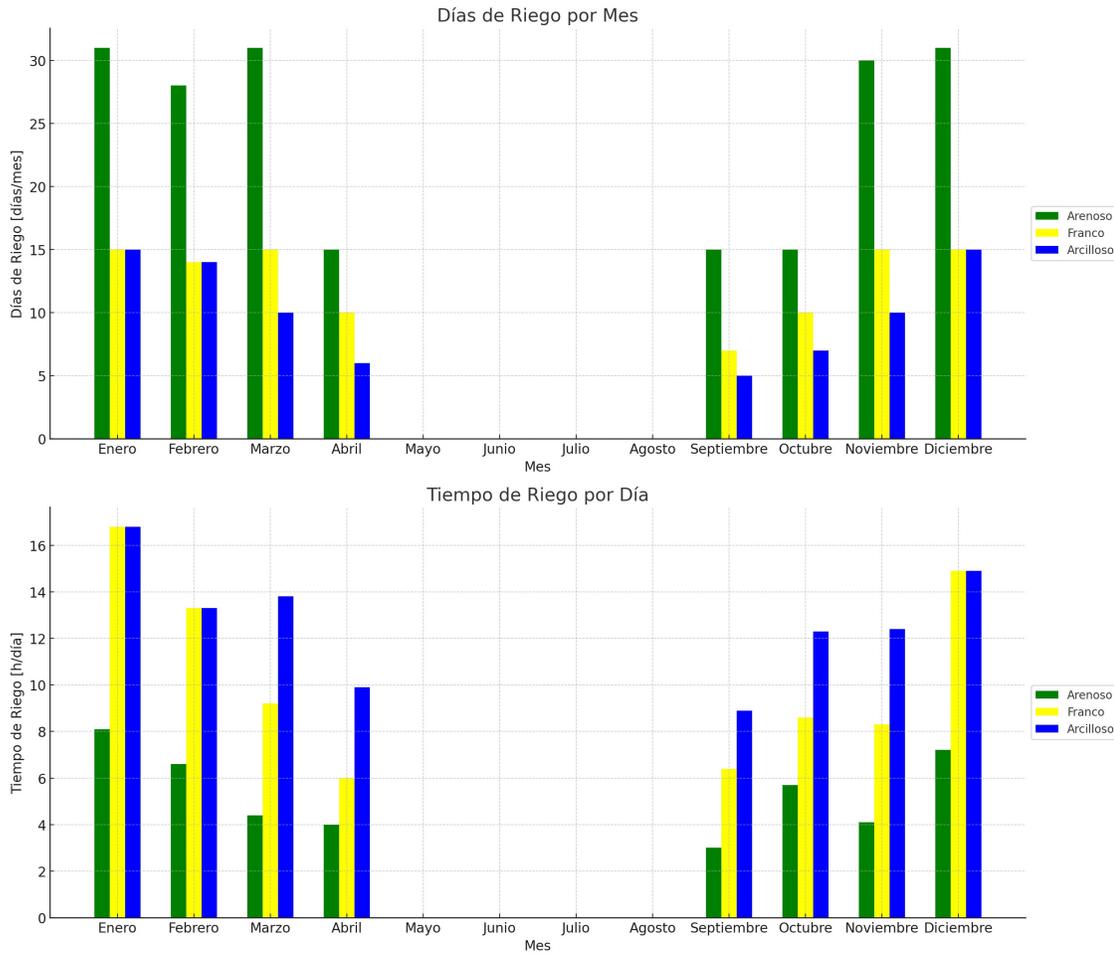


Figura 9.2: Gráfico comparativo días y horas de riego según tipo de suelo casos de estudio.

Se puede apreciar como para tipos de suelo con mayor frecuencia de riego, debido a que se debe regar en general mayor cantidad de días para reponer la evapotranspiración del cultivo, es necesario regar menos horas por día. Para suelos de menor frecuencia de riego ocurre lo contrario, es decir, es necesario regar menos días y por consiguiente, regar más horas durante estos días. A modo de intuición, esto conlleva a un peor aprovechamiento del recurso solar para abastecer el consumo de la electrobomba. Esto se debe a que, por un lado, al haber más horas de riego por día, estas probablemente deban darse fuera de los horarios de generación solar, y por otro lado, debido a que en los días que no se riega no habría consumo asociado a la electrobomba.

Para obtener las curvas de demanda eléctrica, de acuerdo con el procedimiento presentado en el apartado 6.7, se requiere una curva de generación solar para orientar las horas de uso diarias de la bomba en torno la hora de mayor generación solar. Estos datos se obtuvieron de la ubicación de la estación meteorológica Los Niches, Curicó, AGRICHILE. Se procede de la misma manera que en el apartado 6.7, recurriendo al Explorador Solar y considerando un sistema con paneles fotovoltaicos bifaciales de capacidad instalada de 1 kW, con el fin de obtener una curva de oferta solar normalizada:

The screenshot shows the 'FORMULARIO' section with the following settings:

- SELECCIONA MODELO DE GENERACIÓN:** Bifacial (selected).
- CARACTERÍSTICAS DEL ARREGLO FOTOVOLTAICO:**
 - Capacidad Instalada: 1 kW
 - Coefficiente de Temperatura del panel (%/°C): -0,45
- CARACTERÍSTICAS DE LA INSTALACIÓN:**
 - Factor de bifacialidad: 0,7
 - Estacionalidad: Sin Estaciones
 - Tipo albedo: 0,24

The 'GENERACIÓN ELÉCTRICA FOTOVOLTAICA' section shows:

- Tipo de arreglo:** Fijo Inclinado
- Inclinación (°):** 28
- Azmut (°):** -21
- OPTIMIZAR ÁNGULOS:** Button
- PÉRDIDAS:**
 - Eficiencia del Inversor (%): 96
 - Factor de Pérdidas del sistema fotovoltaico (%): 14
 - Factor de pérdidas Mismatch (%): 6
- CALCULAR GENERACIÓN DEL SISTEMA FOTOVOLTAICO:** Button

Figura 9.3: Información ingresada en Explorador Solar para estación meteorológica Los Niches [55].

Se dejaron los parámetros por defecto, un tipo de arreglo fijo inclinado y se ocupó la opción de optimizar ángulos. Luego, mediante la información descargada entre los años 2004 y 2016, se realizó de todos los datos, obteniendo de esta manera una curva normalizada promedio del perfil de generación solar.

Para dimensionar la capacidad instalada por el sistema agrivoltaico, se deben considerar las siguientes relaciones [43]:

$$\text{Balance}_{\text{anual}}(\%) = \left(\frac{\text{Generación FV}_{\text{anual}}}{\text{Consumo Electrobomba}_{\text{anual}}} \right) \times 100\% \quad (9.4)$$

$$\text{Balance}_{\text{anual}}(\%) < 100\% \quad (9.5)$$

Esto se debe a que para los sistemas conectados a la red que se acogen a la Ley de Generación Distribuida, debe justificarse el autoconsumo, por lo cual el balance anual no puede exceder el 100% [43]. Por consiguiente, en función de las curvas de demanda eléctrica generadas con la metodología propuesta y la curva normalizada de generación solar, se crea un código en Python que calcula la capacidad máxima instalable por el sistema agrivoltaico con el fin que se cumpla la restricción 9.5.

Debido a que el tiempo de riego (TR) total por mes es independiente del tipo de suelo, esta variable no va a influir en el consumo total que va a tener la electrobomba para regar. Por consiguiente, es de esperar que la energía consumida por mes sea la misma para cada mes, y en efecto, de acuerdo con los resultados del código se dimensiona la misma capacidad instalada para los tres tipos de suelo:

- **Capacidad definida:** 13 (kW)

Respecto al balance entre demanda eléctrica y lageneración fotovoltaica de acuerdo a la capacidad instalada, los resultados mensuales se presentan en la tabla 9.4:

Mes	Demanda Eléctrica [kWh]			Generación FV [kWh]
	Suelo Arenoso	Suelo Franco	Suelo Arcilloso	
Enero	5546	5546	5546	2956
Febrero	4091	4091	4091	2503
Marzo	3028	3028	3028	2509
Abril	1313	1313	1313	1870
Mayo	0	0	0	1264
Junio	0	0	0	995
Julio	0	0	0	1043
Agosto	0	0	0	1307
Septiembre	981	981	981	1770
Octubre	1889	1889	1889	2229
Noviembre	2736	2736	2736	2608
Diciembre	4928	4928	4928	2842

Tabla 9.4: Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica casos de estudio.

Se puede observar como efectivamente el consumo mensual es el mismo para los tres tipos de suelo, y a continuación la figura 9.4 presenta el gráfico de balance mensual de energía demandada y generada:

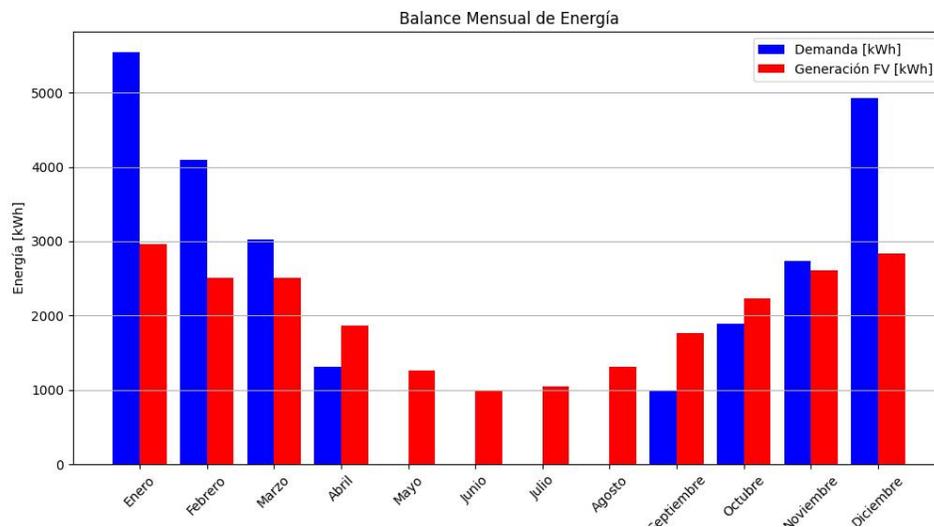


Figura 9.4: Gráfico comparativo balance de energía mensual para casos de estudios de tres tipos de suelo.

Como se puede observar en el gráfico del Balance Mensual de Energía, hay una mayor demanda de energía en los meses que coinciden con las temporadas de mayor necesidad de riego, como enero y diciembre. Esta demanda elevada durante los meses de riego intensivo presenta una sinergia natural con los meses de mayor irradiación solar, lo que permite una buena intuición del potencial del sistema fotovoltaico agrivoltaico. Sin embargo, también se puede notar que durante los meses en los que no se requiere riego, como mayo, junio, julio y agosto, el consumo energético disminuye significativamente. En estos periodos, la energía generada por el sistema agrivoltaico sería inyectada a la red eléctrica.

Para comprender sobre la energía que se utiliza para autoconsumo e inyección, se incluye

un análisis con dimensión horaria, presentando a continuación en la figura 9.5 el comportamiento de la generación solar y las demandas eléctricas:

Curvas de Generación FV y Demanda Eléctrica Días de Riego por cada Mes: Tipos de Suelos Arenoso, Franco y Arcilloso

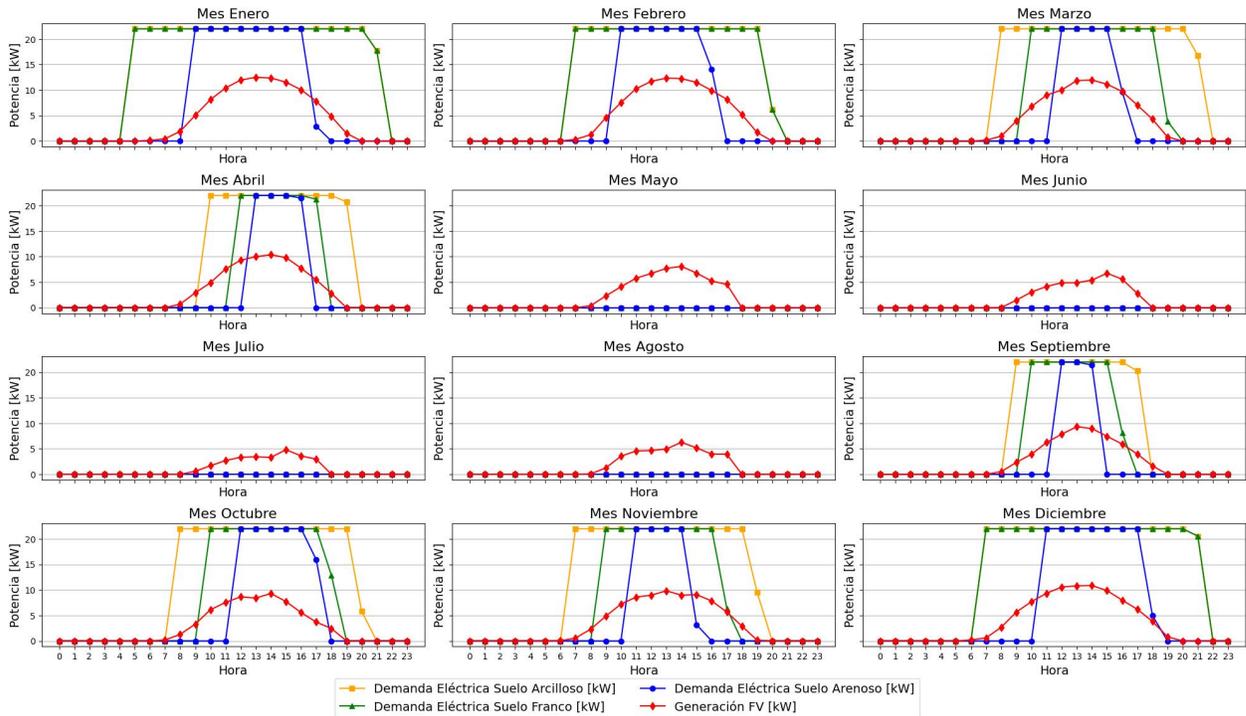


Figura 9.5: Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para casos de estudios de tres tipos de suelo.

En primer lugar, se puede notar que en base al balance anual para dimensionar la capacidad instalada, para ningún día de riego la generación eléctrica alcanza a cubrir completamente la demanda de la electrobomba.

Sin embargo, un resultado de suma importancia a considerar es que los suelos que tienen mayor frecuencia de riego muestran una mejor sinergia con la generación solar. En definitiva, como es necesario regar más seguido, las horas de riego por día son menores, como se puede observar en el gráfico de la figura 9.2. Por lo tanto, se puede observar cómo, para el tipo de suelo arenoso, las horas de uso de la electrobomba coinciden de mejor manera con las horas de generación solar.

Por el otro lado, al haber menor frecuencia de riego para el suelo franco, y aún menos para el suelo arcilloso, se puede notar cómo es necesario aumentar las horas de riego por día para reponer la evapotranspiración del cultivo y cumplir con los tiempos de riego necesarios. Por esta razón, se puede observar en el gráfico cómo, en general, existen más horas de uso de la electrobomba fuera de las horas de generación solar.

También es importante notar que el gráfico incluido es para los días de riego. Sin embargo, también hay que recalcar que los suelos que tienen menor frecuencia de riego tienen más días sin riego, durante los cuales la energía generada sería inyectada a la red. Esto se traduce en un menor aprovechamiento del recurso solar para autoconsumo, ya que la energía generada

durante estos días no es utilizada para cubrir la demanda local sino que es exportada.

Este análisis se puede complementar observando cuánta energía de la generada se destina para el autoconsumo y la inyección, de acuerdo con el balance horario de demanda y generación para cada tipo de suelo:

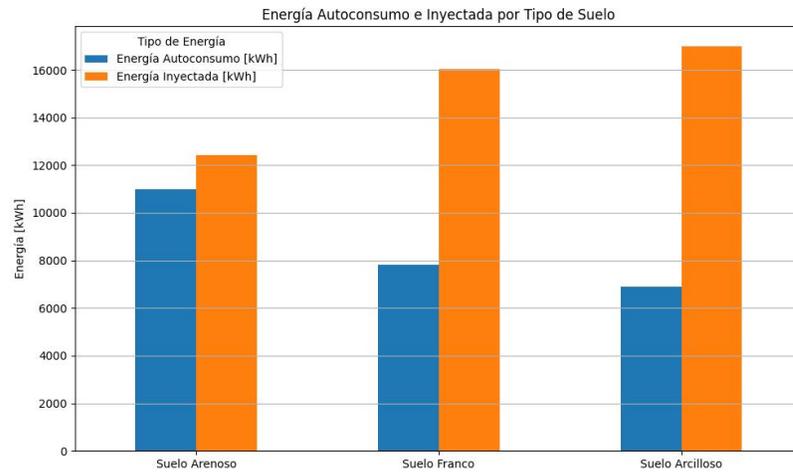


Figura 9.6: Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para distintos tipos de suelo.

En resumen, los suelos con mayor frecuencia de riego, como el suelo arenoso, aprovechan mejor la sinergia con la generación solar, mientras que los suelos con menor frecuencia de riego, como el suelo franco y arcilloso, muestran una menor eficiencia en el uso de la energía generada para el autoconsumo debido a la necesidad de riego en horas no coincidentes con la generación solar y a la mayor cantidad de días sin riego. Por consiguiente, en vista de este análisis energético, se puede concluir que los suelos arenosos presentan un mayor potencial para abastecer su consumo eléctrico integrando sistemas agrivoltaicos con enfoque en el autoconsumo.

9.2.1.2. Análisis costo tarifa

Tras aplicar el código de cálculo para la tarifa BT2, se obtienen los siguientes resultados, presentados en la tabla 9.5:

	Costo sin Sistema Agrivoltaico [\$]	Costo con Sistema Agrivoltaico [\$]		
		Suelo Arenoso	Suelo Franco	Suelo Arcilloso
Enero	1.087.823	698.441	733.837	733.837
Febrero	890.050	566.158	588.407	588.407
Marzo	745.550	433.674	445.175	456.671
Abril	512.376	300.165	301.806	305.503
Mayo	333.963	201.502	201.502	201.502
Junio	333.963	229.745	229.745	229.745
Julio	333.963	224.656	224.656	224.656
Agosto	333.963	197.064	197.064	197.064
Septiembre	467.349	270.717	272.053	273.260
Octubre	590.687	333.180	336.529	340.731
Noviembre	705.852	390.405	396.504	405.663
Diciembre	1.003.841	632.985	663.775	663.775

Tabla 9.5: Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para distintos tipos de suelo.

Al respecto, cabe indicar que el costo de la tarifa sin proyecto es el mismo para los 3 casos debido a la tarifa utilizada, la cual no considera horas punto, razón por la cual el resultado no cambia al tener las mismas horas de demanda distribuidas en distinto orden. Al respecto, se puede ver de manera gráfica a modo de ejemplo la variación entre el caso sin y con proyecto para el suelo arenoso, como muestra la figura 9.7:

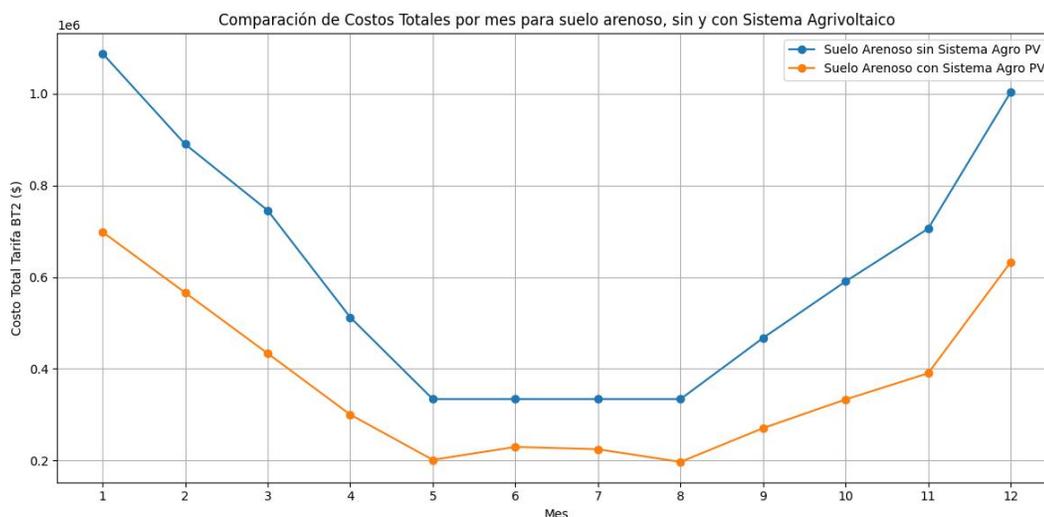


Figura 9.7: Gráfico comparativo costo mensual suelo arenoso con y sin sistema agrivoltaico.

Se puede apreciar una clara reducción de los costos de la tarifa al contar con la generación local de un sistema agrivoltaico. También es importante visualizar las diferencias de costos para cada tipo de suelo, resultado que se presenta en la figura 9.8:

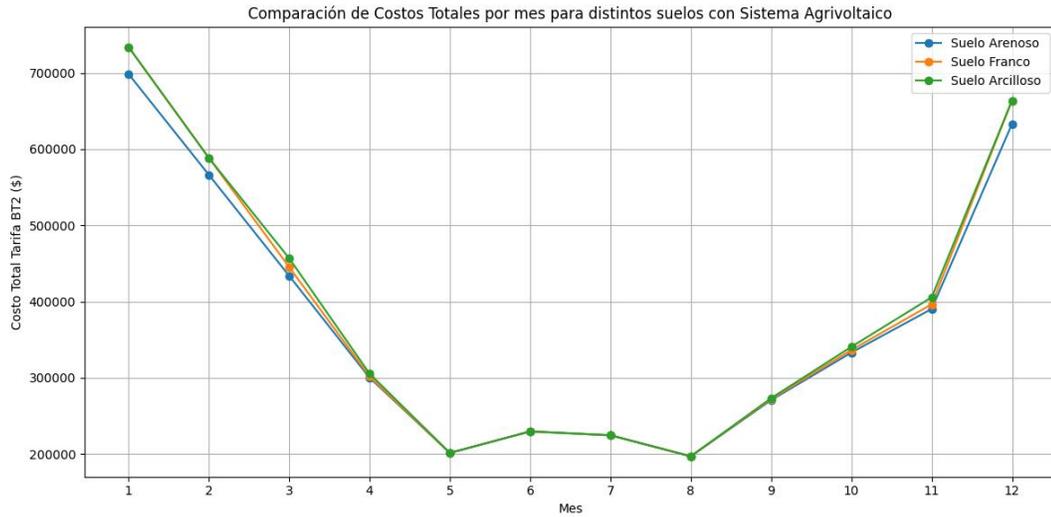


Figura 9.8: Gráfico comparativo costo mensual para distintos tipos de suelo con sistema agrivoltaico.

En vista de este gráfico, se puede notar que para el suelo arenoso hay un costo mensual menor que para los suelos franco y arcilloso. Las diferencias se atribuyen a que el valor de la inyección de la energía es menor que el costo total de compra de energía, considerando todas las componentes que multiplican el valor de la energía consumida en la tarifa eléctrica. Sin embargo, debido a que esta diferencia entre el valor de la inyección y el costo del consumo eléctrico no es tan significativa es que en términos de costo asociado a la tarifa, no se observan grandes diferencias.

9.2.2. Riego en meses de invierno

9.2.2.1. Análisis energético

Respecto a la recopilación de datos sobre los coeficientes de cultivo, se pueden identificar a los cítricos como frutales que requieren ser regados durante los meses de invierno, de acuerdo con la tabla 6.1. Esta variable determina finalmente la demanda hídrica de un cultivo, y en particular, en este apartado se realiza una comparación entre los resultados obtenidos para cultivos de cítricos y uva de mesa. La elección del cultivo de uva de mesa es porque se identifica como el que posee el coeficiente de cultivo más diferente al de los cítricos, como muestra la figura 9.9:



Figura 9.9: Gráfico comparativo entre coeficiente de cultivo cítricos y uva de mesa.

Para estos casos de estudio, se mantienen las demás condiciones similares entre si, para lo cual se considera un tamaño de 30 hectáreas y se toman los datos de evapotranspiración de referencia de la estación meteorológica Los Niches, Curicó. Respecto al tipo de suelo, se considera un suelo franco arenoso.

Para el sistema de riego, se consideraron dos laterales con goteros de 2 L/h cada 0,5 m sobre hilera y una distancia entre hileras de 4 metros. Se obtienen los resultados de la herramienta computacional para los cultivos como se muestra en la tabla 9.6 y de manera gráfica en la figura 9.10:

Región:	VII Maule				
Tipo de Suelo:	Franco Arenoso				
Número Hectareas [ha]:	30				
Bomba Utilizada:	Bomba 30 HP Pedrollo F80/160A				
Cultivo:	Cítricos		Uva de Mesa		
Mes	DR [días/mes]	TR [h/día]	DR [días/mes]	TR [h/día]	P [kW]
Enero	31	6,1	31	8,5	22,00
Febrero	28	5,4	28	7,7	22,00
Marzo	31	4,2	31	5,4	22,00
Abril	15	4,5	15	5,8	22,00
Mayo	10	3	0	0	22,00
Junio	7	4	0	0	22,00
Julio	7	4	0	0	22,00
Agosto	10	4	0	0	22,00
Septiembre	15	4,2	10	4,2	22,00
Octubre	15	6,9	15	6,5	22,00
Noviembre	15	8,5	15	9,5	22,00
Diciembre	31	6,0	31	7,3	22,00

Tabla 9.6: Resultados herramienta computacional riego presurizado para casos de estudio cítricos y uva de mesa.

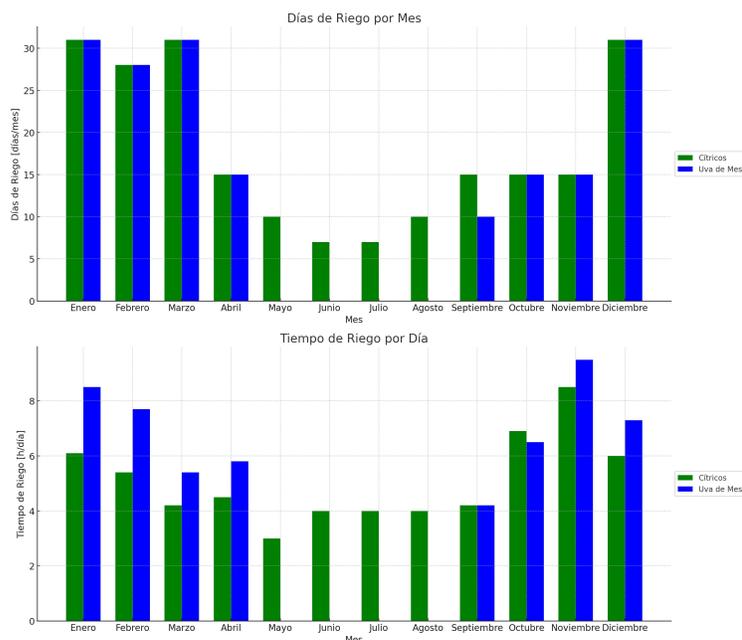


Figura 9.10: Gráfico comparativo días y horas de riego para casos de estudio cítricos y uva de mesa.

Para obtener la demanda eléctrica asociada, se realiza un procedimiento análogo al caso anterior, ocupando el mismo perfil de generación normalizado en base a los datos obtenidos del Explorador Solar. Con los perfiles de demanda creados, se procede a estimar la capacidad instalada con el fin de cumplir la restricción 9.5, obteniendo los siguientes resultados:

- **Capacidad definida cítricos: 13 (kW)**
- **Capacidad definida uva de mesa: 14 (kW)**

Para este caso, la capacidad máxima posible a instalar resultó diferente para los dos casos de estudio. Respecto al balance entre demanda eléctrica y generación fotovoltaica de acuerdo a la capacidad instalada, los resultados mensuales se presentan en la tabla 9.7:

Mes	Cítricos		Uva de Mesa	
	Demanda Eléctrica [kWh]	Generación FV [kWh]	Demanda Eléctrica [kWh]	Generación FV [kWh]
Enero	4159	2956	5768	3183
Febrero	3335	2503	4714	2696
Marzo	2850	2509	3705	2702
Abril	1500	1870	1913	2014
Mayo	741	1264	0	1362
Junio	544	995	0	1071
Julio	616	1043	0	1124
Agosto	967	1307	0	1407
Septiembre	1390	1770	916	1906
Octubre	2293	2229	2158	2400
Noviembre	2806	2608	3122	2809
Diciembre	4107	2842	4979	3060

Tabla 9.7: Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica casos de estudio cítricos y uva de mesa.

Se puede observar esta información de manera gráfica en las figuras 9.11 y 9.12:

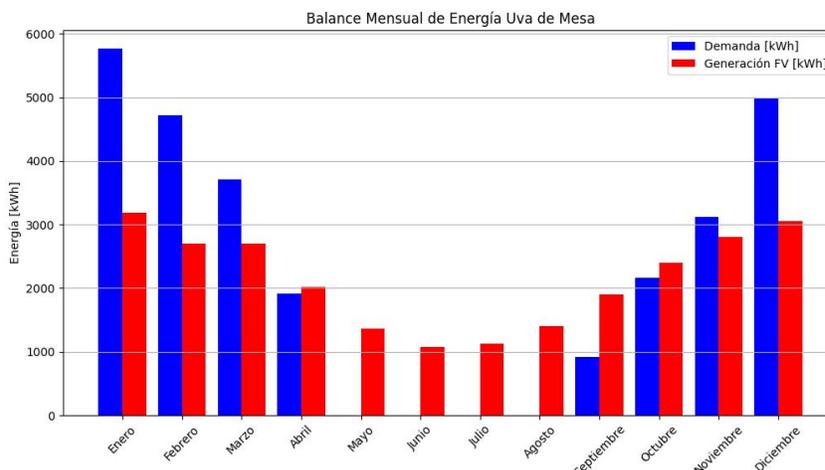


Figura 9.11: Gráfico comparativo balance de energía mensual uva de mesa.

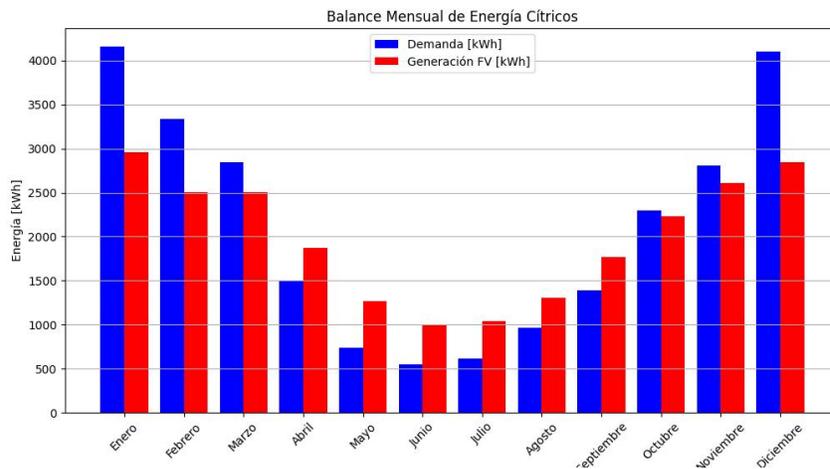


Figura 9.12: Gráfico comparativo balance de energía mensual cítricos.

Como se puede apreciar, se siguen tendencias similares a los casos de estudio analizados anteriormente, concentrando mayor demanda hacia los meses de mayor necesidad de riego. Sin embargo, para los cítricos se puede apreciar como ahora existe demanda eléctrica asociada a los meses de invierno. A continuación se presenta el gráfico con dimensión horaria para observar el comportamiento de la generación y la demanda de los cítricos para los días de riego de cada mes, según la figura 9.13:

Curvas de Generación y Demanda Día de Riego por Mes Cítricos

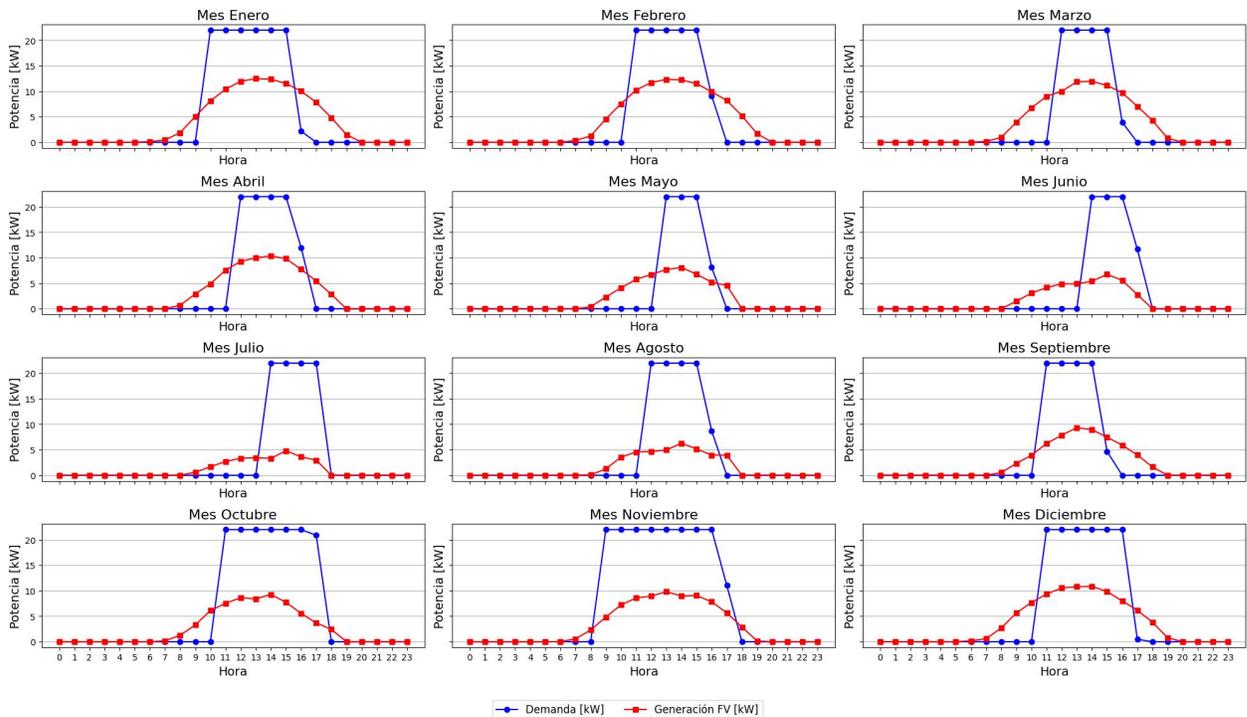


Figura 9.13: Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para cítricos.

Se puede ver claramente como para este caso existe demanda diaria asociada a los días de riego en invierno. Asimismo, la figura 9.14 presenta las curvas horarias para la uva de mesa:

Curvas de Generación y Demanda Día de Riego por Mes Uva de Mesa

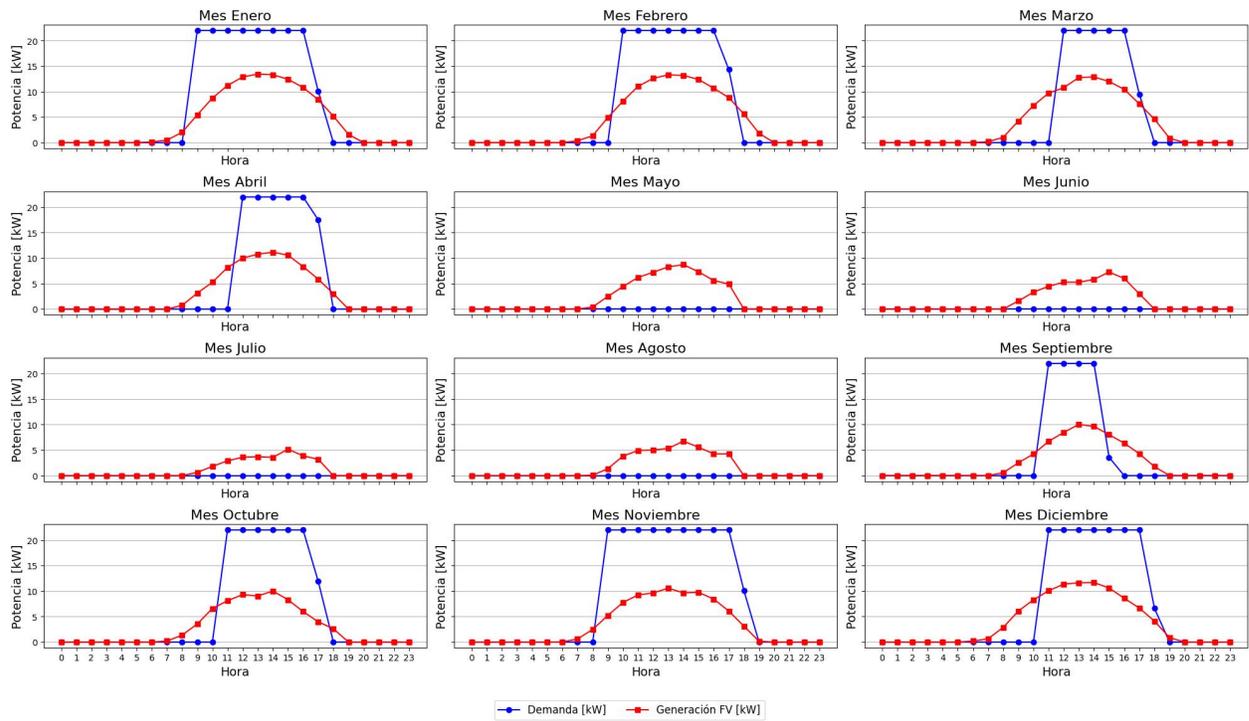


Figura 9.14: Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para uva de mesa.

Para comprender mejor el impacto de la comparación entre estas curvas, se puede complementar observando cuánta energía de la generada se destina para el autoconsumo y la inyección, de acuerdo con el balance presentado a continuación:

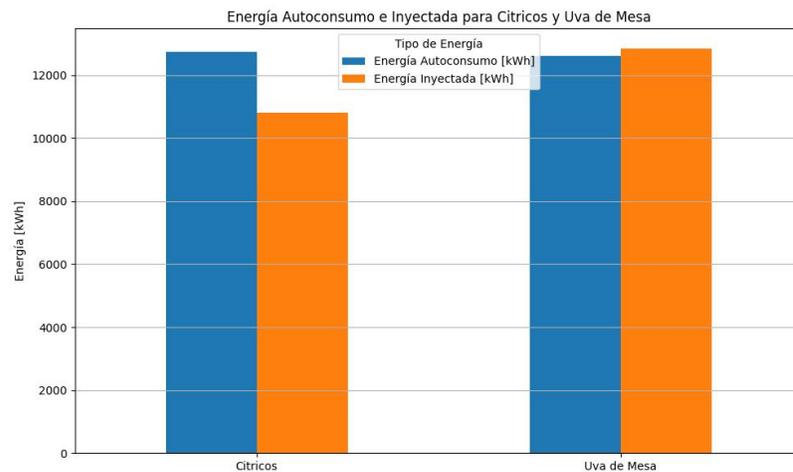


Figura 9.15: Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para cítricos y uva de mesa

En este contexto, se puede observar que en el caso de los cítricos se destina más energía al autoconsumo, lo cual se atribuye a la demanda eléctrica asociada a los meses de invierno. Por lo tanto, los cultivos que requieren riego durante los meses de invierno, en general, tendrán más días de riego al año. Esta observación se hace considerando tipos de suelo similares, por lo que se espera que ambos tengan riegos de alta o baja frecuencia según el caso.

Es importante destacar que se realizó una comparación con el cultivo de uva de mesa debido a que este tiene un coeficiente de cultivo considerablemente alto durante los meses de mayor generación solar. Esto se traduce en una mayor demanda hídrica y, por consiguiente, un mayor tiempo de riego por día. Sin embargo, durante los meses de invierno, toda la energía generada es inyectada a la red. Por esto, se observa un patrón similar al obtenido para los tres tipos de suelo del cultivo de manzano: la energía inyectada es mayor que la autoconsumida.

9.2.2.2. Análisis costo tarifa

A continuación se presentan los resultados obtenidos de aplicar el código de cálculo para la tarifa BT2. Los datos de costos mensuales se presenta en la tabla 9.8:

	Citricos sin Sistema [\$]	Citricos con Sistema [\$]	Uva de Mesa sin Sistema [\$]	Uva de Mesa con Sistema [\$]
Enero	899.358	524.928	1.117.977	694.456
Febrero	787.295	470.511	974.672	620.128
Marzo	721.339	414.609	837.552	492.907
Abril	537.863	322.263	593.936	358.877
Mayo	434.729	294.914	333.963	191.313
Junio	407.894	299.428	333.963	221.729
Julio	417.655	304.339	333.963	216.247
Agosto	465.391	319.848	333.963	186.533
Septiembre	522.926	321.062	458.457	246.979
Octubre	645.699	385.072	627.361	346.687
Noviembre	715.388	405.827	758.298	423.173
Diciembre	892.194	533.500	1.010.819	610.558

Tabla 9.8: Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para casos de estudio cítricos y uva de mesa.

Las figuras 9.16 y 9.17 presentan las curvas comparativas entre el costo mensual para el caso sin y con sistema agrivoltaico:

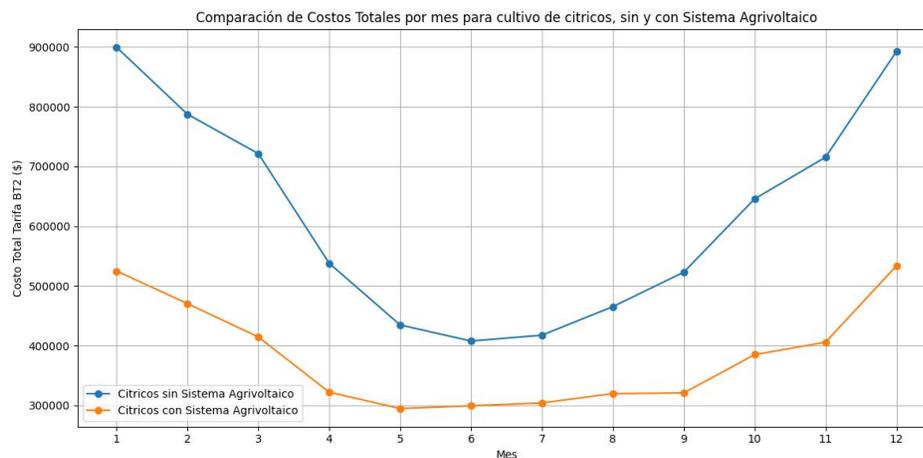


Figura 9.16: Gráfico comparativo costo mensual caso de estudio cítricos con y sin sistema agrivoltaico.

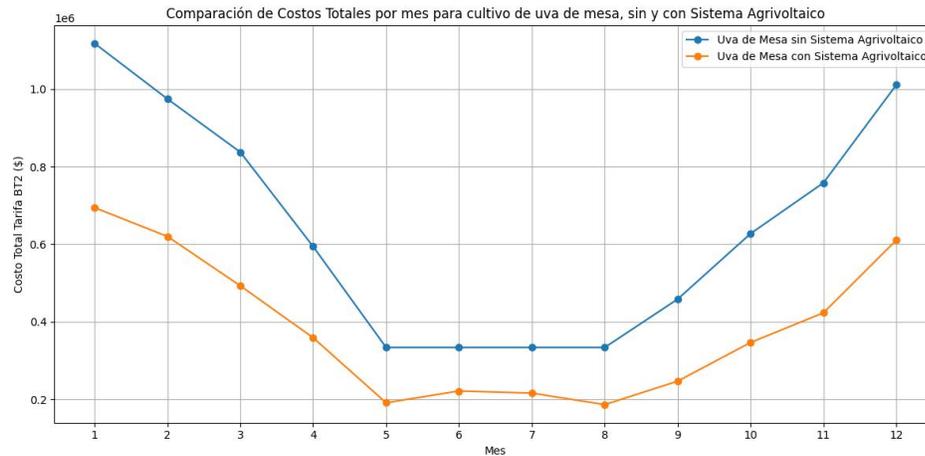


Figura 9.17: Gráfico comparativo costo mensual caso de estudio uva de mesa con y sin sistema agrivoltaico.

Respecto a las curvas de las figuras, en ambas se puede observar una clara disminución de los costos, teniendo la curva de la figura 9.17 para la uva de mesa una forma similar a las encontradas para el cultivo de manzano, debido a que el costo de los meses de invierno se atribuye al cargo de costo fijo y cargo por potencia contratado. Mientras tanto, en la figura 9.17 se cuenta con una forma diferente de la curva debido a que hay costos asociados a la energía en los meses de invierno.

9.3. Riego presurizado y tractores eléctricos

9.3.1. Análisis energético

En esta sección se incorpora la demanda eléctrica estimada que se obtuvo para el uso de tractores eléctricos, la cual se hizo en base a un predio de 50 ha en la región del Maule. En vista de las características de este predio en la salida a terreno es que se definen los parámetros y variables para utilizar en la herramienta de estimación de la demanda de riego. Para estimar la demanda eléctrica de un predio de 50 ha, se utiliza la herramienta 2 veces, considerando tamaños de 30 ha y 20 ha, a los cuales se les asignan electrobombas de 30 HP y 20 HP, de la misma manera que ocurre para el predio de 50 ha de un ejemplo real encontrado [50]. En particular, para este caso de estudio por simplicidad se va a considerar la operación de las bombas en paralelo, pues en vista del código creado para generar la curva de demanda eléctrica, se considera el mismo perfil de generación solar para orientar las horas de uso en cada día de riego.

Se considera el tipo de suelo de la visita a terreno, es decir, franco arenoso [17]. Se toman los datos de evapotranspiración de referencia de la estación meteorológica Los Niches, Curicó, AGRICHILE. Por último, para el sistema de riego, se consideraron dos laterales con goteros de 2 L/h cada 0,5 metros sobre hilera y una distancia entre hileras de 4 metros [17]. Se obtienen los resultados de la herramienta computacional según la tabla 9.9:

Región:	VII Maule		
Cultivo:	Cerezos		
Tipo de Suelo:	Franco Arenoso		
Número Hectareas [ha]:	50		
Bomba Utilizada:	Bomba 20 HP Pedrollo F65/160A y Bomba 30 HP Pedrollo F80/160A		
Mes	DR [días/mes]	TR [h/día]	P [kW]
Enero	31	8,29	36,8
Febrero	28	7,29	36,8
Marzo	15	9,23	36,8
Abril	15	4,15	36,8
Mayo	0	0	36,8
Junio	0	0	36,8
Julio	0	0	36,8
Agosto	0	0	36,8
Septiembre	10	3,49	36,8
Octubre	15	4,45	36,8
Noviembre	15	7,76	36,8
Diciembre	31	6,77	36,8

Tabla 9.9: Resultados herramienta computacional riego presurizado cultivo de cerezos 50 ha región del Maule.

Para obtener la demanda eléctrica asociada, se realiza un procedimiento análogo al caso anterior, ocupando el mismo perfil de generación normalizado en base a los datos obtenidos del Explorador Solar. Tras la construcción del perfil de demanda, antes de proceder a calcular la capacidad instalada, se analizan por separado las demandas eléctricas mensuales del riego presurizado y el uso de tractores eléctricos, como muestra en las figura 9.18:

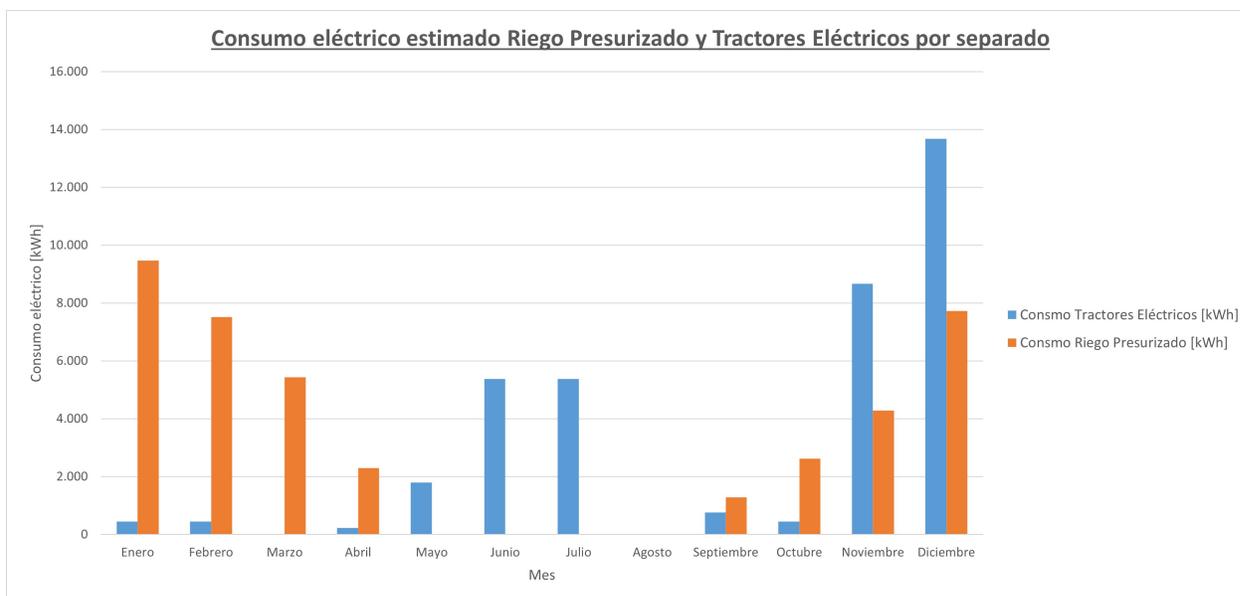


Figura 9.18: Gráfico comparativo consumo de energía mensual riego presurizado y tractores eléctricos.

Como se puede notar, en el consumo resultante predomina el riego presurizado para los meses de enero, febrero, marzo y abril. Luego, para los meses de mayo, junio y julio si bien no hay demanda asociada al riego, ahora se agrega la demanda del uso de tractores eléctricos

para aplicar herbicidas, fungicidas y poda de invierno. Durante los meses de septiembre y octubre es mayor la demanda del riego presurizado, mientras que el consumo de los tractores eléctricos se asocia a la aplicación de herbicidas e insecticidas. Por último, los meses de noviembre tienen mayor consumo para el uso de tractores eléctricos, debido a la intensidad que conlleva la temporada de cosecha, lo cual se analizó en detalle en el Capítulo 8. El consumo de energía mensual total para estos dos procesos se puede apreciar en la figura 9.19:

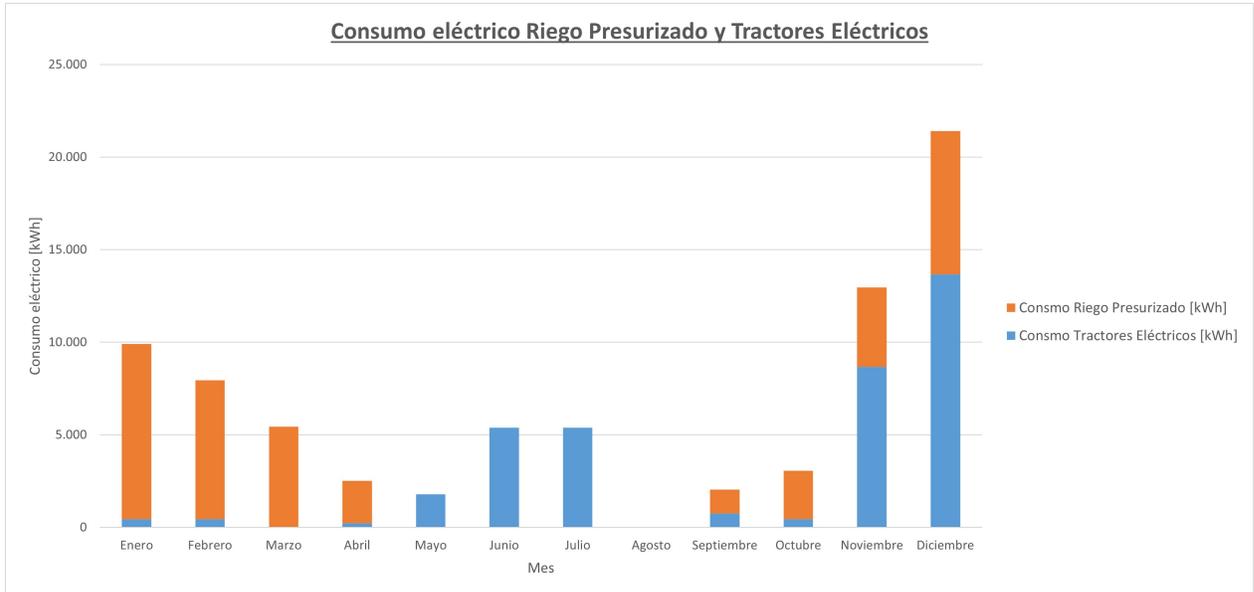


Figura 9.19: Gráfico consumo de energía mensual total para riego presurizado y tractores eléctricos.

El consumo durante la temporada de cosecha es evidentemente mayor al del resto de los meses, para lo cual cabe reconocer que también se trata de meses de alta demanda de riego. Se procede a calcular la capacidad instalada en vista de la suma de las demandas horarias de ambos procesos. Mediante el código de Python creado que considera la restricción 9.5 se obtiene el siguiente resultado:

- **Capacidad definida:** 42 (kW)

Luego, se obtiene el siguiente balance entre demanda eléctrica y generación fotovoltaica de acuerdo a la capacidad instalada, cuyos resultados mensuales se presentan en la tabla 9.10 y se pueden ver de manera gráfica en la figura 9.20 :

	Demanda Electrica [kWh]	Generación FV [kWh]
Enero	9.902	9.550
Febrero	7.953	8.088
Marzo	5.433	8.106
Abril	2.510	6.043
Mayo	1.790	4.085
Junio	5.380	3.214
Julio	5.380	3.371
Agosto	0	4.221
Septiembre	2.046	5.717
Octubre	3.058	7.200
Noviembre	12.953	8.427
Diciembre	21.398	9.181

Tabla 9.10: Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.

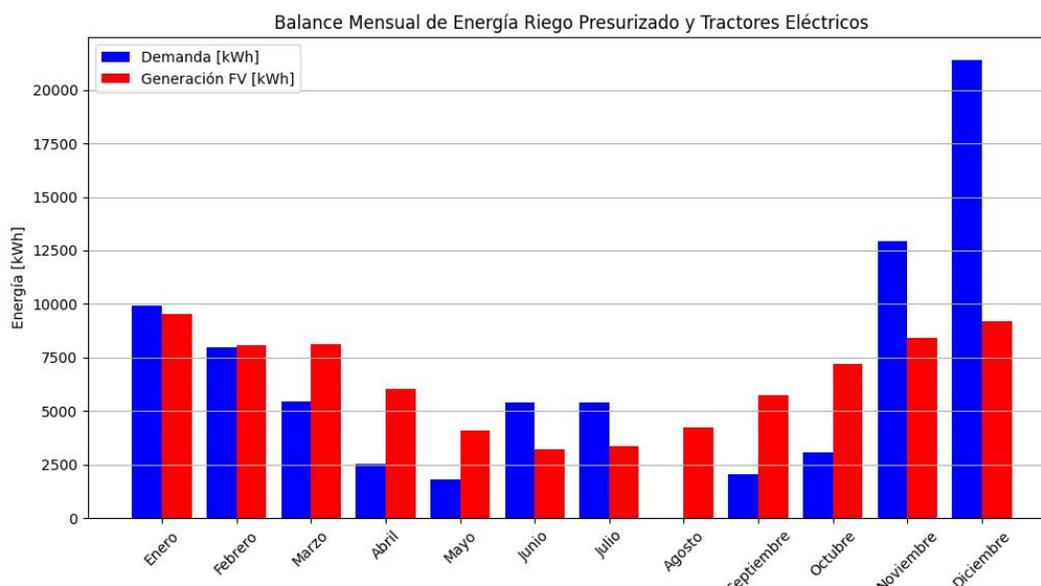


Figura 9.20: Gráfico comparativo balance de energía mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.

Se puede notar como la capacidad instalada que está dimensionada para cumplir con el balance anual implica que para algunos meses la generación mensual sea mayor a la demanda de los procesos involucrados. En particular, el comportamiento de la demanda ya no sigue un patrón tan simétrico como para el caso de contar únicamente con riego presurizado. La asimetría que genera el consumo asociado al periodo de cosecha es un factor a considerar, así como la demanda diaria que se agrega para cargar tractores según los procesos necesarios. A continuación se presenta el gráfico con dimensión horaria para observar el comportamiento de diversos procesos 9.21:

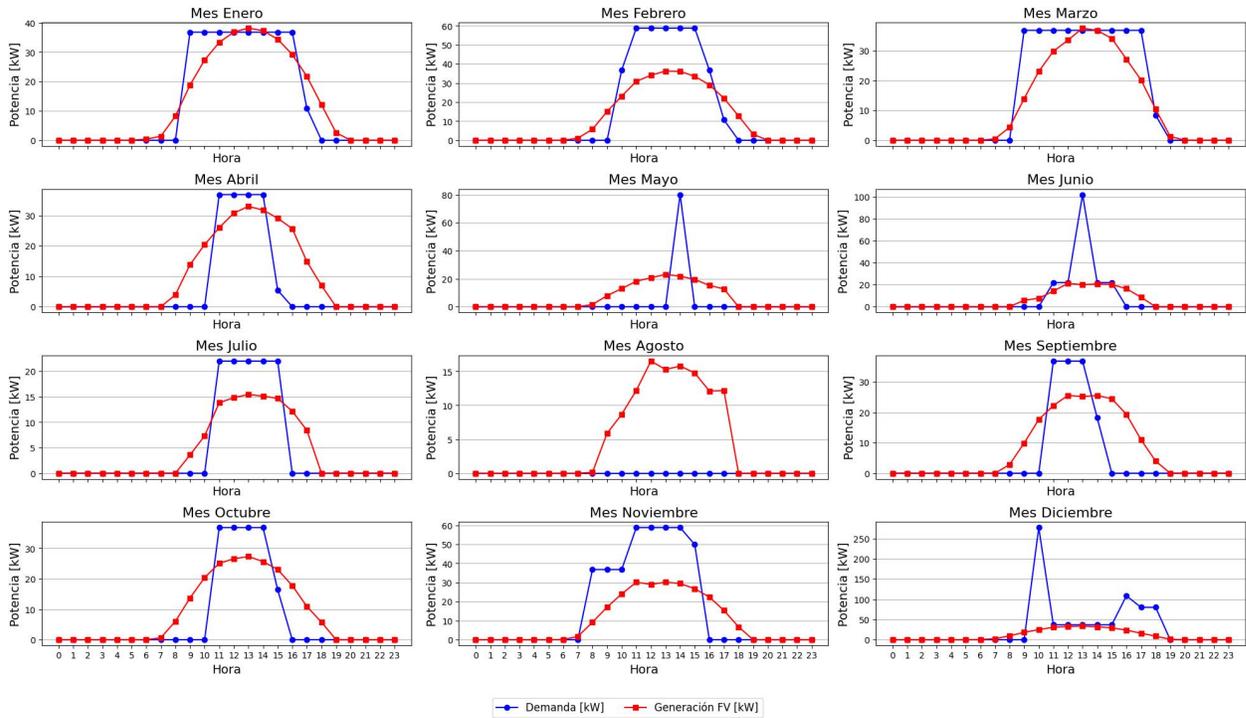


Figura 9.21: Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.

Se pueden identificar las siguientes características para los días que representativos que se han incluido para analizar por mes:

- **Enero y marzo:** Solo riego presurizado. Con esta capacidad instalada la potencia máxima de generación es superior a la potencia demandada por la electrobomba.
- **Febrero:** Riego presurizado y carga lenta de tractor durante el día.
- **Abril:** Solo riego presurizado. La potencia máxima de generación por día ya no es suficiente para alcanzar la potencia demandada por la electrobomba
- **Mayo:** Solo carga rápida durante hora de almuerzo.
- **Junio:** Carga lenta durante el día y carga rápida durante hora de almuerzo
- **Julio:** Solo carga lenta durante el día. La potencia de generación alcanzada es considerablemente menor a los meses de mayor radiación.
- **Agosto:** Solo generación solar.
- **Septiembre y octubre:** Solo riego presurizado. La potencia máxima de generación por día aún no es suficiente para alcanzar la potencia demandada por la electrobomba.
- **Noviembre:** Riego presurizado y carga lenta de tractor durante el día.

- **Diciembre:** Mayor demanda diaria. Carga rápida de los 3 tractores en día de cosecha. Carga lenta de tractores durante el día. También hay riego presurizado.

Respecto a la distribución de energía destinada para autoconsumo e inyección, esta se puede apreciar en la figura 9.22:

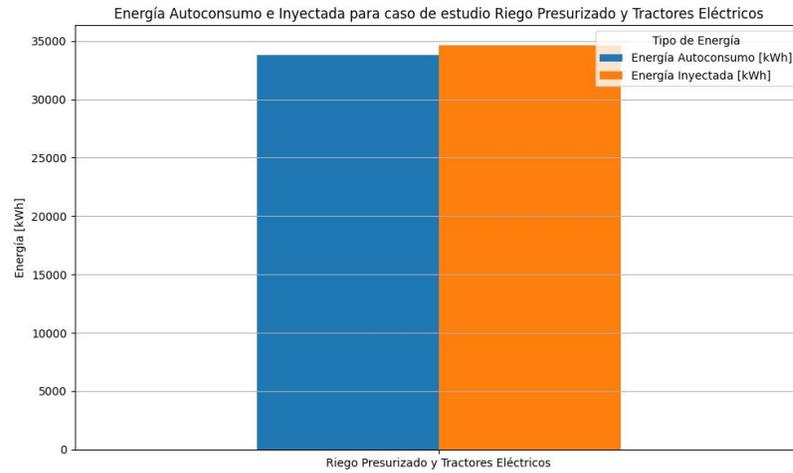


Figura 9.22: Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para caso de estudio riego presurizado y tractores eléctricos.

En este contexto, se puede observar que ante la variabilidad de los calendarios de días de riego y uso de tractores eléctricos, aún hay una gran cantidad de energía que es inyectada a la red, sin embargo, se puede apreciar que en términos comparativos, los valores de energía destinada para autoconsumo e inyectada no son muy lejanos. Esto se atribuye a la distribución de horas de carga para aprovechar el recurso solar

9.3.2. Análisis costo tarifa

A continuación se presentan los resultados obtenidos de aplicar el código de cálculo para la tarifa BT2. Los datos de costos mensuales se presenta en la tabla 9.11:

	Caso con Tractores Eléctricos sin Sistema Agrivoltaico [€]	Caso con Tractores Eléctricos con Sistema Agrivoltaico [€]
Enero	5.535.772	4.280.786
Febrero	5.270.729	4.216.813
Marzo	4.928.270	3.950.121
Abril	4.530.872	3.840.091
Mayo	4.433.055	3.974.134
Junio	4.921.040	4.514.552
Julio	4.921.040	4.498.351
Agosto	4.189.742	3.747.452
Septiembre	4.467.823	3.824.831
Octubre	4.605.362	3.780.048
Noviembre	5.950.439	4.919.268
Diciembre	7.098.381	5.891.494

Tabla 9.11: Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctricos.

La figura 9.23 presenta la curva comparativa entre el costo mensual para el caso sin y con sistema agrivoltaico:

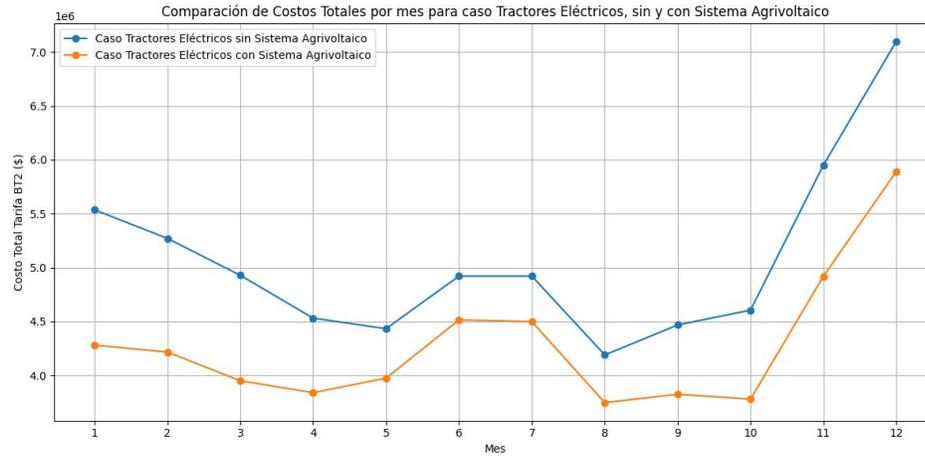


Figura 9.23: Gráfico comparativo costo mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y tractores eléctrico

Ante la energía que se autoconsume y se inyecta, disminuye el costo asociado a la tarifa, sin embargo, cabe notar que en ningún caso esta es 0, pese a que para algunos meses solamente esta la demanda asociada al riego presurizado, mientras que el sistema está dimensionado considerando la alta demanda de la temporada de cosecha. Al respecto, se puede comentar que no solo se debe a que es necesario consumir electricidad para abastecer los consumos de este caso de estudio, sino también el alto costo asociado a la potencia instalada, que en este caso corresponde a 276,8 kW, debido a que es la máxima potencia que ocurre durante el año, y ocurre justamente durante la temporada de cosecha. Esta demanda es producto de la suma de la potencia de carga rápida de 3 tractores y la potencia de la electrobomba.

9.4. Riego presurizado y packing predial

9.4.1. Análisis energético

Como último caso de estudio, se analiza la influencia del consumo estimado para un *packing* predial. Como se definió el caso de estudio en el apartado 7, se considera como un predio para el cual se conoce su temporada de cosecha, que es el caso del predio visitado en terreno [17]. Para las características de este predio de 50 ha de cerezos, se obtuvo una idea aproximada de los consumos extrapolados del *packing* industrial visitado en terreno [20], con el fin de analizar su influencia en esta sección.

Debido a que se considera el mismo predio que para el caso de riego presurizado con tractores eléctricos, el *output* de la herramienta de riego que se utiliza en esta sección es el mismo de la tabla 9.9.

Para obtener la demanda eléctrica asociada, se realiza un procedimiento análogo al caso anterior, ocupando el mismo perfil de generación normalizado en base a los datos obtenidos del Explorador Solar. Tras la construcción del perfil de demanda, este se suma al perfil de demanda del *packing*, el cual contempla las últimas 7 semanas del año con las siguientes curvas de demanda eléctrica entre los días lunes y sábado que son de cosecha [17]:

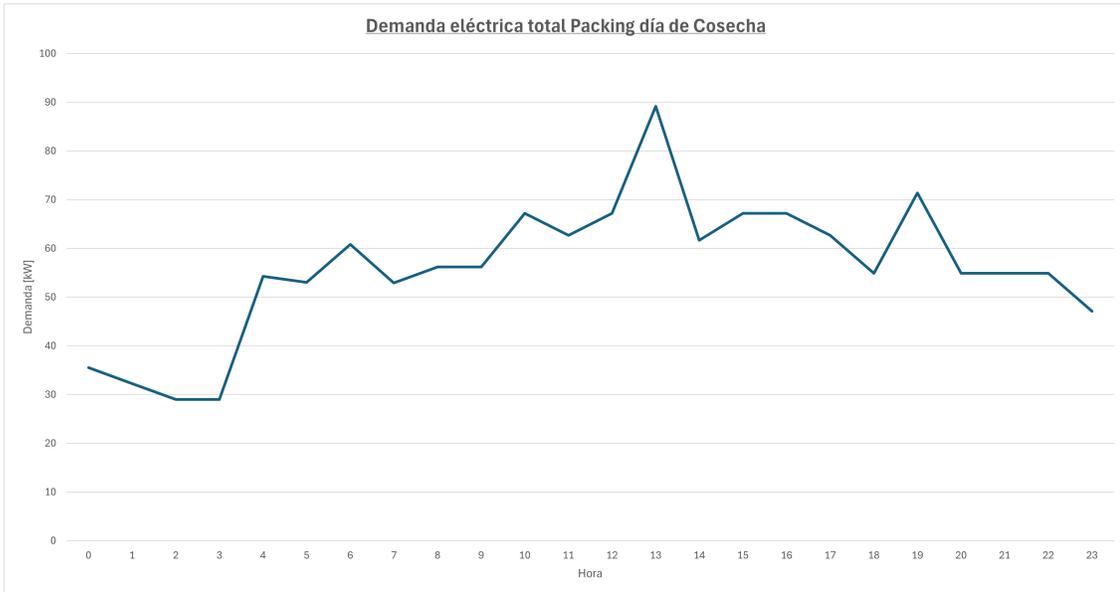


Figura 9.24: Curva de demanda eléctrica diaria aproximada *packing* predial total en día de cosecha para caso de estudio.

Para el día domingo, que no hay cosecha se definió la siguiente demanda eléctrica horaria, según el gráfico de la figura 9.25:

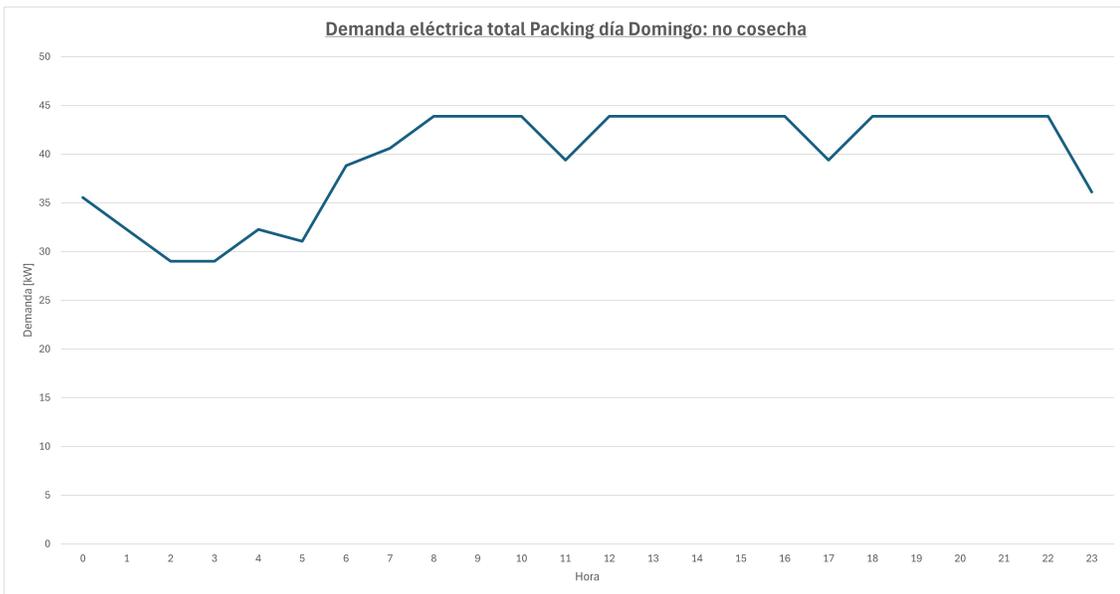


Figura 9.25: Curva de demanda eléctrica diaria aproximada *packing* predial total en día de no cosecha para caso de estudio.

Asignando estas curvas a un calendario horario anual, que por simplicidad considera como día domingo al último día del año, es posible sumar ambas curvas de demanda de 8760 datos, es decir, la del riego presurizado y la del *packing* predial, obteniendo la siguiente capacidad instalada según el código de Python que considera la restricción 9.5:

- **Capacidad definida:** 56 (kW)

Luego, se obtiene el siguiente balance entre demanda eléctrica y generación fotovoltaica de acuerdo a la capacidad instalada, cuyos resultados mensuales se presentan en la tabla 9.12 y se pueden ver de manera gráfica en la figura 9.26 :

	Demanda Electrica [kWh]	Generación FV [kWh]
Enero	9.462	12.733
Febrero	7.513	10.784
Marzo	5.433	10.808
Abril	2.290	8.057
Mayo	0	5.446
Junio	0	4.285
Julio	0	4.494
Agosto	0	5.629
Septiembre	1.286	7.622
Octubre	2.618	9.600
Noviembre	27.668	11.236
Diciembre	47.397	12.241

Tabla 9.12: Tabla de balance mensual demanda eléctrica y generación fotovoltaica caso de estudio riego presurizado cerezos y *packing* predial.

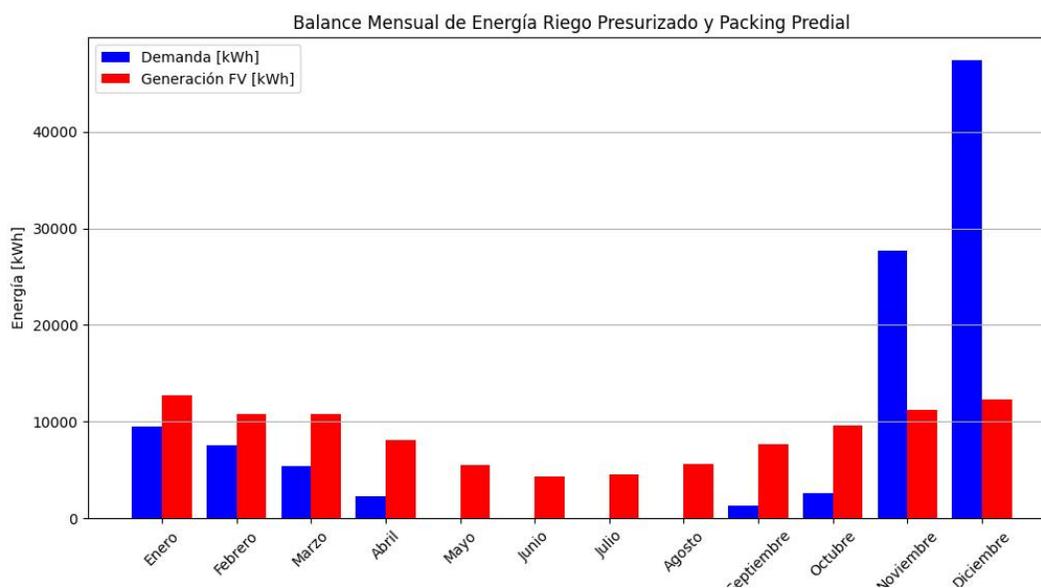


Figura 9.26: Gráfico comparativo balance de energía mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y *packing* predial.

Al respecto, se puede ver una clara asimetría entre los consumos de cada mes, concentrando el mayor consumo para el mes de diciembre, seguido por el mes de noviembre. La razón es por la intensidad de los consumos que tiene el *packing* predial para la temporada de cosecha. Se puede notar como el mes de enero que tiene la mayor demanda eléctrica asociada al riego

presurizado es considerablemente menor al consumo de los meses de cosecha. En definitiva, contar un *packing* predial conlleva a consumos energéticos que desplazan el consumo energético total del riego presurizado, sin embargo, estos se concentran únicamente en la temporada de cosecha.

A continuación se presenta el gráfico con dimensión horaria para observar el comportamiento de los días que contemplan operación del *packing* y aquellos que no, según la figura 9.27:

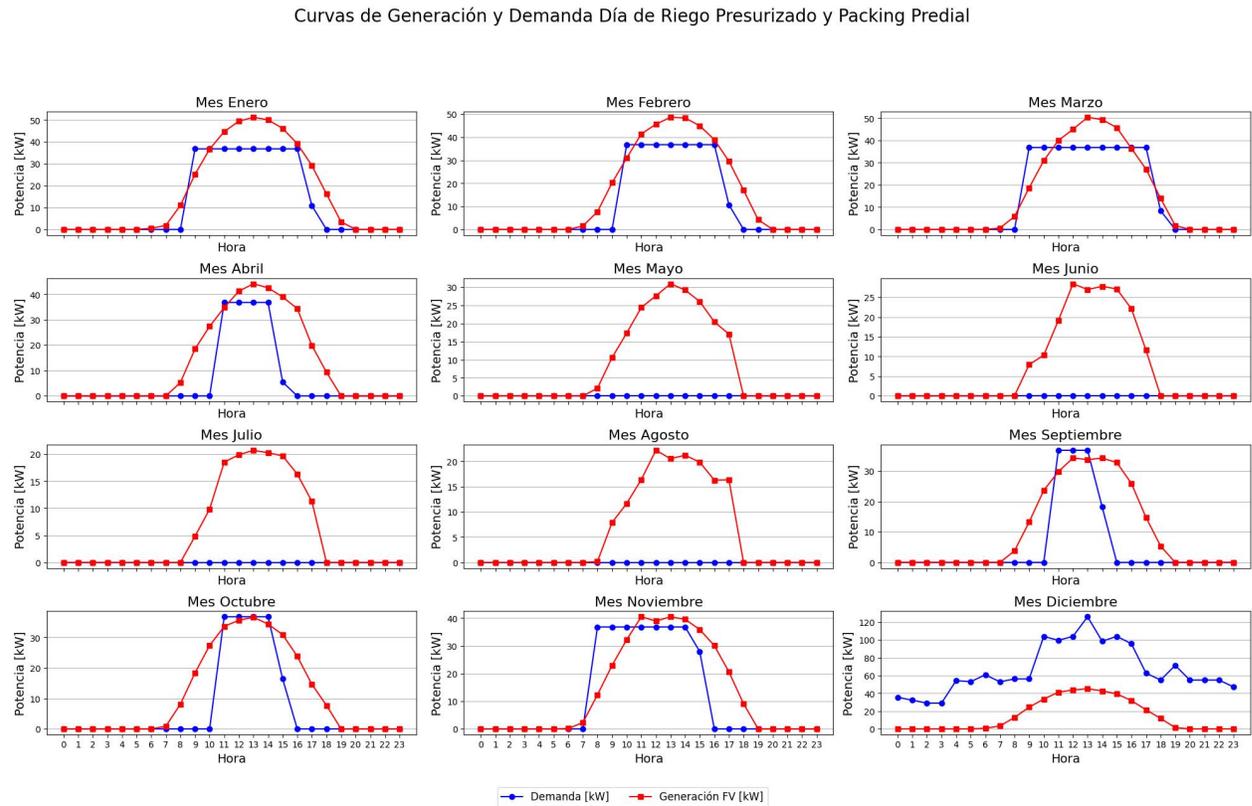


Figura 9.27: Curvas con resolución horaria de generación fotovoltaica y demanda eléctrica para caso de estudio riego presurizado cerezos y *packing* predial.

Se puede notar el mismo patrón para el día representativo de todos los meses entre enero y noviembre. Cabe reconocer que este corresponde al primer día de todos los meses, razón por la cual en noviembre aún no ha empezado la cosecha y la operación del *packing*. En particular, con esta capacidad instalada la potencia máxima de generación es superior a la potencia demandada por la electrobomba para todos los meses. Mientras tanto, para el mes de diciembre y por consiguiente, para los días de cosecha, la generación diaria es claramente insuficiente para abastecer la demanda de los procesos del *packing*.

Por último, respecto a la distribución de energía destinada para autoconsumo e inyección, esta se puede apreciar en la figura 9.28:

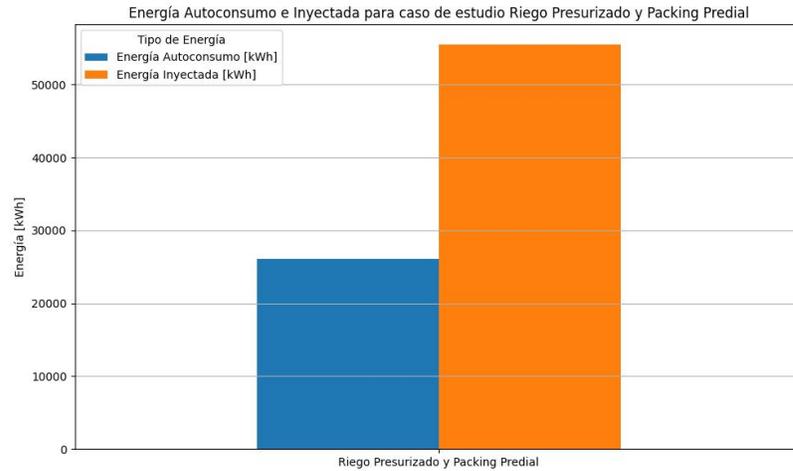


Figura 9.28: Energía destinada al autoconsumo y a la inyección para caso de estudio riego presurizado y *packing* predial.

Se puede notar cómo una gran mayoría de la energía generada se destina para inyección a la red. La razón de este comportamiento es que la demanda eléctrica se concentra hacia la temporada de operación del *packing*. Mientras tanto, como se pudo observar en la figura 9.27, incluso para los días de riego hay energía excedente que debe ser inyectada a la red. A esto se le suma la gran cantidad de días en los cuáles no se riega, donde la inyección es la única alternativa.

9.4.2. Análisis costo tarifa

A continuación se presentan los resultados obtenidos de aplicar el código de cálculo para la tarifa BT2. Los datos de costos mensuales se presenta en la tabla 9.13:

	Caso con Packing Predial sin Sistema Agrivoltaico [€]	Caso con Packing Predial con Sistema Agrivoltaico [€]
Enero	3.193.972	1.581.830
Febrero	2.928.928	1.571.038
Marzo	2.646.279	1.364.404
Abril	2.218.976	1.309.415
Mayo	1.907.751	1.337.148
Junio	1.907.751	1.458.812
Julio	1.907.751	1.436.886
Agosto	1.907.751	1.318.031
Septiembre	2.082.526	1.246.866
Octubre	2.263.562	1.181.716
Noviembre	5.668.581	4.229.162
Diciembre	8.350.435	6.686.519

Tabla 9.13: Costos de tarifa BT2 sin y con sistema agrivoltaico para caso de estudio riego presurizado cerezos y *packing* predial.

La figura 9.29 presenta la curva comparativa entre el costo mensual para el caso sin y con sistema agrivoltaico:

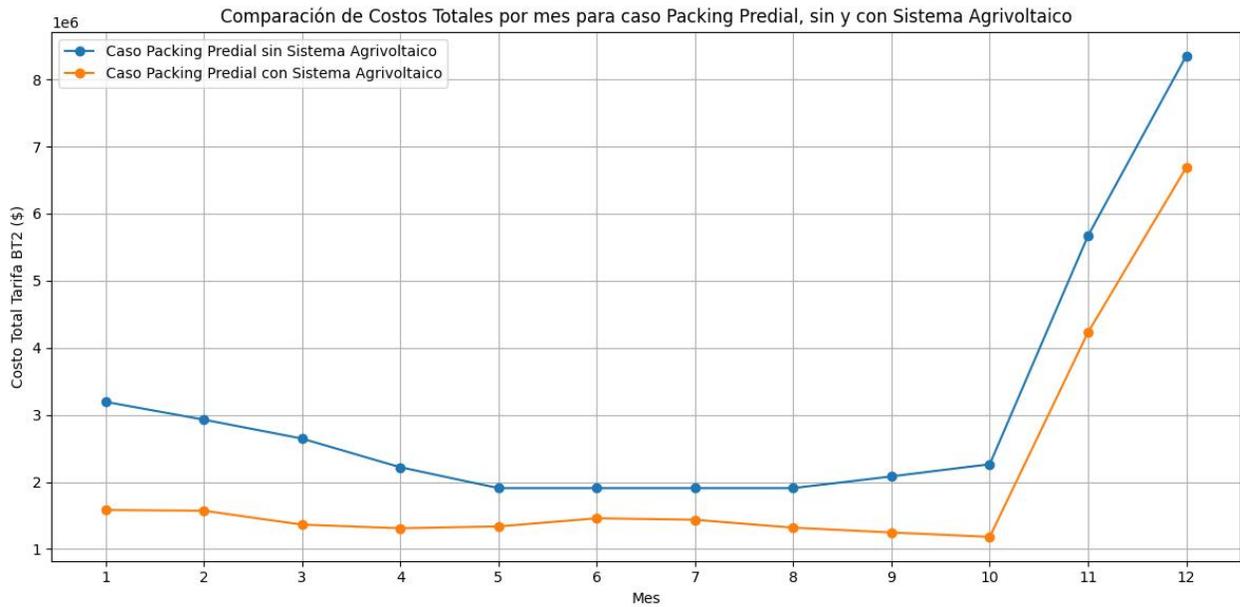


Figura 9.29: Gráfico comparativo costo mensual para caso de estudio riego presurizado cerezos y *packing* predial.

Se puede notar como el costo se concentra notoriamente hacia la temporada de cosecha y operación del *packing* predial. Si bien el sistema agrivoltaico reduce los costos de la tarifa para cada mes, incluso para los meses de invierno que no hay ningún consumo asociado la tarifa no llega a 0. Nuevamente, esto se explica por la potencia contratada que tiene su cargo asociado, la cual corresponde a 125,99 kW. De esta manera, la cantidad de energía inyectada es insuficiente para lograr un costo nulo de la tarifa, considerando la potencia instalada que debe tener el predio para abastecer el consumo del *packing*.

9.5. Análisis capacidad instalada

Un punto que es importante resaltar es que la capacidad máxima que se puede instalar para autoconsumo corresponde a 300 kW, de acuerdo con la normativa actual [25]. Al respecto, también cabe notar que con el fin de cumplir con la restricción 9.5, para todos los casos de estudio bastó con instalar una potencia considerablemente inferior a esta capacidad máxima. Ante esto, conviene preguntarse cuál es la potencia que se puede instalar en un sistema agrivoltaico, considerando la superficie disponible de los predios estudiados.

Si bien no es un ejercicio fácil estimar la potencia que se puede instalar en un sistema agrivoltaico, se toman valores referenciales del estudio "Agrivoltaics: Opportunities for Agriculture and the Energy Transition", de Fraunhofer ISE [71]. Dentro de este informe, se comenta que la superficie necesaria para los sistemas agrivoltaicos elevados suele ser entre un 20 % y un 40 % mayor que la de los sistemas fotovoltaicos instalados típicos a nivel del suelo. Esto implica que los sistemas agrivoltaicos en altura tienen una capacidad de 500 a 800 kW por hectárea, mientras que un sistema fotovoltaico convencional a nivel del suelo puede llegar a los 700 a 1100 kW por hectárea, según el tipo de sistema [71].

A continuación, la figura 9.30 presenta un ejemplo de sistema agrivoltaico, para el cual se tiene una capacidad de 194 kW para un tercio de hectárea:



Figura 9.30: Sistema agrivoltaico en Heggelbach con una capacidad de 194 kWp que cubre un tercio de hectárea. Fuente: Obtenido de [71].

En particular, se considera el menor número presentado por este estudio con el fin de obtener intuiciones al respecto, es decir:

- **Capacidad instalable:** 500 [kW/ha]

En vista de esto, bastaría con 1 ha para instalar la capacidad máxima para autoconsumo que se permite actualmente. Entonces, es interesante notar que los casos de estudio definidos en esta sección consideran 30 ha y 50 ha, por lo cual hay mucho espacio disponible para la instalación del sistema agrivoltaico y la generación de energía. En esta línea, se puede identificar un tremendo potencial de los sistemas agrivoltaicos, para ocupar el espacio disponible no solo para abastecer sus procesos, sino también explorar la posibilidad de exportar la energía a la red. Esto, en virtud de las magnitudes de los consumos eléctricos presentados en este trabajo y la cantidad de espacio disponible.

Capítulo 10

Conclusiones y trabajo futuro

10.1. Conclusiones

En este capítulo se presentan las principales conclusiones de este estudio, para el cual se dispone un análisis del consumo energético del sector agrícola chileno y se identifican los procesos más demandantes y su comportamiento, con el fin de encontrar oportunidades para la integración de sistemas agrivoltaicos para el autoconsumo. A continuación, se exponen las conclusiones generales obtenidas sobre los procesos identificados y las oportunidades halladas, mientras que las conclusiones específicas del comportamiento de cada proceso se detallan en las subsecciones siguientes.

En la actualidad, se puede concluir que el proceso más importante en cuanto a demanda de electricidad es el riego presurizado. Esto, debido a que representa el proceso energético que más comúnmente se va a dar dentro de un predio agrícola y es de vital importancia para el desarrollo del cultivo. Por esta razón, en el contexto actual del sector agrícola, los predios con riego presurizado representan la mayor oportunidad para la integración de sistemas agrivoltaicos destinados al autoconsumo.

No obstante, se constató que no todos los predios agrícolas cuentan con este tipo de riego. Ante esta situación, se destaca como un hallazgo significativo que los cultivos de frutales son los más propensos a contar con sistemas de riego presurizado, y por lo tanto, a tener una mayor demanda eléctrica asociada. Es importante destacar también que se identificó a la zona central de Chile como la región con la mayor superficie plantada de frutales y la mayor superficie regada, además de haber sido señalada por Fraunhofer Chile como la zona con el mayor potencial agrivoltaico del país.

En particular, se puede identificar una relación directa entre la tecnificación de un predio y el consumo eléctrico que puede tener, razón por la cual el sector frutícola es de principal interés, ya que aproximadamente un 85% de la fruta fresca es dedicada a la exportación. Ante esto, se trata de un sector más industrializado y para el cual se proyecta que hayan mayores avances tecnológicos, debido a su importancia en la economía nacional. En vista de esto es que también se reconoce como un potencial sector en el cual se pueda invertir en la instalación de sistemas agrivoltaicos.

Por otro lado, se puede identificar la existencia de predios agrícolas que incorporan más procesos que demandan energía, que es el caso de predios que posean *packing* predial para el procesamiento inmediato de los cultivos cosechados. Al respecto, un hallazgo a destacar es

que de acuerdo con fuentes primarias y secundarias, estos casos se justifican para frutas que son muy delicadas, con el fin de evitar daños por transporte. En este contexto, variedades como la uva de mesa, el cerezo, el arándano y la frambuesa representan oportunidades clave para la implementación de sistemas agrivoltaicos para abastecer el autoconsumo.

Asimismo, existe un enorme potencial de electrificación del uso de combustible dentro de un predio agrícola, para lo cual se explora la futura posibilidad de utilizar tractores eléctricos para reemplazar a los tractores diésel actuales. Como principal conclusión, se puede reconocer que la tecnología actual cumple con los requisitos para integrar tractores eléctricos en el sector frutícola y vitivinícola, considerando los tractores diésel que se utilizan para las distintas labores. Sin embargo, para el uso de maquinaria pesada sigue siendo un desafío por las demandas de potencia altas, la tecnología en baterías y tiempos de operación.

Una vez analizadas las conclusiones generales de este trabajo, se presentan las conclusiones específicas y hallazgos obtenidos de estudiar las características y comportamientos de cada proceso: riego presurizado, *packing* predial y uso de maquinaria agrícola.

10.1.1. Riego presurizado

Respecto al riego presurizado, se lograron identificar las variables y parámetros necesarios para crear una metodología que permite estimar la demanda eléctrica de este proceso, la cual se basa en determinar las necesidades de uso y la potencia de la electrobomba, que es finalmente el equipo eléctrico que consume electricidad en este proceso. Como principal conclusión general de esta metodología es que la cantidad de riego necesaria depende directamente de las condiciones climáticas y del tipo de cultivo, variables que, a su vez, fluctúan estacionalmente a lo largo del año. La demanda de riego presenta una sinergia natural con la generación solar de un sistema agrivoltaico. En definitiva, la demanda de energía tiene una relación directa con la demanda de riego. Asimismo, esta mayor demanda de energía coincide con los meses de mayor radiación solar.

Para satisfacer la demanda de riego de un predio, las características del diseño del sistema de riego determinan cuánto tiempo será necesario regar para reponer la evapotranspiración del cultivo en un periodo de tiempo. Como principales hallazgos se puede identificar que la potencia de la electrobomba de este sistema depende principalmente del tamaño del predio, mientras que el tiempo de riego por día depende de la cantidad de sectores que debe abastecer la bomba, además de la cantidad de horas diarias por sector. Asimismo, la cantidad de horas diarias que se debe regar cada sector depende del tipo de suelo.

Respecto a los tipos de suelo de los predios agrícolas, se puede concluir que los suelos que requieren riego frecuente, como los arenosos, aprovechan mejor la sinergia con la generación solar. Por otro lado, los suelos con menor necesidad de riego, como los suelos francos y arcillosos, muestran una menor coincidencia en el uso de la energía generada para el autoconsumo, debido a que los horarios de riego por día tienden a ser más largos que las horas de generación solar, además de tener más días sin riego. Por lo tanto, se concluye que los suelos arenosos tienen un mayor potencial para satisfacer su consumo eléctrico mediante la integración de sistemas agrivoltaicos enfocados en el autoconsumo.

Otro resultado interesante es el hecho de que la mayoría de los cultivos de frutales no contemplan riego durante los meses de invierno, lo cual se traduce en que toda la energía generada por el sistema agrivoltaico será inyectada a la red en estos meses. Sin embargo, se

identifican los cítricos y paltos como cultivos que sí tienen necesidad de riego en el invierno. Ante esto, se reconoce que estos cultivos representan una oportunidad en la cual hay mayor tendencia a destinar la energía generada al autoconsumo, debido a que la cantidad de días de riego durante un año es en general mayor. De acuerdo con el caso de estudio analizado, se verifica que para un cultivo de cítricos se obtiene una mayor cantidad de energía destinada al autoconsumo que a la inyección.

10.1.2. Packing predial

Respecto al *packing*, se puede reconocer que la cadena de frío es la que tiene la mayor demanda eléctrica asociada, la cual viene determinada por la potencia de los compresores. Asimismo, al estar encendidas las cámaras de pre-frío y almacenamiento también tienen un consumo importante. Sin embargo, se identifica a la potencia de los compresores como aquel proceso más demandante de un *packing*.

El comportamiento de los equipos de frío representa un consumo alto durante todo el día mientras el *packing* está funcionando. La operación del *packing* depende directamente de la temporada de cosecha del cultivo en específico, pues la fruta se procesa a medida que se cosecha. Asimismo, debido a que un *packing* predial busca procesar frutas delicadas, no se proyectan altos tiempos de almacenamiento, a diferencia de cultivos como la manzana, que pueden ser almacenados durante largos periodos. Por esta razón, los cultivos procesados localmente buscan minimizar su tiempo de almacenamiento, que según las fuentes consultadas, no suele exceder los 5 días. Como resultado, el consumo eléctrico se ajusta directamente a la temporada de la cosecha de la fruta, cuyas fechas varían no solo según el tipo de fruta cultivada, sino también según su variedad específica.

Tras haber realizado la salida a terreno y con la información recopilada, se concluye que un resultado importante de este trabajo son la metodología y el cuestionario diseñados para estimar la demanda eléctrica de los procesos que se llevan a cabo en una planta de procesamiento. Si bien estos productos surgieron a raíz de la visita a terreno de un *packing* industrial, la metodología y el cuestionario son lo suficientemente generales para aplicarse tanto a un *packing* industrial como a uno predial, pues dependen principalmente de los procesos que se identifiquen.

No obstante, los resultados presentados en este estudio incorporan tanto fuentes primarias como secundarias, disponiendo de esta manera los procesos esperados para un *packing*, además del comportamiento de su demanda eléctrica y ordenes de magnitud reales.

10.1.3. Uso de maquinaria agrícola

Respecto al uso de maquinaria agrícola en frutales y su consumo energético, se han identificado 4 procesos generales que requieren del uso de tractores: cosecha, poda de invierno, poda de verano y tratamientos fitosanitarios; dentro de los cuales se pueden reconocer comportamientos diferentes para la aplicación de insecticidas, herbicidas y fungicidas.

Para llevar a cabo estos procesos, de acuerdo con la información recopilada en terreno y la tecnología actual disponible de tractores eléctricos, se puede concluir que existe una excelente oportunidad para reemplazar los tractores diésel, al menos para los tractores utilizados en el sector frutícola y vitivinícola, los cuales tienden a ser más compactos y de menor potencia que

la maquinaria más pesada. No obstante, cabe destacar que será necesario evaluar la factibilidad de integrar un tractor eléctrico según la realidad de cada predio agrícola y sus patrones de comportamiento. Para ello, este estudio dispone un cuestionario que permite comprender las necesidades y lógicas de operación del uso de tractores eléctricos para cada proceso de un predio agrícola. Como hallazgo importante, se incluyen los pre-requisitos identificados que se deben cumplir para determinar la factibilidad del uso de un tractor eléctrico en reemplazo de un tractor diésel para llevar a cabo una determinada labor:

1. Potencia HP suficiente
2. Tiempo de funcionamiento suficiente por carga
3. Tiempo de carga compatible con las jornadas requeridas

En caso de contar con un sistema agrivoltaico y tractores eléctricos, se constató en terreno que, en general, se cuenta con más tractores de los necesarios para la mayoría de los procesos, excepto durante la cosecha, cuando es necesario un uso intensivo de maquinaria. En vista de esto, se identifica una sinergia de los sistemas agrivoltaicos con los tractores eléctricos que no estén siendo utilizados, mediante la carga durante las horas de mayor recurso solar aprovechando la generación local.

Al respecto, se generó una curva de demanda eléctrica aplicando la metodología propuesta para obtener un eventual consumo estimado de reemplazar las operaciones diésel por un tractor eléctrico. Dentro de las lógicas para la asignación de horas de carga se buscó justamente que coincidieran con horas de generación solar. Los resultados obtenidos del análisis energético mostraron que se obtienen valores muy cercanos para la energía autoconsumida e inyectada. También se puede reconocer que al integrar tractores eléctricos a predios que cuenten con riego presurizado, esto agrega demanda eléctrica para los meses de invierno. En particular, los procesos de aplicar herbicidas, fungicidas y poda de invierno requieren del uso de tractores para llevarse a cabo y representan una demanda energética importante.

Como última conclusión sobre el impacto de usar tractores eléctricos en el consumo energético de un predio agrícola, es que la mayor intensidad ocurre para el periodo de cosecha, tanto por las máquinas requeridas como por la frecuencia de uso. Esto significa por un lado, un desafío para las lógicas de carga y operación de los tractores eléctricos y por otro lado, la temporada en la cual mayor oportunidad de autoconsumo hay.

10.2. Trabajo futuro

De acuerdo con los resultados obtenidos y la normativa vigente para el autoconsumo, la capacidad instalada en el predio agrícola es considerablemente baja en comparación con la extensión total del terreno disponible. Esto resalta el potencial no solo para cubrir las necesidades energéticas del predio mediante un sistema agrivoltaico y la electrificación de sus procesos, sino también para aprovechar la oportunidad de exportar energía al sistema eléctrico.

En este contexto, se propone como trabajo futuro la exploración de diversos esquemas de conexión para este tipo de sistemas, ya que la normativa actual limita la capacidad de autoconsumo a 300 kW. Sin embargo, se estima que con solo una hectárea de terreno se podría

instalar un sistema agrivoltaico en altura con una capacidad de 500 kW, lo que sugiere un gran potencial para superar las limitaciones actuales y maximizar el aprovechamiento energético del predio. Para ello, se propone como un tema de investigación relevante el análisis del contexto normativo actual tanto en Chile como en otros países en relación con los sistemas agrivoltaicos. Este análisis permitirá identificar las oportunidades y desafíos normativos que podrían influir en la implementación y expansión de estos sistemas, proporcionando una base para su desarrollo futuro.

Por otro lado, se identifica a la electromovilidad en la agricultura como una tecnología en estado de desarrollo que representa un alto consumo eléctrico para un predio agrícola, para la cual la tecnología actual ha dado resultados prometedores para tractores compactos, ideales para los sectores frutícolas y vitivinícolas. Si bien la maquinaria agrícola más pesada sigue sin ser de carácter comercial, debido a los desafíos que conlleva el diseño de tractores eléctricos con potencia tan alta para las labores que se destina esta maquinaria, se puede reconocer que su consumo eléctrico sería potencialmente mayor a los tractores eléctricos ya existentes.

Por esto mismo, debido a que también se proyectan mejoras en cuanto a la tecnología de las baterías y la electromovilidad en la agricultura, el desarrollo y comercialización de una mayor gama de tractores eléctricos representa una excelente oportunidad de consumo eléctrico en la agricultura. Para ello, cultivos que actualmente no tienen muchos procesos que consuman electricidad en un futuro podrían ser potenciales casos de estudio para integrar sistemas agrivoltaicos con fines de autoconsumo.

Bibliografía

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), “Climate Change 2021: The Physical Science Basis,” 2021, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>.
- [2] Ministerio de Energía, “Carbono Neutralidad en el sector Energía,” 2021, https://energia.gob.cl/sites/default/files/pagina-basica/informe_resumen_cn_2019_v07.pdf.
- [3] D.J. Van de Ven, I. Capellan-Peréz, I. Arto, “The potential land requirements and related land use change emissions of solar energy,” *Scientific Reports*, vol. 11, p. 2907, 2021, [doi:https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5](https://doi.org/10.1038/s41598-021-82042-5).
- [4] G.-F. Sargentis, P. Siamparina, G.-K. Sakki, A. Efstratiadis, M. Chiotinis, and D. Koutsoyiannis, “Agricultural Land or Photovoltaic Parks? The Water–Energy–Food Nexus and Land Development Perspectives in the Thessaly Plain, Greece,” *Sustainability*, vol. 13, no. 16, p. 8935, 2021, [doi:https://doi.org/10.3390/su13168935](https://doi.org/10.3390/su13168935).
- [5] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), “Agricultura chilena, reflexiones y desafíos al 2030,” 2019, https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2018/01/ReflexDesaf_2030-1.pdf.
- [6] Fraunhofer Chile, “Concepto Agro PV y su aplicación en el sector hortalizas en la Región Metropolitana de Santiago,” 2016, https://www.fraunhofer.cl/es/areas_negocio/sistema-mas-fotovoltaicos/fotovoltaico-integrado/agrivoltaico.html.
- [7] F. Schönberger, “Agro PV: Potencial y perspectivas para Chile,” Fraunhofer Chile, 2023, https://www.energypartnership.cl/fileadmin/user_upload/chile/highlights/Agro_y_Floating_PV_Oportunidad_para_la_agricultura_y_la_transici%C3%B3n/Fraunhofer_Chile_Agro_PV_Oportunidad.pdf.
- [8] Cámara Chileno Alemana de Comercio e Industria (CAMCHAL), “Escenario energético del sector agroalimentario,” 2016, https://opia.fia.cl/601/w3-article-76721.html?_external_redirect=articles-76721_archivo_01.pdf.
- [9] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Manual para la implementación de medidas de eficiencia energética en proyectos de riego,” 2022, <https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2022/03/Manual-para-la-Implementacio%CC%81n-de-Medidas-de-Eficiencia-Energe%CC%81tica-en-Proyectos-de-Riego.pdf>.
- [10] International Renewable Energy Agency (IRENA), Food and Agriculture Organization (FAO), “Renewable energy for agri-food systems,” 2021, <https://www.fao.org/documents/card/fr/c/cb7433en/>.
- [11] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Manual de riego para agricultura de zonas áridas en el norte de Chile,” 2021, https://www.cnr.gob.cl/agricultores/capacitacion/material-de-capacitacion/riego-tecnificado/#_.

- [12] J. Carrasco, P. Abarca, C. Aguirre, “Manual de buenas prácticas y lecciones aprendidas para adaptación al cambio climático. Para la agricultura de secano de la Región de O’Higgins,” 2022, <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/68837>.
- [13] E. Varas, J. Sandoval, “Selección de bombas para riego,” 1989, <https://biblioteca.inia.cl/bitstream/handle/20.500.14001/37681/NR14485.pdf?sequence=1>.
- [14] Debem, “La curva característica de una bomba centrífuga,” [ONLINE], <https://www.debem.com/es/curva-caracteristica-de-bomba-centrifuga/>.
- [15] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Riego presurizado con ERNC,” 2018, https://www.cnr.gob.cl/agricultores/capacitacion/material-de-capacitacion/riego-tecnificado/\#_.
- [16] Hella, “Electromovilidad en el sector agrícola: posibles aplicaciones y oportunidades para el futuro,” [ONLINE], <https://www.hella.com/agriculture/es/Electromovilidad-en-el-sector-agricola-5100.html>.
- [17] J. P. Prado, “Entrevista administrador fundo Agrícola el Laurel ,” Comunicación personal, Mayo 2024.
- [18] Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH, “Análisis del sector de Packing e identificación de posibilidades para ERNC,” 4e Chile, 2020, <https://4echile.cl/wp-content/uploads/2020/11/estudios-analisis-del-sector-de-packing-e-identificacion-de-posibilidades-para-ERNC.pdf>.
- [19] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Diagnóstico para el fomento de microcentrales menores de 2 MW,” 2009, <https://bibliotecadigital.ciren.cl/items/fadd536c-bd56-4ecf-a7cf-6e42229835ce>.
- [20] L. Rodriguez, “Entrevista maestro de máquinas Packing Fruttita Services,” Comunicación personal, Mayo 2024.
- [21] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), “Clientes Regulados y Clientes No Regulados en el Mercado Eléctrico,” [ONLINE], https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/27799/1/Clientes_regulados_y_clientes_no_regulados_en_el_mercado_electrico.pdf.
- [22] F. Rojas, “Dimensionamiento óptimo de sistemas fotovoltaicos bajo el marco regulatorio de la ley 20.571,” 2016, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/145347>.
- [23] Enel, “Conceptos de Tarifas,” [ONLINE], <https://www.enel.cl/es/clientes/tarifas-y-regulacion/conceptos-tarifas.html>.
- [24] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), “Ley de generación distribuida,” 2014, <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1038211>.
- [25] Biblioteca del Congreso Nacional de Chile (BCN), “Modificación ley de generación distribuida,” 2018, <https://www.bcn.cl/leychile/navegar?idNorma=1125560>.
- [26] Ministerio de Energía, “Net Billing,” [ONLINE], https://autoconsumo.minenergia.cl/?page_id=245.
- [27] Fraunhofer Chile, “AGRIVOLTAICO: PROTECCIÓN DE CULTIVOS, AGUA Y CLIMA CON PANELES FOTOVOLTAICOS Agro PV: Potencial y perspectivas para Chile,” 2020, <https://www.fraunhofer.cl/content/dam/chile/es/documents/csetdocument/papers/FCR\%20CSET\%20-\%20Whitepaper\%20Agrivoltaico.pdf>.
- [28] U.S. Department of Energy, “Electric Vehicle (EV) Definition,” 2021, <https://afdc.ene>

- rgy.gov/laws/12660.
- [29] Hobby Farms, “Electric Tractors Are The Future Of Farming,” 2021, <https://www.hobbyfarms.com/electric-tractors-are-the-future-of-farming/>.
- [30] Fendt, “El nuevo Fendt e100 V,” 2023, <https://www.fendt.com/es/maquinaria-agricola/tractores/fendt-e100-v-vario>.
- [31] Monarch, “The Future of EV Tractors in Agriculture,” 2023, <https://www.monarchtractor.com/blog/ev-tractors>.
- [32] Monarch, “Charging Times for EV Tractors How Long They Can Last,” 2023, <https://www.monarchtractor.com/blog/how-long-to-charge-ev>.
- [33] Portal Frutícola, “Chile: Dercomaq presenta el primer tractor 100 % eléctrico,” 2022, <https://www.portalfruticola.com/noticias/2022/09/14/chile-dercomaq-presenta-el-primer-tractor-100-electrico/>.
- [34] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), “Cambios territoriales y tecnológicos en el riego agrícola en Chile entre los años 1997 y 2007,” 2012, <https://www.odepa.gob.cl/odepaweb/publicaciones/doc/7186.pdf>.
- [35] Instituto Nacional de Estadísticas (INE), “VIII Censo Nacional Agropecuario y Forestal,” 2023, <https://www.ine.gob.cl/censoagropecuario>.
- [36] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), “La fruticultura en Chile: tendencias productivas y su expresión territorial,” 2012, https://www.odepa.gob.cl/wp-content/uploads/2019/05/Art\%C3\%ADculo-Fruticultura_mayo-1.pdf.
- [37] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), “Catastro Frutícola 2022 REGION DEL O’HIGGINS,” 2022, <https://www.ciren.cl/proyectos/catastros/catastro-fruticola/>.
- [38] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), “Catastro Frutícola 2022 REGION DEL MAULE,” 2022, <https://www.ciren.cl/proyectos/catastros/catastro-fruticola/>.
- [39] R. Ferreyra, G. S. V. S., “Manejo del riego en condiciones de restricción hídrica.” 1997, <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/32193>.
- [40] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Programación del riego,” 2018, https://www.cnr.gob.cl/agricultores/capacitacion/material-de-capacitacion/riego-tecnificado/\#_.
- [41] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), “Catastro Frutícola 2023 REGION DE VALPARAISO,” 2023, <https://www.ciren.cl/proyectos/catastros/catastro-fruticola/>.
- [42] Oficina de Estudios y Políticas Agrarias del Ministerio de Agricultura de Chile (ODEPA), “Catastro Frutícola 2023 REGION METROPOLITANA,” 2023, <https://www.ciren.cl/proyectos/catastros/catastro-fruticola/>.
- [43] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Manual de inspección y revisión de sistemas fotovoltaicos,” 2018, <https://www.cnr.gob.cl/wp-content/uploads/2019/06/Manual-de-Inspeccion\%CC\%81n-y-Revisio\%CC\%81n-de-SFV.pdf>.
- [44] SEPOR, “Programación de riego,” 2009, http://www.sepor.cl/informacion_cartillas/S102_Cartilla_Programacion_de_riego.pdf.

- [45] R. Ferreyra, G. S. V. S., “Manual de riego para especies frutales: uso eficiente del agua de riego y estrategias para enfrentar periodos de escasez,” 2014, <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7681?show=full>.
- [46] SEPOR, “Programación de riego usando Estaciones Meteorológicas Automáticas,” 2010, http://www.sepor.cl/informacion_boletines/S202_Programacion_de_riego_usando_estaciones_meteorologicas_automaticas.pdf.
- [47] Corporación Nacional de Desarrollo Indígena (CONADI), “Como determinar Cuánto y Cuando Regar,” 2017, https://www.gea.uchile.cl/conadi_cuando_cuanto_regar.html.
- [48] Food and Agriculture Organization (FAO), “Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos,” 2006, <https://www.fao.org/4/x0490s/x0490s00.htm>.
- [49] Zúñiga, M., “Consumo de agua por la planta de siete especies frutales producidas en Chile,” 2013, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/148777>.
- [50] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Cartilla 4: Eficiencia Energética VDF y MAE conectado,” 2021, https://www.cnr.gob.cl/agricultores/capacitacion/material-de-capacitacion/energias-renovables-y-riego/\#_.
- [51] Comisión Nacional de Riego (CNR), “Cartilla 3: Eficiencia Energética VDF y MAE aislado,” 2021, https://www.cnr.gob.cl/agricultores/capacitacion/material-de-capacitacion/energias-renovables-y-riego/\#_.
- [52] C. Uribe, “Riego en arandanos,” 2017, <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/6683>.
- [53] P. Undurraga, “Manual de Frambuesa,” 2013, <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7646>.
- [54] Koslan, “Electrobombas centrífugas normalizadas “EN 733”.”, https://services.koslan.cl/cdn/ficha_tecnica/ficha-tecnica_14092016113969.pdf.
- [55] Ministerio de Energía de Chile, “Explorador Solar,” [ONLINE], <https://solar.minenergia.cl/exploracion>.
- [56] Poscosecha, “Beneficios del hydrocooling para mantener la calidad de las cerezas,” [ONLINE], <https://www.poscosecha.com/ilerfred/beneficios-del-hydrocooling-para-mantener-la-calidad-de-las-cerezas>.
- [57] N. Seitz, “Factibilidad del enfriamiento rapido continuo para fruta fresca,” 2008, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/103141>.
- [58] M. Vidal, “Enfriamiento de un solido por flujo forzado con cambio cíclico de dirección. aplicacion a pallets de uvas,” 2008, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/104864>.
- [59] Jungheinrich, “ETV 318/320/325/ETM 325,” [ONLINE], https://www.jungheinrich.cl/productos/gruas-horquilla-nuevas/gruas-reach/etv-318-320-325-etm-325-383320?gad_source=1&gclid=CjwKCAjwqMO0BhA8EiwAFTLgIPsauVWUoyjtYZYMco-Y0vlu2ItDvDt8y2uIUq82DE71abHno-EvexoC3keQAvD_BwE.
- [60] Fendt, “Totalmente eléctrico: el Fendt e100 V Vario,” 2023, <https://www.fendt.com/es/totalmente-electrico-el-fendt-e100-v-vario-pc-23>.
- [61] Fundación para la Innovación Agraria (FIA), Agrupación de Agricultura Orgánica de Chile A. G. (AAOCH), FIBL, “Técnicas de producción frutal orgánica, parte 2: Manejo

- de huertos frutales de alta densidad Pomáceas y carozos,” 2003, <https://bibliotecadigital.fia.cl/items/8efc351e-27e6-404b-ab5c-5de73d6efbe0>.
- [62] A. Namesny, C. Conesa, I. Hormaza y G. Lobo, “Cultivo, poscosecha y procesado del aguacate,” 2020, <https://www.poscosecha.com/biblioteca/publicaciones/cultivo-poscosecha-y-procesado-del-aguacate>.
- [63] A. Namesny, C. Conesa, L. Olmos y P. Papasseit, “Cultivo, poscosecha, procesado y comercio de berries,” 2022, <https://www.poscosecha.com/biblioteca/publicaciones/cultivo-poscosecha-procesado-y-comercio-de-berries>.
- [64] Dercomaq, “Landini Tractor Rex DT 80 F,” [ONLINE], <https://www.dercomaq.cl/productos/tractores-fruteros/tractor-rex-dt-80-f-landini>.
- [65] Southmaq, “MX5100,” [ONLINE], <https://www.southmaq.cl/tractores-fruteros/mx5100/>.
- [66] D. Ellena, “Formación y sistemas de conducción del cerezo dulce,” 2012, <https://biblioteca.inia.cl/handle/20.500.14001/7500>.
- [67] Fendt, “Últimos avances en el desarrollo del Fendt e100 Vario,” 2020, <https://www.fendt.com/es/1-fendt-e100>.
- [68] CEC Ltda., “Tarifa de suministro eléctrico,” [ONLINE], <https://cecltda.cl/tarifas/202406/v1.pdf>.
- [69] U. Troncoso, “Dimensionamiento y evaluación económica de generación distribuida fotovoltaica en áreas residenciales comunitarias con conexión a la red y esquema netbilling,” 2020, <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/176984?show=full>.
- [70] J. Yuri, “REGULACIÓN DE LA CARGA FRUTAL EN MANZANOS,” 2014, http://www.fdf.cl/biblioteca/presentaciones/2014/pdt_manzanos/Densificacion_Carga_Frutal_FDF.pdf.
- [71] Fraunhofer ISE, “Agrivoltaics: Opportunities for agriculture and the energy transition,” 2024, https://www.fraunhofer.cl/es/areas_negocio/sistemas-fotovoltaicos/fotovoltaico-integrado/agrivoltaico.html.

Anexos

Anexo A. Archivos

A continuación, se incluye el siguiente enlace de Google Drive, que permite el acceso a los archivos creados en este trabajo: <https://drive.google.com/drive/folders/19EQgux5p7mo8AM4epFDypQj0gBZgC8lT?usp=sharing>

En la carpeta “*Riego Presurizado*” se encuentra disponible para descarga el archivo “*Herramienta Riego Presurizado.xlsx*”, donde se implementa la metodología desarrollada en este trabajo, según se describe en el Capítulo 6. En este archivo, se pueden seleccionar las condiciones y modificar las variables en las diferentes hojas según el caso de estudio que se desee analizar. Para obtener la demanda eléctrica con resolución horaria a partir de los resultados obtenidos, es necesario descargar el archivo “*Calendario Demanda.ipynb*” junto con sus archivos de entrada, es decir, “*Output Herramienta.xlsx*” y “*Curva Generacion Solar.xlsx*”, asegurándose de que todos se encuentren en el mismo directorio.

Como ejemplo del formato requerido para los archivos que el código debe leer, se incluyen como ejemplo los archivos “*Output Herramienta.xlsx*”, en el que se deben pegar los resultados de la Herramienta de Riego, y “*Curva Generacion Solar.xlsx*”, que contiene una curva normalizada de 8760 datos basados en los resultados del Explorador Solar. Es importante mantener los nombres de las columnas y solo modificar los datos en estas hojas de Excel.

En la carpeta “*Packing*”, el archivo “*Cuestionario de Procesos Packing.xlsx*” contiene las preguntas diseñadas para caracterizar el consumo eléctrico de los procesos en un *packing*. En la primera hoja se encuentran las preguntas específicas para los procesos identificados durante este estudio, mientras que en la segunda hoja se muestra la estructura de preguntas genéricas que deben formularse para un proceso específico dentro de un *packing*.

Por último, en la carpeta “*Maquinaria agrícola*”, el archivo “*Cuestionario de Uso Maquinaria Agrícola.xlsx*” contiene las preguntas formuladas para caracterizar el consumo eléctrico de los procesos en un huerto de frutales. En la primera hoja se encuentran las preguntas específicas para los procesos identificados en un huerto de frutales, mientras que en la segunda hoja se presenta la estructura de preguntas genéricas que deben realizarse en un predio agrícola para caracterizar un proceso específico.