



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

**PLATAFORMA DE APOYO PARA LA DECISIÓN DE IMPLEMENTAR SISTEMAS DE  
ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES EN LA OPERACIÓN DE EQUIPOS  
DE RIEGO TECNIFICADO**

**MEMORIA PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

ÁLVARO ADRIÁN ISLA FIGUEROA

**PROFESORA GUÍA**

TANIA FERNÁNDEZ RUBILAR

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN**

MARCELO OLIVARES ALVEAL

RODRIGO PALMA BEHNKE

SANTIAGO DE CHILE  
DICIEMBRE DE 2010

RESUMEN DE LA MEMORIA  
PARA OPTAR AL TÍTULO DE  
INGENIERO CIVIL  
POR: ÁLVARO ISLA F.  
FECHA: 01/12/2010  
PROF. GUÍA: TANIA FERNÁNDEZ RUBILAR

“PLATAFORMA DE APOYO PARA LA DECISIÓN DE IMPLEMENTAR SISTEMAS DE ENERGÍAS RENOVABLES NO CONVENCIONALES EN LA OPERACIÓN DE EQUIPOS DE RIEGO TECNIFICADO “

Los elevados costos de producción energética basada en combustibles fósiles, la evidencia de sus efectos sobre los cambios ambientales globales, ha impulsado el estudio, desarrollo e implementación de energías renovables no convencionales (ERNC), a fin de aumentar la capacidad instalada en la red y aprovechar estas fuentes en proyectos de menor escala de los distintos sectores productivos del País.

El objetivo de este trabajo es analizar, en forma preliminar, la factibilidad técnico-económica de utilizar generadores eléctricos, basados en energía eólica, para la operación de sistemas de riego tecnificado, evaluando sus costos.

Se desarrolló una plataforma computacional, que permite simular la operación de un sistema de riego tecnificado utilizando generadores eólicos y evaluar su rentabilidad económica según el cultivo y la superficie plantada. Hidráulicamente, la herramienta permite evaluar los esquemas de captación y distribución de agua más típicos utilizados en el riego, que incluyen captación subterránea o superficial, bomba de captación y bomba de riego. Eléctricamente, el sistema consta de un aerogenerador, regulador de carga, inversor de corriente (para el uso de bombas de corriente alterna) y un banco de baterías, que permite acumular energía de forma eléctrica, ahorrando un estanque elevado, para acumularla de forma potencial.

Con este trabajo se apoya a la Comisión Nacional de Riego en la evaluación de proyectos eólicos, presentados a los concursos de la Ley 18.450, y en la identificación de dificultades, beneficios, variables trascendentales y otros alcances que faciliten la elaboración, por parte de la CNR, de requerimientos para futuros términos de referencia en estudios de este tipo.

Se realizó una evaluación teórica de un cultivo de cerezos en la zona de San Javier (VII Región del Maule) para tres tamaños prediales, haciendo un análisis de sensibilidad. Se concluye principalmente que: una mayor seguridad energética implica una mayor inversión inicial en aerogeneradores. La rentabilidad disminuye a medida que la seguridad aumenta. La red eléctrica siempre será más rentable que los generadores eólicos o diesel. A medida que aumenta la superficie plantada, la rentabilidad eólica aumenta, superando la de un generador diesel. La alta inversión inicial en aerogeneradores se ve amortizada por los bajos costos de mantención y nulos costos de operación.

A modo general, se concluye que: en zonas extremas, este tipo de energías se hace más atractiva ya que puede ser la única alternativa energética. La variación temporal de generación, es uno de los factores más influyentes en la factibilidad de instalar aerogeneradores en un proyecto de riego tecnificado, ya que el consumo de las bombas es constante en las horas de riego. Los incentivos y subsidios estatales son indispensables para implementar estas tecnologías.

Por último, como extensión de este trabajo, se propone desarrollar una simulación basada en energía solar, y como complemento, plantear un modelo de optimización que permita integrar distintas fuentes energéticas para abastecer un sistema de riego tecnificado.

## AGRADECIMIENTOS

Agradeceré primero a quienes influyeron directamente en el desarrollo de este trabajo. Al profesor Rodrigo Palma, de ingeniería eléctrica, quien se integró a la comisión ayudándome en todo lo relacionado con la parte eléctrica de este trabajo. Al profesor Marcelo Olivares, de hidráulica, quien además de apoyarme con el desarrollo del trabajo, dedicó tiempo a conversaciones no siempre ingenieriles, mas sí interesantes, a veces más que el mismo trabajo. A Manuel Navas, por la disposición a explicarme su trabajo de título del cual se extiende este trabajo. A la Comisión Nacional de Riego (CNR), de donde nace este trabajo y que me amparó en sus dependencias por algún tiempo, y a los profesionales de ella Manuel Silva y Gustavo Roa. Por último de forma muy especial y sincera agradezco a Tania Fernández, ingeniera de la CNR y profesora guía, quien me impulsó en este trabajo y dedicó bastante de su tiempo en ayudarme a concretarlo. No sólo fue guía en el desarrollo del trabajo, sino que también en varios otros aspectos profesionales.

Sigo con quienes fueron parte fundamental en el desarrollo de mi vida dentro de la universidad, tanto en lo personal como político. A mis compañeros y compañeras de la Juventud Socialista de la Universidad de Chile, con quienes trabajamos siempre por una universidad más justa y pluralista, por una educación de calidad para todas y todos. A muchos profesores y funcionarios de la facultad con quienes tuve el honor de trabajar por nuestra universidad y de quienes aprendí bastantes cosas. Al Guille, funcionario del CEI y buen amigo. A todos con quienes trabajé en el CEIC, ANEIC, CEI y FECH.

A los amigos y amigas que me acompañaron en este proceso: Lucho, Pancho, Mate, Pame, Moni, Carlos, Cote, Nico, Fabián y Feña. Mención especial para la Vero, Colle, Consu y Gaby, con las cuales existe un grado de complicidad mayor. Siempre será agradecida su amistad. A todos quienes estuvieron en alguna etapa de este proceso universitario.

A quienes fueron y son parte importante de mi desarrollo personal. Javier, mi hermano, gracias por todo. Abuelos, amigos del alma, tíos, tías, familia. Y por cierto a la Elena y Elvira.

A Renée, cómplice en lo más íntimo de mi trabajo y persona. Quien me tuvo una paciencia tal vez más de la merecida. Gracias por estar conmigo.

Por último, a mi madre y padre, incansables luchadores, a quienes tengo un gran amor y admiración, fueron el apoyo y soporte fundamental en lo personal para concluir este trabajo.

*“La Utopía está en el horizonte. Me acerco dos pasos, ella se aleja dos pasos. Camino diez pasos y el horizonte se corre diez pasos más allá. Por mucho que yo camine nunca la alcanzaré. ¿Para qué sirve la utopía? Para eso sirve: para caminar” E. Galeano*

## TABLA DE CONTENIDOS

<b>1 INTRODUCCIÓN</b>	<b>1</b>
1.1 SECTOR SILVOAGROPECUARIO Y LA IMPORTANCIA DEL RIEGO EN SU DESARROLLO	2
1.2 INCENTIVOS A PROYECTOS DE ERNC	3
1.3 OBJETIVOS	4
1.3.1 OBJETIVO GENERAL	4
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.4 ALCANCES	5
1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO	5
<b>2 MARCO TEÓRICO</b>	<b>7</b>
2.1 SISTEMAS DE RIEGO TECNIFICADO	7
2.1.1 DETERMINACIÓN DE LA ALTURA MANOMÉTRICA	8
2.1.2 DETERMINACIÓN DEL CAUDAL DE DISEÑO	11
2.1.3 SELECCIÓN DE BOMBAS	15
2.2 DIMENSIONAMIENTO GENERADOR EÓLICO	17
2.2.1 PRINCIPALES COMPONENTES DE UN SISTEMA EÓLICO	17
2.2.2 POTENCIAL EÓLICO	18
2.2.3 DIMENSIONAMIENTO DEL SISTEMA EÓLICO	20
2.3 ADAPTACIÓN Y CONTROL	23
<b>3 DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO Y DISEÑO PLATAFORMA COMPUTACIONAL</b>	<b>26</b>
3.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA A EVALUAR	26
3.1.1 ESQUEMA SIN BATERÍAS	27
3.1.2 ESQUEMA CON BATERÍAS	28
3.1.3 SISTEMAS DE RIEGO	29
3.2 PLATAFORMA COMPUTACIONAL	31
3.2.1 CARACTERÍSTICAS	31
3.3 SIMULACIÓN	32
3.3.1 VARIABLES DE ENTRADA	33
3.3.1 BASE DE DATOS	38
3.3.2 SALIDA DE DATOS	38
3.3.3 ALGORITMOS DE LA SIMULACIÓN	41
3.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA	46
3.4.1 VARIABLES DE ENTRADA	46
3.4.2 BASE DE DATOS	49
3.4.3 SALIDA DE DATOS	50

<b>3.5</b>	<b>MEJORAS A LA VERSIÓN DE M. NAVAS</b>	<b>52</b>
<b>4</b>	<b>PRUEBA DE LA HERRAMIENTA</b>	<b>55</b>
<b>4.1</b>	<b>ANÁLISIS TEÓRICO DE UNA PLANTACIÓN DE CEREZOS</b>	<b>55</b>
4.1.1	ESCENARIOS ANALIZADOS	56
4.1.2	RESULTADOS	58
<b>5</b>	<b>CONCLUSIONES</b>	<b>64</b>
<b>5.1</b>	<b>PLATAFORMA COMPUTACIONAL</b>	<b>64</b>
5.1.1	VENTAJAS	65
5.1.2	DESVENTAJAS	65
<b>5.2</b>	<b>PRUEBA DE LA HERRAMIENTA</b>	<b>66</b>
<b>5.3</b>	<b>COMENTARIOS GENERALES</b>	<b>68</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>70</b>

**ANEXO I: COEFICIENTES DE CULTIVO**

**ANEXO II: MARGINALIDAD DE CULTIVOS**

**ANEXO III: CURVAS CARACTERÍSTICAS DE BOMBAS**

**ANEXO IV: TABLAS DE RESULTADOS**

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1: “Presión de trabajo de los equipo de riego”	10
Tabla 2.2: “Eficiencia de aplicación de agua según método de riego. Fuente: Reglamento Ley 18.450”	13
Tabla 2.3: “Distribución diaria de velocidad del viento para un mes”	21
Tabla 2.4: “Distribución diaria de velocidad del viento para un mes”	22
Tabla 3.1: “Aerogeneradores base de datos”	38
Tabla 3.2: “Comparación entre la versión de M. Navas y la actual”	53
Tabla 4.1: “Descripción Escenarios de Simulación”	56
Tabla 4.2: “Caudales mensuales para cada escenario”	57
Tabla 4.3: “Puntos de operación de cada caudal”	57
Tabla 4.4: “Variación de parámetros para análisis de sensibilidad”	60

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: “Aumento de precio de combustibles fósiles en dólares por barril equivalente de petróleo. Fuente (CNE, 2008)”	1
Figura 1.2: “Distribución de la superficie regada en el País”. Elaboración propia. Fuente (INE, 2007)	3
Figura 2.1: “Esquema de alturas”	11
Figura 2.2: “Tipos de marcos de plantación”	12
Figura 2.3: “Curvas características para bombas marca CAPRARI”	16
Figura 2.4: Esquema de un aerogenerador típico. (Fuente: CNE)	17
Figura 2.5: “Curva de potencia para turbina Whisper 175”	21
Figura 2.6: “Esquema típico de una batería”	24
Figura 2.7: “Curva IV y potencia de salida típicas de un módulo fotovoltaico”	25
Figura 3.1: “Configuración de generación. Esquema sin baterías”	27
Figura 3.2: “Curva de generación y consumo de energía para un sistema de riego con bomba de captación y estanque de acumulación”	28
Figura 3.3: “Configuración de generación. Esquema con baterías”	28
Figura 3.4: “Curva de generación y consumo de energía para un esquema con baterías y un sistema de riego con bomba de captación y estanque de acumulación”	29
Figura 3.5: “Sistemas de riego a evaluar en la plataforma computacional”	30
Figura 3.6: “Estructura conceptual de la plataforma computacional”	32
Figura 3.7: “Interfaz de entrada de datos. Hoja: Datos”	34
Figura 3.8: “Hoja para ingresar características de la bomba de riego”	36
Figura 3.9: “Hoja para el ingreso del registro de datos”	37
Figura 3.10: “Hoja Salida”	39
Figura 3.11: “Hoja Salida. Detalle Diario”	40
Figura 3.12: “Diagrama de Flujo de la Simulación”	43
Figura 3.13: “Diagrama de Flujo de la Operación de las Bombas”	45
Figura 3.14: “Hoja de entrada de datos. Ev. Económica”	48
Figura 3.15: “Hoja: Marginalidades”	50
Figura 3.16: “Salida de datos de la Evaluación Económica”	51
Figura 3.17: “Salida de datos de la Evaluación Económica. Continuación”	51
Figura 4.1: “Zona de Estudio y ubicación de estaciones meteorológicas”	55

## 1 INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años, el crecimiento de la población, su deseo de mejorar el estándar de vida, y la necesidad del sector productivo de generar nuevos proyectos, han llevado a una mayor demanda energética mundial, en particular del sector eléctrico. El aumento estimado del consumo eléctrico mundial es de un 85% en el año 2030, pasando desde un consumo anual de 16,4 millones de Gwh el año 2004, a un consumo estimado de 30,3 millones de Gwh en el año 2030, siendo el carbón y el gas natural los principales combustibles que sustentarán la generación eléctrica. (CNE, 2008)

Sumándole a esto otras variables internacionales, de índole económica y política, han llevado a que el precio de los combustibles fósiles experimente un aumento sostenido y una alta volatilidad (como se hace evidente en las bruscas caídas de los últimos meses de 2008. (Figura 1.1).

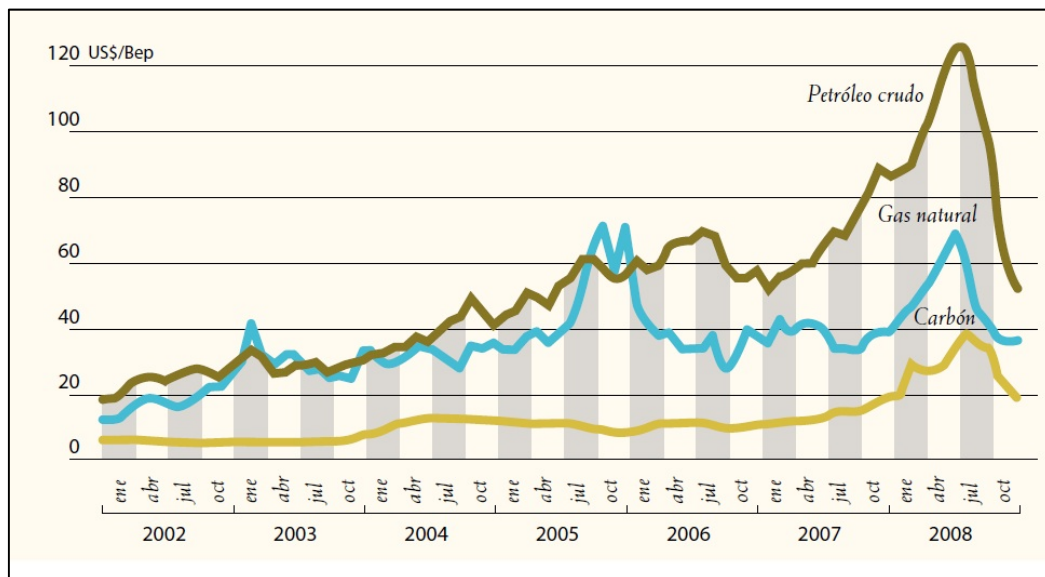


Figura 1.1: “Aumento de precio de combustibles fósiles en dólares por barril equivalente de petróleo. Fuente (CNE, 2008)”

Los costos actuales de la producción energética basada en estos combustibles, así como la evidencia de los efectos de la producción y consumo de energía sobre los cambios ambientales globales (calentamiento global), han llevado a retomar el interés por el estudio, desarrollo e implementación de fuentes de energía renovables no convencionales (ERNC), a fin de aumentar la capacidad instalada en la red, y aprovechar estas fuentes en proyectos de menor escala de los distintos sectores productivos del país.

A diferencia de las energías de origen fósil, las ERNC se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento en energía útil, no se agotan en una escala humana.

En Chile, se define como fuentes de Energías Renovables No Convencionales a la eólica, la pequeña hidroeléctrica (centrales hasta 20 MW), la biomasa y el biogás, la geotermia, la solar y la mareomotriz. (CNE, 2009)

Las ERNC no han sido mayormente explotadas en Chile porque su gestión es relativamente reciente, con un mercado de su tecnología inmaduro, poca experiencia en su aplicación y con altos costos de inversión asociados. Por su naturaleza de innovación, las energías renovables son más caras en el inicio de su aplicación. Por esta razón, los países desarrollados aplican incentivos especiales para promover su aplicación. (Reinke, 2008).

De lo anterior queda a la vista que, en Chile, el rol regulador y subsidiario del Estado es clave para poder aumentar el desarrollo e implementación de ERNC. Entendiendo esto, el gobierno, a través de sus distintos organismos, está subsidiando e incentivando proyectos de aprovechamiento de ERNC. Además, la nueva política energética del país valora no sólo la eficiencia técnica y económica de las fuentes de energía, sino también, aspectos tales como la seguridad energética, la sustentabilidad y la equidad social.

## **1.1 SECTOR SILVOAGROPECUARIO Y LA IMPORTANCIA DEL RIEGO EN SU DESARROLLO**

El sector silvoagropecuario es actualmente uno de los más dinámicos de la economía chilena y desempeña un importante papel en el desarrollo del país. Desde 1998 tiene un crecimiento superior al nacional, con una contribución al PIB nacional del 4,5% en el año 2004 (CNR, 2006).

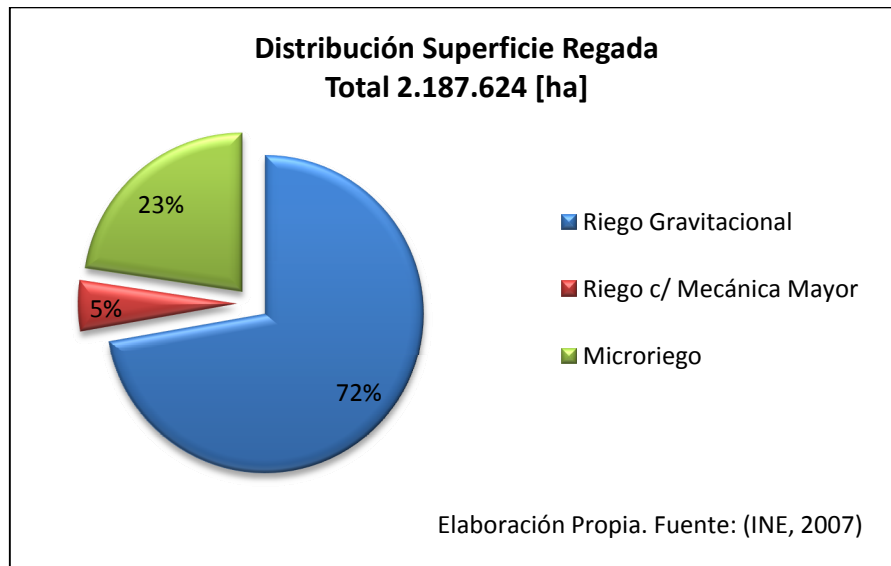
De las exportaciones nacionales, el sector silvoagropecuario representó el 23,1% el año 2004, alcanzando las de origen agrícola, una contribución del orden del 11,8% del total nacional.

El riego y su desarrollo ha sido un factor de producción importante en la evolución del sector agrícola y, por tanto, en la contribución de éste al desarrollo del país. La producción de la superficie bajo riego aporta entre un 60 a 65% del Producto Interno Bruto del sector agropecuario nacional (Jeria, 2002), y contribuye en más del 80% a las exportaciones de origen agrícola del país, alcanzado US\$3.770 millones en el año 2004 (CNR, 2006).

Al año 2007 se tenían 2.200.000 hectáreas regadas (ver Figura 1.2) , de las cuales sólo un 28% se encuentran tecnificadas (INE, 2007). Considerando que con sistemas mecanizados se puede lograr hasta un 90% de eficiencia en el uso del agua, se hace evidente la necesidad de aumentar la cantidad de superficie bajo riego tecnificado. Este aumento de eficiencia se traduce, en general, en un incremento de la superficie plantada.

La ley N° 18.450 de “Fomento a la Inversión Privada en Obras de Riego y Drenaje”, desde su gestación en 1985, ha tenido como objetivo incrementar la superficie regada del país, provocar un mejoramiento del abastecimiento de agua en aquellas áreas regadas en forma deficitaria, incentivar un uso más eficiente de la aplicación del agua e incorporar nuevos suelos a la explotación agropecuaria, esto último, por la vía de eliminar el mal drenaje o facilitar la puesta en riego predial.





**Figura 1.2:** Distribución de la superficie regada en el País. Elaboración propia. Fuente (INE, 2007)

Esta ley faculta al Estado de Chile para manejar un programa de obras menores de Riego y Drenaje, que opera mediante un sistema de concursos públicos, para que los agricultores puedan optar al fomento estatal.

Una variable limitante al momento de tecnificar el riego son el costo y disponibilidad de la energía. Por tanto, es de gran necesidad analizar alternativas a la energía eléctrica convencional que permitan la factibilidad de los proyectos de tecnificación. Para esto, este trabajo se enfoca en estudiar la factibilidad de implementar generadores eléctricos, basados en energía eólica, para el bombeo de agua en sistemas de riego tecnificado. En particular, para cultivos de pequeños y medianos agricultores que presentan sus proyectos de tecnificación a los concursos de la Ley 18.450.

Con estos sistemas se evitaría el uso de combustibles fósiles y, en zonas extremas con dificultad de acceso a la red convencional de energía eléctrica, la utilización de este tipo de energías sería una alternativa viable para potenciar la agricultura bajo riego tecnificado.

## 1.2 INCENTIVOS A PROYECTOS DE ERNC

Con la finalidad de impulsar el desarrollo de las ERNC en Chile, junto a los cambios realizados en los últimos años en el marco regulatorio del sector eléctrico y a la generación de información útil para orientar la identificación y evaluación de ese tipo de proyectos en Chile (potenciales energéticos disponibles en el país, descripción de procedimientos de tramitación ambiental, etc.); el Gobierno de Chile mantiene instrumentos de fomento que apoyan la inversión privada en ERNC.

Desde el año 2005, en una iniciativa conjunta de la Corporación de Fomento a la Producción (CORFO) y la Comisión Nacional de Energía (CNE), se está entregando cofinanciamiento (subsidios) para el desarrollo de los estudios que permitan evaluar la viabilidad técnica y económica de los proyectos ERNC. Con ello se pretende apoyar y acelerar el desarrollo del mercado de proyectos de energía que usen fuentes renovables no convencionales en Chile. (CNE, 2009)

Además, la CNE, a través del proyecto CHI/00/G32 “Remoción de Barreras para la Electrificación con Energías Renovables”, financiado por el Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés), e implementado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), ha estudiado, desarrollado, e implementado diversas alternativas para el abastecimiento energético de viviendas rurales aisladas, mediante la utilización de ERNC.

Como parte de los objetivos del proyecto CHI/00/G32, se encuentra el impulso a la utilización de ERNC en sistemas productivos de “micro-escala”, cuyo fin es satisfacer necesidades básicas de alimentación, suministro de agua de riego y potable, e incluso suministro de gas (en el caso del uso de BioGas). (Navas, 2009)

Asimismo, la Comisión Nacional de Riego, a través de la Ley 18.450, por primera vez, lanzó en diciembre de 2009 el concurso número 20 llamado: “Tecnificación con energías renovables no convencionales”. El objetivo de este concurso es subsidiar la tecnificación del riego y los generadores eléctricos, basados en ERNC, para operar los equipos de bombeo. Se destinaron en total \$300.000.000 (trescientos millones de pesos), equivalentes en U.F del 11 de diciembre de 2009 (14.280 U.F Aproximadamente). (CNR, 2009)

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo General**

El objetivo de este trabajo es analizar, en forma preliminar, la factibilidad técnico-económica de utilizar generadores eléctricos basados en energía eólica, para la operación de sistemas de riego tecnificado, evaluando sus costos.

### **1.3.2 Objetivos Específicos**

Los objetivos específicos de este trabajo corresponden a:

- Desarrollar una plataforma computacional que permita a un usuario, de forma simple, tomar una decisión respecto al uso de una turbina eólica para un sistema de riego tecnificado, basado en la factibilidad energética y económica.
- Proporcionar un sistema de apoyo a la Comisión Nacional de Riego para futuras evaluaciones de proyectos y estudios de tecnificación con energía eólica.
- Identificar los mayores inconvenientes de instalar estas tecnologías, para así poder realizar estudios posteriores, más detallados, que permitan determinar las zonas, cultivos y otros factores para los cuales es rentable este tipo de sistemas.
- Utilizar la herramienta en un escenario específico, que permita concluir respecto a la factibilidad de utilizar este tipo de tecnologías

## 1.4 ALCANCES

El trabajo se enfoca en determinar la factibilidad de implementar generadores eólicos para riego tecnificado en parcelas de pequeños y medianos agricultores.

Esta herramienta ayudará a la selección de generadores eólicos, así como a obtener un criterio de evaluación económico (VAN, TIR) que incorpore los costos de inversión para los sistemas eléctricos y los beneficios según el tipo de cultivo y tamaño predial.

Los beneficios del agricultor, por la venta de su cultivo, serán calculados con precios estimados por los organismos e instituciones especializadas. Cabe recordar que el dinamismo de la economía en el sector agrícola, hace que los precios varíen de un año a otro de forma significativa.

La selección se basará en equipos disponibles en el mercado local, y la evaluación económica contemplará, además, una comparación con las actuales alternativas eléctricas como los generadores diesel y la red eléctrica.

Se desarrollará una plataforma computacional de fácil uso, que entregue una gran cantidad de resultados, la cual será probada realizando un análisis de factibilidad, teórico, de una plantación de cerezos, variando los tamaños prediales, en la zona de San Javier, VII Región del Maule.

En un principio se consideró hacer un análisis teórico parametrizando todas las variables hidráulicas de entrada, pero se descartó esta opción dado que estas varían fuertemente dependiendo de la topografía, meteorología y las condiciones hidráulicas del sector. Además de esto, hay parámetros que dependen de consideraciones arbitrarias del agricultor, como por ejemplo, las horas de riego diarias.

## 1.5 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

El presente trabajo consta de los siguientes capítulos

- **Capítulo 2: Marco Teórico**

Se cubren los conceptos técnicos y teóricos necesarios para comprender el funcionamiento de la herramienta de apoyo diseñada. Incluye los conceptos para dimensionar un sistema de riego tecnificado y un generador eólico.

El capítulo se divide en dos grandes partes caracterizando la demanda y la oferta energética del sistema de riego. La demanda corresponde la potencia total empleada por las bombas y guarda relación con la hidráulica, hidrología y topografía. En tanto, la oferta, tiene que ver con el potencial eléctrico que puede generar el viento.

- **Capítulo 3: Definición del Sistema de Riego y Diseño Plataforma Computacional**

En este capítulo se definen los sistemas de riego y eléctricos, que serán incluidos en la plataforma computacional programada en este trabajo. Es necesario definir esto, dado que los

componentes principales en un sistema de riego varían dependiendo de la disponibilidad del recurso hídrico y del tipo de captación que se tenga en el predio, según esto, puede ser necesario la utilización de un estanque de acumulación, y de una o dos bombas hidráulicas. Además, las condiciones del viento en la zona y la potencia requerida por las bombas, influyen en la cantidad de generadores y baterías a considerar.

Además, se explica el funcionamiento de la herramienta computacional desarrollada profundizando en los procesos realizados para lograr la evaluación de factibilidad energética y económica. Se describen los algoritmos de la plataforma, las variables de entrada, la base de datos incorporada, y el tipo de resultados que se obtienen.

- **Capítulo 4: Prueba de la Plataforma**

Se realizará un análisis de prefactibilidad técnica – económica de instalar aerogeneradores en un cultivo de cerezos en la zona de San Javier, VII Región. El análisis tiene un carácter teórico, es decir, no son proyectos reales.

Se evaluarán 4 tamaños de superficies plantadas con el fin de determinar la rentabilidad asociada a ello, comparándola con la asociada a las fuentes convencionales de energía, como son la red eléctrica y los generadores diesel.

Además, se efectuará un análisis de sensibilidad variando los siguientes parámetros: Inversión en aerogeneradores, variación en el volumen de producción, inclusión de un subsidio estatal, precio de las otras fuentes de energía.

- **Capítulo 5: Conclusiones y Comentarios**

Son presentadas las conclusiones del trabajo, que abarcarán dos puntos:

Conclusiones y comentarios respecto a la plataforma computacional. Ventajas y desventajas, así como las restricciones de ésta. Se discutirán razones por la cuales se escogió un esquema con baterías, por sobre uno sin ellas.

El segundo, corresponde a las conclusiones de los análisis realizados en el Capítulo 4. Se entregarán recomendaciones respecto a los rangos de factibilidad, y la conveniencia de utilizar cultivos más o menos rentables con equipos de generación eólica. Se entregan algunas recomendaciones generales para implementar este tipo de tecnologías, y se dan a conocer las principales limitaciones al momento de implementar generadores con ERNC en el riego tecnificado.

## 2 MARCO TEÓRICO

Este capítulo describirá los aspectos necesarios para desarrollar el trabajo planteado, además de explicar la base teórica con la cual se implementará la herramienta de apoyo computacional. Es importante considerar dos partes en este capítulo.

- La primera, que caracteriza la demanda energética y guarda relación con el sistema de riego, no sólo con los equipos, sino que también con los factores topográficos, hidrológicos e hidráulicos que influyen en la obtención de la potencia total requerida por las bombas.
- La segunda, tiene que ver con la oferta energética y su aprovechamiento, es decir, la determinación del potencial que puede generar el recurso eólico, y explicar los elementos y fórmulas necesarias para los rotores eólicos adecuados para el aprovechamiento de la fuente de energía.

### 2.1 SISTEMAS DE RIEGO TECNIFICADO

Se entiende por riego tecnificado el uso de tecnologías que permitan aplicar el agua de forma tal que los cultivos obtengan el máximo beneficio de ésta, es decir, que gran parte de lo suministrado vaya en directo beneficio de las plantas y no se traduzca en pérdidas (INIA, CNR, 1999).

La tecnificación permite el aprovechamiento del recurso hídrico dado que optimiza el caudal, tiempo y frecuencia de riego según las demandas, minimiza las pérdidas por escurrimiento superficial y percolación, entre otros. Con estos mecanismos se puede obtener hasta un 90% de eficiencia en el uso de agua, a diferencia del riego gravitacional que sólo llega a un máximo del 60%.

Ahora bien, estas ventajas, notables y significativas para la producción de los cultivos, llevan asociadas un consumo energético externo el cual se traduce en un costo eléctrico, que dependerá de la magnitud de las bombas empleadas y su tiempo de funcionamiento.

Básicamente, la potencia de un sistema de bombeo queda definida por el caudal total requerido por la superficie plantada y la altura manométrica total, de la siguiente forma:

$$P = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{745 \cdot \eta} \quad [2.1]$$

Donde:

$P$	:	Potencia de la bomba [HP]
$Q$	:	Caudal demandado [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]
$H$	:	Altura manométrica [m]
$\gamma$	:	Peso específico del agua. 9800 [ $\text{N}/\text{m}^3$ ]
$\eta$	:	Eficiencia de la bomba [%]

El Caudal,  $Q$ , depende del diseño agronómico y guarda relación con el tipo de cultivo y su evapotranspiración, superficie plantada, y la eficiencia del equipo de riego a instalar (goteo, aspersión, microjet, etc.).

La altura manométrica,  $H$ , es la energía necesaria que debe entregar el equipo de bombeo para elevar el caudal de agua al punto de salida, y suplir las pérdidas de carga por rozamiento y singularidades. Está relacionada con: aspiración e impulsión (altura geométrica), pérdidas de carga singulares y friccionales, altura de velocidad, y la presión de trabajo de los equipos de riego.

A continuación se describen con mayor detalle las variables mencionadas en los párrafos anteriores.

### 2.1.1 Determinación de la altura manométrica

Para poder entregar la presión necesaria a los equipos de riego, se debe tener una bomba tal que pueda inyectar la energía suficiente para elevar el agua, remontar todas las pérdidas de carga que hay desde su extracción hasta el punto de salida, y agregar la energía de operación de los equipos de riego.

La altura manométrica representa la energía por unidad de peso y es una expresión deducida de la ecuación de Bernoulli, la cual está dada de la siguiente forma:

$$H_T = H_g + H_f + H_v + H_s + P_T \quad [2.2]$$

Donde:

- $H_T$  : Altura manométrica total [m]
- $H_g$  : Altura geométrica [m]
- $H_f$  : Pérdidas de carga por fricción [m]
- $H_v$  : Altura de velocidad [m]
- $H_s$  : Pérdidas de carga singulares [m]
- $P_T$  : Presión de trabajo de los equipos de riego [m]

#### a) Pérdida de carga por fricción, $H_f$

Si se considera un movimiento uniforme, se puede decir que existe una pérdida de carga de frotamiento por unidad de longitud constante. Luego, se puede definir la pérdida de carga por fricción como:

$$H_f = J \cdot L \quad [2.3]$$

Donde:

- $H_f$  : Pérdidas de carga total por fricción [m]
- $J$  : Pérdida de carga por unidad de longitud [m/m]
- $L$  : Largo total de la tubería [m]

El valor de  $J$  depende de la clase de escurrimiento que tenga el flujo, es decir si es laminar, transición o turbulento, y en este último si las paredes son lisas o rugosas. Para estimar esta magnitud existen varios métodos, tanto racionales como empíricos. Aquí solo se hará mención a los dos más usados que son Darcy – Weisbach y Hazen – Williams.

El método de Darcy – Weisbach es una ecuación racional, derivada de la segunda ley de Newton, donde la pérdida por fricción está expresada en función de la longitud de la tubería ( $L$ ), velocidad media de flujo ( $v$ ) (o en términos del caudal,  $Q$ ), diámetro de la tubería ( $D$ ) y de un factor de fricción ( $f$ ).

$$H_f = f \cdot \frac{Lv^2}{D2g} = \frac{8fLQ^2}{gD^5\pi^2} \quad [2.4]$$

A su vez  $f$  es función de la velocidad ( $v$ ), el diámetro del tubo ( $D$ ), la densidad ( $\rho$ ), viscosidad del fluido ( $\mu$ ) y la rugosidad interna de la tubería ( $\varepsilon$ ). El cálculo de este factor es precisamente donde radica la complejidad del método, ya que se emplean las ecuaciones implícitas de Colebrook – White, lo que hace necesario emplear métodos iterativos<sup>1</sup>.

La ventaja de este método es que se pueden calcular las pérdidas friccionales para cualquier fluido newtoniano en cualquier régimen de escurrimiento.

Alternativamente, el método de Hazen – Williams es una ecuación empírica aplicable sólo a flujos en régimen turbulento. Dada las características de una instalación de riego, el agua se encuentra siempre en este régimen dentro de las tuberías, por lo que su aplicación es la más utilizada en estos proyectos, así como en la mayoría de las obras de ingeniería donde se tienen fluidos en presión dentro de tuberías.

La ecuación de Hazen – Williams está dada por:

$$J = \frac{Q^{1,85}}{(0,28C)^{1,85} \cdot D^{4,86}} \quad [2.5]$$

Donde:

- $J$  : Pérdida de carga por unidad de longitud [m/m]
- $Q$  : Caudal [m<sup>3</sup>/s]
- $C$  : Coeficiente de rugosidad (para PVC, C=150)
- $D$  : Diámetro interior de la tubería [m]

La gran ventaja de esta ecuación es que asocia el coeficiente de rugosidad sólo al material de la tubería lo que la hace ser explícita, luego su cálculo es directo y sencillo.

#### b) **Altura de Velocidad, $H_v$ ,**

La altura de velocidad representa la energía cinética por unidad de peso del fluido. La ecuación corresponde a:

<sup>1</sup> Para ver detalles de cómo calcular el factor de fricción  $f$  con las ecuaciones de Colebrook – White ver (Dominguez, 1974, págs. 719-752)

$$H_v = \frac{v^2}{2g} \quad [2.6]$$

Donde:

$H_v$  : Altura de Velocidad [m]  
 $v$  : Velocidad media del agua [m/s]

**c) Pérdidas de carga singulares,  $H_s$**

Se llama pérdidas de carga singulares a las disipaciones de energía producidas por agitaciones turbulentas de carácter local, es decir, donde se verifican grandes variaciones de las condiciones hidráulicas, como variaciones de presión, velocidad, etc. En una red de tuberías estas singularidades corresponden a los codos, ensanches, angostamientos, válvulas, accesorios, etc.

Las pérdidas singulares son proporcionales a la altura de velocidad, por lo que se pueden escribir de la siguiente forma:

$$H_s = \sum_i k_i \cdot \frac{v_i^2}{2g} \quad [2.7]$$

Donde:

$H_s$  : Pérdidas de carga singulares [m]  
 $k_i$  : Coeficiente de pérdida singular del accesorio  
 $v_i$  : Velocidad del agua en la sección de la singularidad [m/s]

**d) Presión de trabajo de los equipos de riego,  $P_T$**

Los equipos de riego necesitan una determinada presión para su funcionamiento la que es entregada por los fabricantes de estos. Algunos valores característicos se pueden ver en la Tabla 2.1.

**Tabla 2.1: “Presión de trabajo de los equipo de riego”**

Equipo de Riego	Presión de trabajo [m]
Aspersores	50
Goteo	20
Microjet y microaspersor	25

**e) Altura Geométrica,  $H_g$**

La altura geométrica corresponde a la aspiración e impulsión que debe realizar la bomba. Está relacionada con la profundidad del pozo y la topografía del lugar.

La aspiración, es la distancia vertical que hay entre la superficie libre del pozo y el eje de la bomba, mientras que la impulsión es la distancia vertical entre el eje de la bomba y el lugar de salida del agua (ver Figura 2.1), que puede ser un estanque acumulador o directamente los emisores de riego.

Luego, la altura geométrica equivale a:



$$H_g = \text{Altura de aspiración} + \text{Altura de impulsión} \quad [2.8]$$

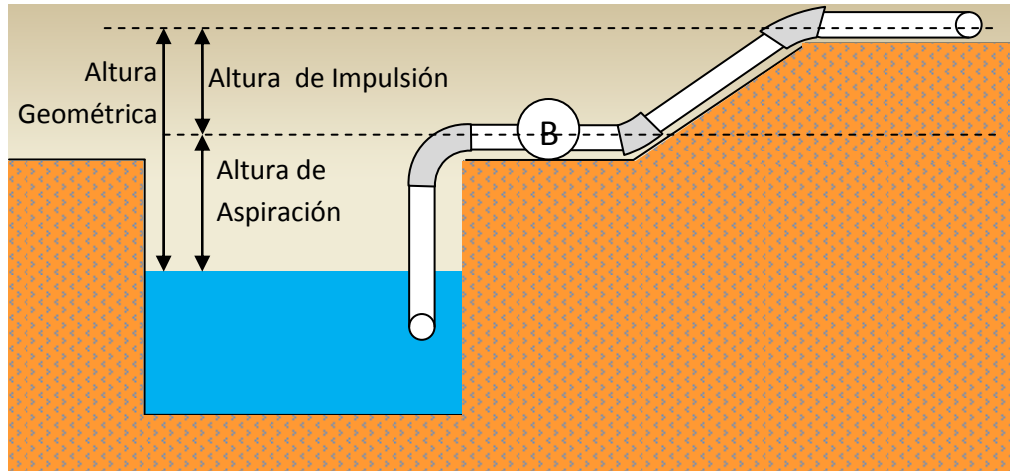


Figura 2.1: "Esquema de alturas"

### 2.1.2 Determinación del Caudal de diseño

El caudal de diseño consiste en el volumen de agua que es necesario reponer al cultivo periódicamente, este depende de los requerimientos del tipo de cultivo, la evapotranspiración potencial del sector, el porcentaje de cobertura o sombreado del cultivo al medio día, y la eficiencia de aplicación del sistema de riego utilizado.

Una expresión para determinar la demanda de agua, recomendada por la CNR, es la dada por Jara & Valenzuela (1998):

$$Da = \frac{ET_p \cdot K_c \cdot \left[ P + \frac{1}{2}(1 - P) \right] \cdot MP}{Ef_a} \quad [2.9]$$

Donde:

- $Da$  : Demanda de Agua [l/día/árbol]
- $ET_p$  : Evapotranspiración Potencial [mm/día] ó [l/m<sup>2</sup>/día]
- $K_c$  : Coeficiente de cultivo en estado adulto
- $P$  : Porcentaje de cobertura o sombreado
- $MP$  : Marco de Plantación [m<sup>2</sup>/árbol]
- $Ef_a$  : Eficiencia de aplicación del sistema de riego

#### a) Evapotranspiración potencial, $ET_p$

La evapotranspiración potencial se define como "la tasa de evapotranspiración desde una superficie extensa cubierta por pasto verde de altura uniforme entre 8 y 15 cm que crece en forma normal, cubre completamente el suelo con su sombra y no carece de agua" (Doorenbos & Pruitt, 1977). La evapotranspiración potencial normalmente se acepta estimarla en base a fórmulas empíricas, tales como la del Método de Penman (o combinación) u otras<sup>2</sup>.

<sup>2</sup> Para ver estos métodos ir a (Ven Te Chow, 1994, págs. 83-93)

En los proyectos que se presentan a los concursos de la Ley 18.450, las bases técnicas exigen utilizar los valores de evapotranspiración potencial publicados en 1997, por la CNR y CIREN, del documento “Cálculo y Cartografía de la Evapotranspiración Potencial en Chile”, por lo que estos valores serán los empleados para los cálculos y evaluaciones.

**b) Coeficiente de cultivo,  $k_c$**

El coeficiente de cultivo describe las variaciones de la cantidad de agua que las plantas extraen del suelo a medida que se van desarrollando, desde la siembra hasta la recolección.

Los valores a utilizar para el coeficiente de cultivo se deben consultar del anexo AT-13 de las bases técnicas de los concursos de la Ley 18.450, el cual se puede encontrar en la página web de la CNR, <http://www.cnr.cl>. De todas formas los valores citados se adjuntan en el Anexo I de este trabajo.

**c) Marco de plantación,  $MP$**

El marco de plantación define el espaciamiento de las plantas tanto entre hileras como sobre hileras. La disposición de estos puede adoptar varias formas según el diseño agronómico: cuadrado, rectangular, tresbolillo (triangular), entre otros. Ver Figura 2.2.

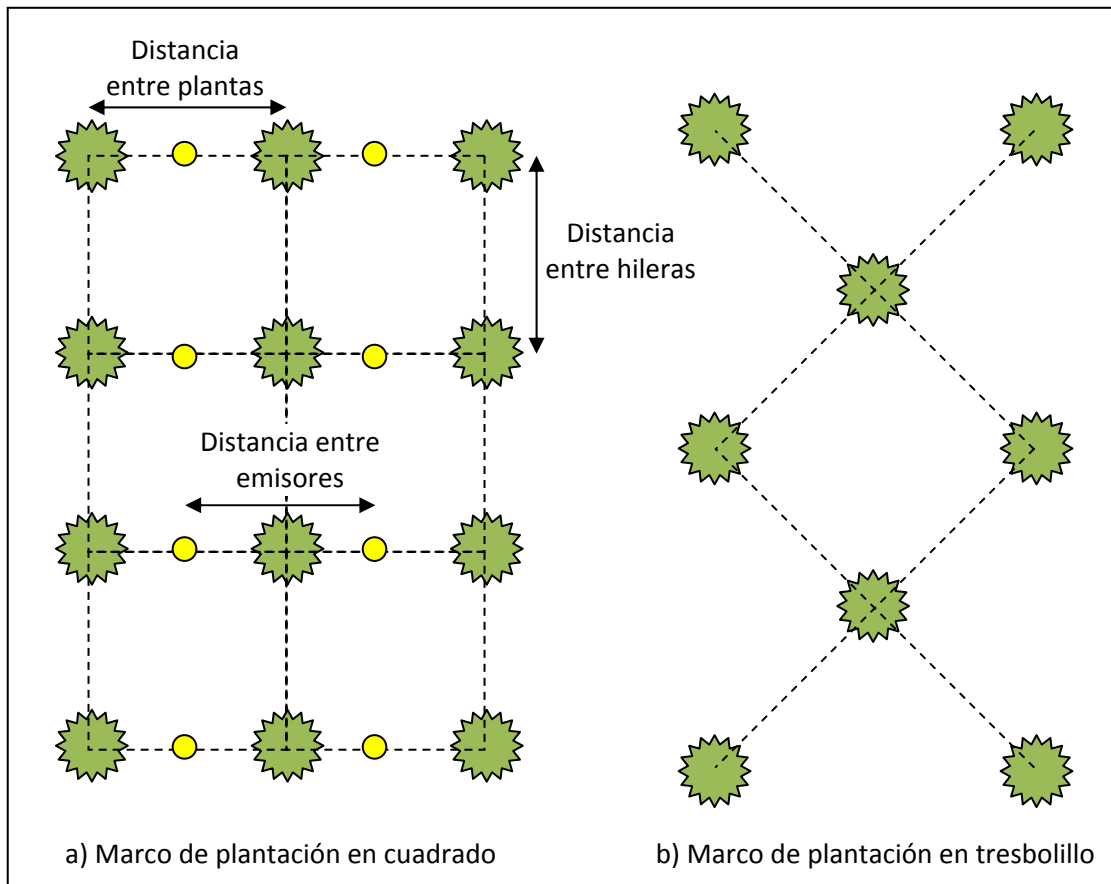


Figura 2.2: “Tipos de marcos de plantación”

**d) Cobertura o sombreado,  $P$** 

Es la proyección superficial del sistema radicular de las plantas, expresado en porcentaje de área del marco de plantación. Expresa también el porcentaje de suelo húmedo que se debe tener dentro del marco de plantación para un eficiente aprovechamiento del agua.

$$P = \frac{PZR}{MP} \quad [2.10]$$

Donde:

- $P$  : Porcentaje o factor de sombreado o cobertura  
 $PZR$  : Proyección de la zona radicular [ $m^2$ ]  
 $MP$  : Marco de Plantación [ $m^2$ ]

**e) Eficiencia del sistema de riego,  $E_f$** 

Como ya se ha mencionado, un sistema de riego tecnificado puede alcanzar hasta un 90% en la eficiencia de aplicación de agua, es decir, sólo un 10% del volumen de agua repuesto al cultivo no es aprovechado por él y se pierde por percolación o evaporación directa. Una menor eficiencia requiere un mayor caudal de diseño.

Los valores a emplear para la eficiencia de cada sistema de riego se obtienen de la tabla contenida en el Artículo 13 del Reglamento de la Ley 18.450, que en este trabajo se entregan en la Tabla 2.2

Tabla 2.2: "Eficiencia de aplicación de agua según método de riego. Fuente: Reglamento Ley 18.450"

Método de Riego	Eficiencia de Aplicación [%]
Aspersión	75
Microjet y Microaspersión	85
Goteo	90

**f) Selección del sistema de riego o emisores**

Dentro de una misma familia de emisores, existe una gran variedad de ellos en cuanto a características técnicas y costo, por lo que la decisión depende del tipo de cultivo, tipo de suelo, clima, costos, etc. Es decir, depende mucho de la experiencia del agrónomo que diseñe el sistema de riego tecnificado.

A continuación se dan algunas recomendaciones para elegir el emisor.

**Goteros**

- Goteros autocompensantes para terrenos desnivelados.
- Cinta de riego para cultivos de una temporada (tomates, cebollas, melones, etc.).
- Mangueras de larga duración con goteros insertados para cultivos de vida extensa (viña, frutales, etc.).

**Microaspersores**

- En la elección de los microaspersores es esencial guiarse por el caudal que debe entregar el emisor y la zona geométrica que se quiere humedecer, se recomienda un emisor por planta, por lo que este tipo de riego está orientado hacia los frutales.

**Aspersores**

- Para el caso de empastadas y cultivos de gran envergadura (trigo, alfalfa, etc.) se recomiendan aspersores gigantes
- Para cultivos de hortalizas, aspersores de baja presión
- Para frutales, aspersores de media presión y ángulo bajo de salida

**g) Tiempo de riego**

El tiempo de riego para un cultivo se calcula de la siguiente forma:

$$t_r = \frac{D_a}{Pp_e} \quad [2.11]$$

Donde:

- $t_r$  : Tiempo de riego diario [hr/día]  
 $D_a$  : Demanda de agua del cultivo [mm/día]  
 $Pp_e$  : Precipitación del equipo [mm/hr]

**h) Precipitación del equipo**

Un emisor de riego es capaz de regar a una cierta tasa dependiendo del marco de plantación del cultivo y el caudal que puede entregar el emisor a una determinada presión. Esto se puede expresar de la siguiente forma:

$$Pp_e = \frac{q_e}{MP} \quad [2.12]$$

Donde:

- $Pp_e$  : Precipitación del equipo [mm/hr]  
 $q_e$  : Caudal del emisor [l/hr]  
 $MP$  : Marco de plantación [m<sup>2</sup>]

El Caudal emisor es un dato del fabricante que se obtiene a través de gráficos donde influye el diámetro de humedecimiento y el tipo de suelo.

El marco de plantación es el área comprendida por la distancia entre hileras y entre plantas (ver Figura 2.2), en el caso del riego localizado.

Para el riego por aspersión, el marco de plantación es el área comprendida por la distancia entre hileras y entre aspersores (ver Figura 2.2). Esta última distancia varía según la velocidad del viento y puede tener como máximo un 60% del radio de influencia de la aspersión.

### i) Tiempo disponible de riego diario y sectores de riego

El tiempo de riego diario corresponde al tiempo que el agrónomo o el propietario del predio disponen para regar durante un día. Este tiempo se determina en base a consideraciones de diseño, técnicas y experiencia.

Por ejemplo, se podría disponer de un tiempo de riego de 14 horas, durante el día, si se tiene un estanque que debe ser llenado durante la noche.

Si el equipo de riego necesita de un operador, como el riego por carrete, las horas de riego diario se deben ajustar a las horas laborales que puede cumplir uno o dos operadores.

Si se tiene un sistema automatizado, podría estar regando durante las 24 horas del día.

Hay que considerar que se debe reponer, independiente de las horas de riego, la misma cantidad de agua al cultivo, por lo que el caudal varía de forma inversa con las horas de riego.

Una vez definido este tiempo, se puede determinar la cantidad de sectores de riego, dado que los cultivos pueden necesitar un menor tiempo de riego. Entonces la cantidad de sectores de riego queda definida por:

$$\text{Sectores} = \frac{t_{rd}}{t_r} \quad [2.13]$$

Donde:

$t_{rd}$  : Tiempo de riego diario [hrs/día]  
 $t_r$  : Tiempo de riego del cultivo [hrs/día]

Por ejemplo, si se define un tiempo de riego diario de 16 horas y el cultivo sólo necesita ser regado durante 4 horas al día, se tienen 4 sectores de riego.

### 2.1.3 Selección de bombas

Una vez determinado el caudal requerido para riego y habiendo definido la forma en la que se acumulará el volumen de agua, es posible seleccionar la(s) bomba(s) adecuada(s) para el sistema de riego. Se asume que al seleccionar la bomba ésta viene acompañada del motor adecuado.

Cada bomba tiene asociada una curva característica que muestra la altura manométrica a la cual puede llevar un determinado caudal. Esta curva es única y la bomba no puede trabajar fuera de ella. En caso de haber variaciones de caudal esta ajusta automáticamente su punto de operación aumentando la energía al caudal si este disminuye, ó disminuyéndosela si este aumenta.

Las bombas se seleccionan encontrando aquella que, dentro de su curva característica, entregue los requerimientos de caudal y altura obtenidos del diseño agronómico. Ahora bien, puede haber más de una bomba que cumpla las condiciones, pero con diferentes eficiencias. Si no hay alguna bomba que cumpla los requerimientos, se escoge la más próxima que entregue el mismo caudal pero con una altura manométrica mayor.

Veamos esto con un ejemplo. Consideremos las curvas características para las bombas marca CAPRARI (ver Figura 2.3), sumergidas, de 10 pulgadas de diámetro de la serie E10S64/xx, donde xx representa el modelo de la bomba que pueden ser: 2EF, 2CD, 2BC, 2A y 3C.

Los puntos P1 y P2 son dos puntos de operación de un sistema a los cuales se les debe encontrar una bomba adecuada. P1 tiene una altura manométrica  $H = 41[m]$  y  $Q = 75[l/s]$ , en tanto P2 tiene  $H = 47[m]$  y  $Q = 82[l/s]$ .

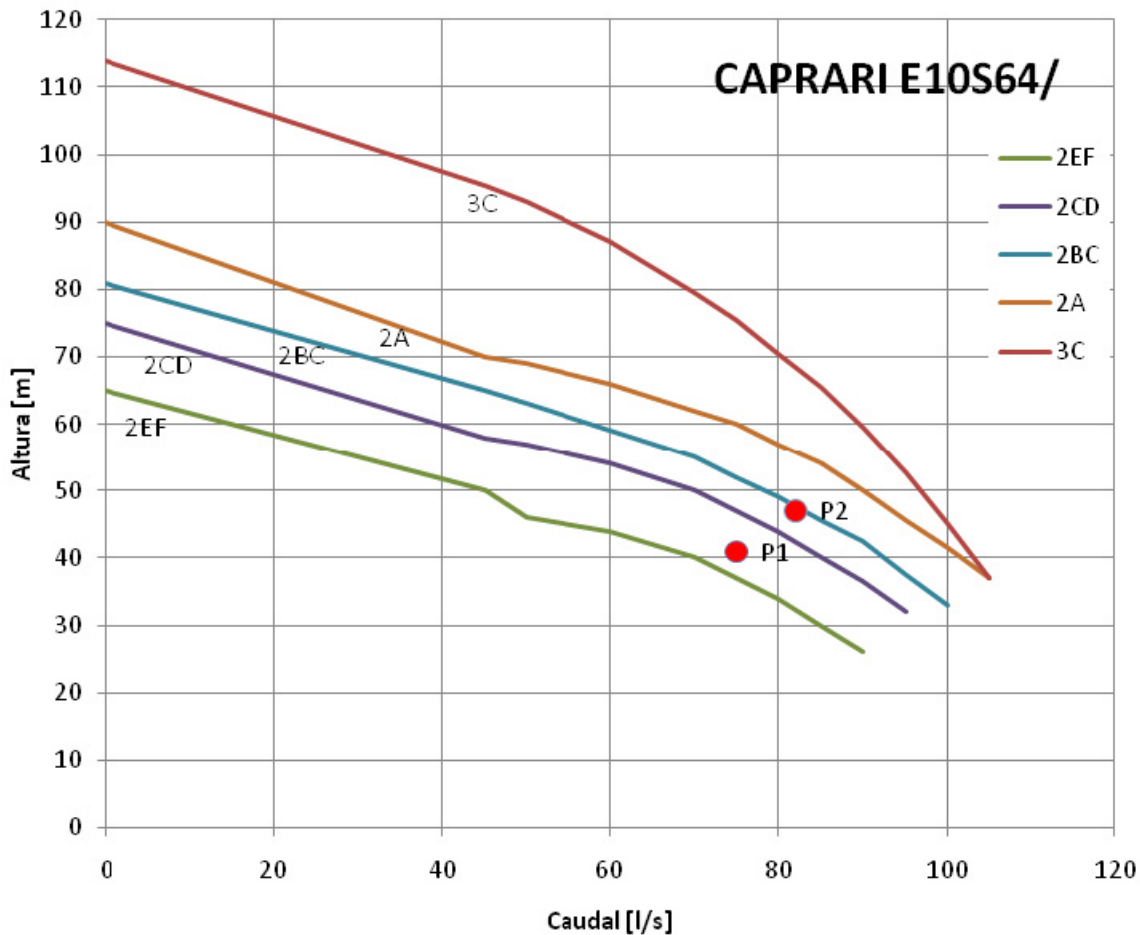


Figura 2.3: “Curvas características para bombas marca CAPRARI”

P1 no tiene una bomba cuya curva característica pase sobre él, por lo que la bomba a elegir es aquella que de una altura mayor para el mismo caudal, por lo que para este punto la bomba elegida es la E10S64/2CD. En cambio, para P2 la curva característica de la bomba E10S64/2BC pasa por sobre él, por lo que es adecuada para su operación.

Para la bomba seleccionada el fabricante entrega además de su curva característica los valores de funcionamiento del motor para potencia, rendimiento, factor de potencia, corriente nominal a carga plena y vacío, y corriente de arranque.

Teniendo estos datos, más el tiempo de funcionamiento de ellas, se tendrá el consumo de energía del sistema (Kw-h), dato principal para el dimensionamiento del generador eléctrico.

## 2.2 DIMENSIONAMIENTO GENERADOR EÓLICO

### 2.2.1 Principales componentes de un sistema eólico

Las turbinas de viento están compuestas por aspas, las que son movidas por la acción del viento haciendo girar un rotor. Este rotor está conectado a un generador el cual produce la electricidad.

Los generadores más empleados en este tipo de proyectos son los que emplean turbinas de eje horizontal de 3 o 2 aspas. La Figura 2.4 muestra los componentes típicos de uno de estos sistemas.

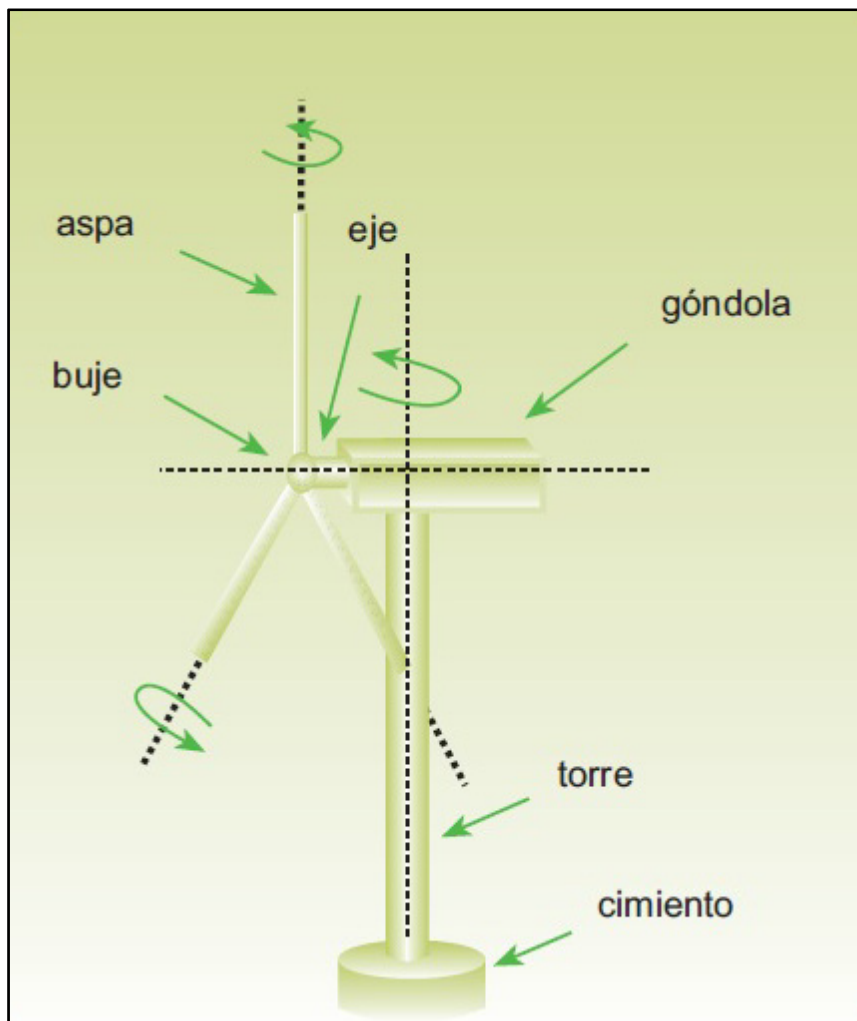


Figura 2.4: Esquema de un aerogenerador típico. (Fuente: CNE)

- **Góndola**

Soporta toda la maquinaria de la turbina, en su interior se encuentran todos los aparatos encargados de convertir la energía cinética producida por el viento, en energía eléctrica. Debe ser capaz de rotar para seguir la dirección del viento, por lo que se une a la torre mediante rodamientos.

- **Aspas**

Son las encargadas de aprovechar al máximo la fuerza del viento. Su constitución y forma deben ser adecuadas para que el rendimiento del aparato sea el mayor posible y deben situarse en posición transversal a la dirección del viento.

El perfil de las aspas es similar al de las alas de los aviones. Ellas realizan su función mediante el mismo principio de la fuerza de empuje, es decir, el viento pasa sobre la parte inferior del ala y genera una alta presión, mientras que por la parte superior se genera una baja presión. Esta fuerza, más la de resistencia, provoca que el rotor gire.

- **Buje o rotor**

Es el elemento que une las aspas con la góndola en la parte posterior de esta. Va unido al eje principal y es la pieza que gira gracias a la acción del viento.

- **Torre**

La torre se construye no solo para resistir el peso de la góndola y de los álabes del rotor, sino también debe absorber las cargas causadas por la variación de potencia del viento.

Las turbinas de viento pueden usar torres más livianas y más altas en comparación con los molinos de viento mecánicos convencionales. Estas torres pueden ser de dos tipos: torres atirantadas (enrejadas o con postes), y torres individuales auto estables que se mantienen erguidas por sí solas.

- **Cimiento**

Para garantizar la estabilidad de una turbina eólica se construyen los cimientos, que pueden ser superficiales o profundos. El tipo de cimentación depende de la consistencia del suelo donde se va a instalar la máquina.

## **2.2.2 Potencial Eólico**

La potencia disponible para un generador eólico está dada por la energía cinética de una masa de aire y el flujo de esta a través de la superficie barrida por las hélices de la turbina. Entonces, la potencia que es posible generar es función de la velocidad viento, densidad del aire, y el área barrida por las aspas.



La energía cinética ( $E_c$ ) para una masa de aire  $m$  y una velocidad  $v$ , se expresa como:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad [2.14]$$

Si se considera una densidad de aire constante  $\rho_a$  y un flujo a través de la hélice  $vA$ , con  $A$  el área barrida y  $v$  la velocidad del viento, se cumple que la potencia eólica disponible corresponde a:

$$P_d = \frac{1}{2}\rho_a v^2 vA = \frac{1}{2}\rho_a Av^3 \quad [2.15]$$

Donde:

$P_d$	:	Potencia disponible [Watts]
$\rho_a$	:	Densidad del aire [ $\text{kg}/\text{m}^3$ ]
$A$	:	Área barrida por la hélice [ $\text{m}^2$ ]
$v$	:	Velocidad media del viento [ $\text{m}^3/\text{s}$ ]

Una consideración importante es que, debido a la ley de conservación de la masa, no es posible aprovechar toda la energía disponible en el viento, lo que es conocido como la Ley de Betz. El máximo valor aprovechable de la energía cinética del viento es de aproximadamente un 59% (Betz, 1926).

Por otro lado, se tienen pérdidas de energía debido a los factores mecánicos de transmisión y a la eficiencia eléctrica del generador (Navas, 2009).

- **Variación de la velocidad del viento**

Una de las formas más utilizadas para representar la variabilidad del viento es a través de una distribución de Weibull, la cual permite representar este tipo de situaciones mediante el ajuste de sus factores de forma y escala. La distribución de Weibull se expresa de la siguiente forma:

$$P(v) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad [2.16]$$

Donde:

$P(v)$	:	Probabilidad de que el viento tenga una velocidad $v$
$c$	:	Factor de escala [m/s]
$k$	:	Factor de forma

Para calibrar  $c$  y  $k$  se utiliza una aproximación de mínimos cuadrados, empleando la siguiente forma para la distribución:

$$1 - P(v) = \exp\left[-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right] \quad [2.17]$$

Luego, la distribución anterior permite determinar la velocidad media cúbica de la siguiente forma:

$$\bar{v}^3 = c^3 \Gamma \left( 1 + \frac{3}{k} \right) \quad [2.18]$$

Donde  $\Gamma$  es la función Gamma,  $\bar{v}$  es la velocidad media,  $c$  y  $k$  son los mismos valores de la ecuación [2.16]

- **Perfil vertical de velocidad del viento**

La rugosidad de la superficie hace disminuir la velocidad del viento a baja altura. Así, la velocidad del viento suele aumentar con la altura.

Normalmente los datos de viento se obtienen a una altura estándar de 10 metros. Como en general los rotores de los aerogeneradores se ubican a alturas superiores, se hace necesario extrapolar los datos a la altura deseada.

Si se manejan registros de velocidad de viento correspondientes a dos alturas, es posible determinar la rugosidad local que explica la diferencia entre las velocidades mediante la relación:

$$r = A_1 \left( \frac{v_2}{v_2 - v_1} \right) \cdot A_2 \left( \frac{-v_1}{v_2 - v_1} \right) \quad [2.19]$$

Donde  $A_1$  es la altura 1,  $A_2$  es la altura 2,  $V_1$  es la velocidad del viento a la altura 1 y  $V_2$  es la velocidad del viento a la altura 2.

Con la rugosidad  $r$  determinada, es posible emplear un método simple para extrapolar la velocidad a otra altura. Asumiendo que la velocidad del viento varía logarítmicamente con la altura (de acuerdo a observaciones prácticas), se cumple la siguiente expresión:

$$V_1 = V_2 \frac{\ln(A_1/r)}{\ln(A_2/r)} \quad [2.20]$$

### 2.2.3 Dimensionamiento del sistema eólico

- **Potencia eólica unitaria**

Para realizar el dimensionamiento del rotor eólico, se necesita emplear la potencia por unidad de área que es posible generar, esto se logra con:

$$P = \frac{1}{2} \rho_a v^3 \quad [2.21]$$

Donde:

- $P$  : Potencia media por unidad de área [Watts/m<sup>2</sup>]
- $\rho_a$  : Densidad del aire [kg/m<sup>3</sup>]
- $v$  : Velocidad media del viento [m<sup>3</sup>/s]

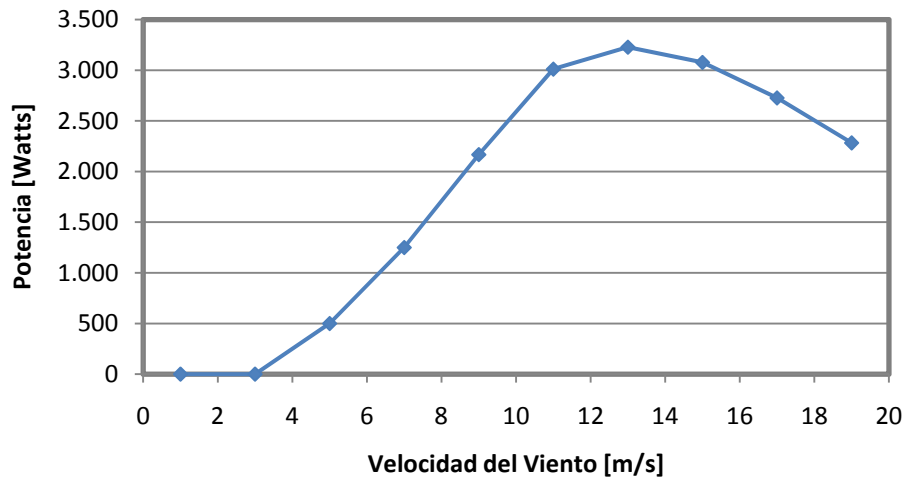
- **Selección de rotor eólico**

Cada rotor eólico posee una curva de potencia, dado por el fabricante, que varía según la velocidad del viento. Por lo tanto, para seleccionar el equipo es necesario conocer la distribución de viento durante el día, determinando así la cantidad de energía que puede generar éste en un día, y comprobar si se satisface la necesidad energética diaria del equipo de bombeo. Este procedimiento se ilustra a continuación:

Consideremos una distribución diaria de velocidad para un mes como la que se muestra en la Tabla 2.3, y la curva de potencia de una turbina Whisper 175, que se muestra en la Figura 2.5:

**Tabla 2.3: “Distribución diaria de velocidad del viento para un mes”**

Velocidad media [m/s]	N° de horas en el día [hr]
1	3,4
3	9,4
5	9,0
7	1,3
9	0,6
11	0,2
13	0
15	0
17	0
19	0



**Figura 2.5: “Curva de potencia para turbina Whisper 175”**

De los datos anteriores se puede ver que la energía generada diariamente por la turbina es la siguiente:

**Tabla 2.4: “Distribución diaria de velocidad del viento para un mes”**

Velocidad media [m/s]	N° de horas en el día [hr]	Potencia [Watts]	Energía [Whr]
1	3,4	0	0
3	9,4	0	0
5	9,0	500	4.500,0
7	1,3	1.250	1.673,4
9	0,6	2.167	1.398,1
11	0,2	3.011	631,3
13	0	3.228	0
15	0	3.077	0
17	0	2.727	0
19	0	2.283	0
<b>Total</b>			<b>8.202,8</b>

Entonces, dependiendo de la energía diaria que requiera el sistema de bombeo, se determina si esta turbina es aceptable o no.

- **Banco de Baterías**

Disponer de un banco de baterías permite utilizar la energía entregada por los generadores en un momento posterior al cual se genera.

Los bancos constan de baterías conectadas en serie y en paralelo, determinándose la cantidad de la siguiente forma:

*Baterías en serie*

El banco de baterías debe ser capaz de recibir la tensión a la cual los generadores entregan la potencia. Al conectar las baterías en serie, la tensión de estas se suman, pudiendo así, llegar a la tensión de los generadores. Luego, el número de baterías en serie ( $NB_s$ ) está dado por:

$$NB_s = \frac{V_{ns}}{V_{nb}} \quad [2.22]$$

Donde:

$NB_s$  : Cantidad de baterías en serie  
 $V_{ns}$  : Tensión nominal del sistema [V]  
 $V_{nb}$  : Tensión nominal de la batería [V]

*Baterías en Paralelo*

La cantidad de baterías en paralelo depende de la capacidad de energía que se quiera almacenar. Al ser conectadas de esta forma, la capacidad de ellas se suma. Así, la cantidad de batería en paralelo es:

$$NB_p = \frac{C_T}{C_b} \quad [2.23]$$

Donde:

- $NB_p$  : Cantidad de baterías en paralelo  
 $C_T$  : Energía total a almacenar [Kwh]  
 $C_b$  : Capacidad de la batería escogida [Kwh]

## 2.3 ADAPTACIÓN Y CONTROL

Dependiendo de la configuración empleada en el proyecto, se requerirán distintos elementos que permitan adaptar, manejar y almacenar la energía generada. Generalmente se emplean dispositivos básicos de electrónica de potencia, así como elementos de control y baterías.

Los dispositivos más usados se describen a continuación.

- **Regulador de Carga**

Cuando se emplean baterías un componente esencial del sistema es un regulador de carga, ya que permite proteger al banco de baterías de descargas excesivas provocadas por la bomba y de sobrecargas provocadas por el generador eléctrico. Es decir, cuando se alcanza una tensión donde se considera que la batería está cargada, el regulador interrumpe el proceso de carga. Así mismo, cuando el consumo hace que la batería comience a descargarse y por lo tanto a bajar su tensión, el regulador reconecta el generador a la batería y vuelve a comenzar el ciclo.

- **Inversor**

La función de un inversor es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua (DC) a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna (AC), con la magnitud y frecuencia deseada por el usuario o el diseñador.

Los generadores eólicos producen corriente continua (DC), pero típicamente las bombas empleadas en riego son de corriente alterna (AC), por lo que es necesario convertir la señal generada.

- **Banco de Baterías**

Las baterías son empleadas para dar autonomía al sistema en días de bajo potencial eólico, y mantener corriente y voltaje casi constantes en las bombas hidráulicas mejorando notablemente la eficiencia de funcionamiento.

Una batería puede ser recargada eléctricamente después de su descarga hasta alcanzar su condición inicial. Esto se logra conectándola a un sistema de carga que genera una corriente eléctrica en dirección opuesta a la descarga. En general, sus características más importantes son:

- Buen comportamiento a bajas temperaturas
- Alta densidad de potencia
- Buena aptitud para descargas de alta intensidad

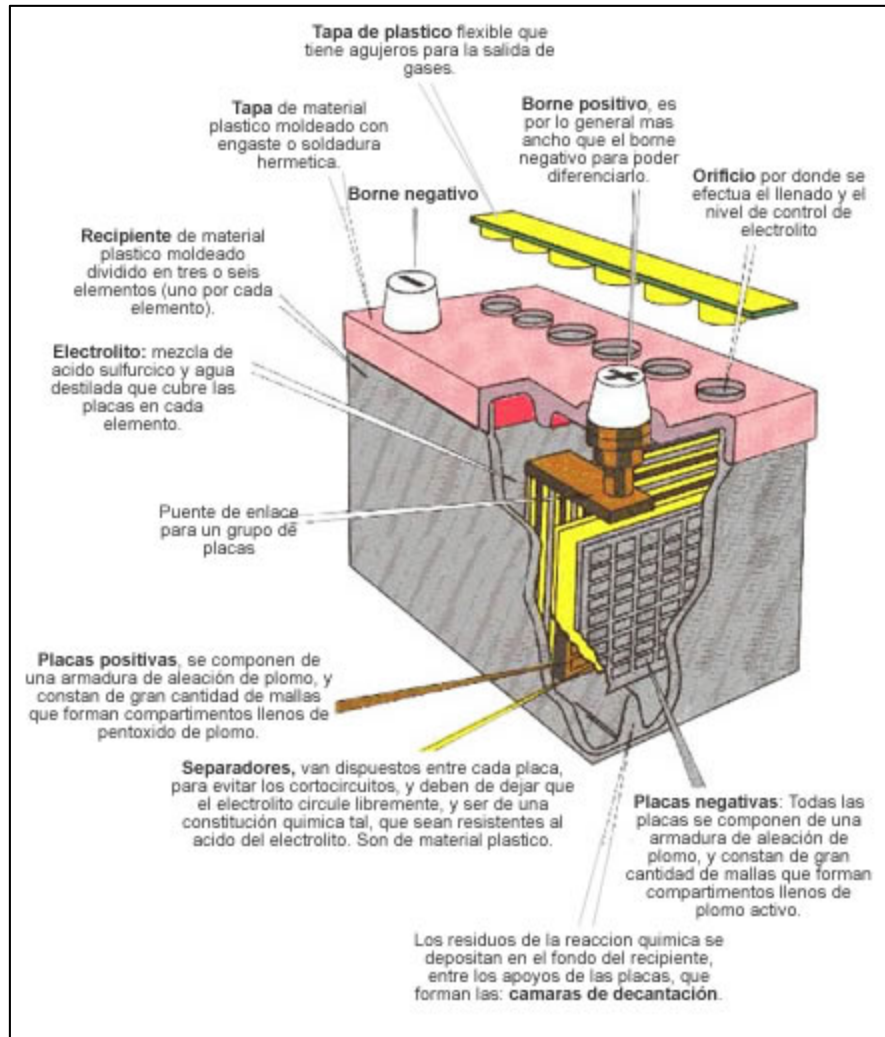


Figura 2.6: “Esquema típico de una batería”

En aplicaciones con generadores basados en energías renovables, las baterías más usadas son las de plomo – ácido de 6 o 12 volts (Ver Figura 2.6). Estos acumuladores se conectan en combinaciones serie y/o paralelo para producir los sistemas de 12, 24 o 48 volt con los que se desea trabajar.

La batería debe ser de ciclo profundo, es decir, que permita una descarga de hasta el 80%, porque lo que se busca es que se pueda entregar su carga por largos periodos de tiempo.

En general, la vida útil de un sistema de acumuladores depende de cuán frecuentemente sea sometido a descargas profundas y a que tan bien mantenido se encuentra. Un acumulador típico soporta de 750 a 1000 ciclos de descargas profundas antes de requerir un reemplazo. Por otro lado, si los niveles de ácido en el acumulador no se mantienen periódicamente mediante la adición de agua destilada, se puede esperar una importante disminución en su vida útil (Navas, 2009).

Cabe destacar que si se busca dar una gran autonomía al sistema, es decir almacenar gran cantidad de energía, el diseño del banco debe ser acucioso ya que puede representar una componente significativa en los costos.

- **MPPT**

Un dispositivo MPPT (del inglés, “Maximum Power Point Tracker”) se utiliza para operar un dispositivo generador en un punto donde la potencia de salida de éste sea máxima.

Por ejemplo, consideremos la Curva I-V, para un módulo fotovoltaico, mostrada en la Figura 2.7.

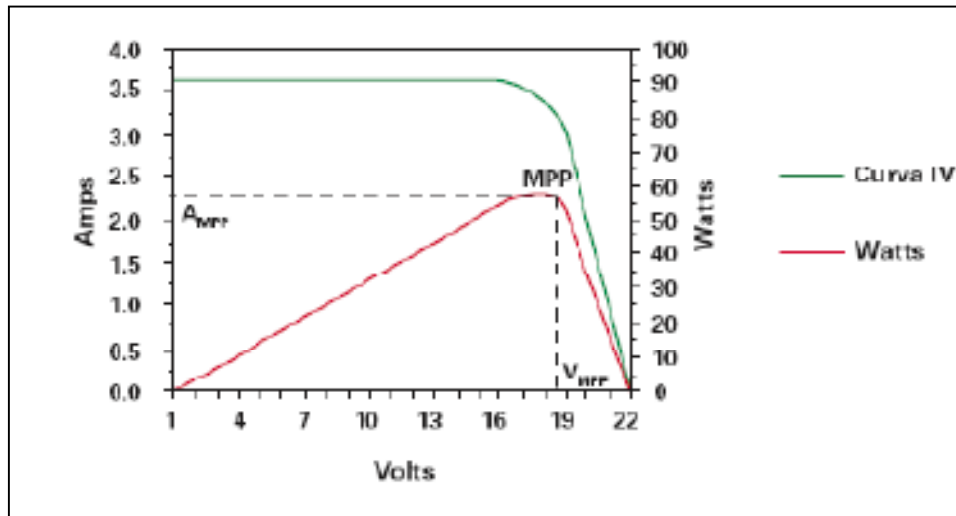


Figura 2.7: “Curva IV y potencia de salida típicas de un módulo fotovoltaico”

La línea superior muestra la relación corriente-voltaje típica de un panel fotovoltaico, para un nivel de luz y temperatura dadas. Se puede ver que la corriente de salida es constante antes de llegar a voltajes de salida altos, en este caso alrededor de 16 [V], valor para el cual la corriente cae rápidamente. Este comportamiento es característico de todos los módulos fotovoltaicos en general, aunque cada módulo tendrá su propia característica IV.

También sucede que para la mayoría de los paneles fotovoltaicos de 12 [V], la potencia de salida máxima que es posible obtener ocurre con un voltaje cercano a los 18 [V] (ver Figura 2.7). El valor de voltaje asociado a la máxima potencia de salida del panel se conoce como punto de máxima potencia o “MPP” por sus siglas en inglés. Entonces para operar de un modo óptimo, este panel, debiera funcionar a un voltaje de salida de 18 [V].

Sin embargo, cuando el panel es usado para cargar acumuladores de 12 [V], esta batería fija el voltaje de operación del panel cerca de su propio voltaje nominal (12 [V]). Funcionando de este modo, el panel fotovoltaico produce una cantidad de potencia significativamente menor que si estuviese operando en su MPP. Sin duda que se puede aumentar la capacidad de carga de la batería por parte del panel si continuara funcionando a un voltaje de 18[V], mientras de todos modos carga la batería a 12[V]. Los inversores que operan sin baterías de por medio tienen un sistema MPPT incluido.

### **3 DEFINICIÓN DEL SISTEMA DE RIEGO Y DISEÑO PLATAFORMA COMPUTACIONAL**

---

#### **3.1 CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA A EVALUAR**

Un sistema de riego tecnificado está compuesto, hidráulicamente, por 3 partes esenciales: Captación, acumulación y distribución de agua. Estos componentes pueden tener diferentes configuraciones dependiendo del lugar, la disponibilidad de agua y la forma de presurizar el equipo de riego.

Por ejemplo si se tiene una captación subterránea, un equipo de riego que permite tener baja altura manométrica para la demanda, y el volumen de agua diario no es muy grande, se podría tener una bomba de impulsión desde la napa a un estanque elevado desde el cual se presuriza la distribución de agua y el equipo de riego. Es decir un esquema del tipo: Captación → bomba → estanque elevado → equipo de riego.

Otra forma, para el mismo caso, es que el estanque esté a nivel del suelo y con otra bomba se presurice la distribución y el equipo de riego; obteniendo un esquema del tipo: Captación → bomba → estanque superficial → bomba → equipo de riego.

En cambio, si la disponibilidad de agua subterránea es suficiente, no se necesitaría un estanque de acumulación, presurizando el sistema de riego directamente desde la napa.

Si la captación fuera superficial, ya no se utilizaría la bomba de captación siendo necesaria sólo la bomba para dar la presión requerida; esto implicaría una configuración: Estanque superficial → bomba → equipo de riego

Todas estas configuraciones determinan en el costo monetario y energético del sistema, es decir, en la inversión inicial y costo operacional, y en la cantidad de energía eléctrica necesaria para hacer funcionar el sistema, respectivamente.

Como el abastecimiento eléctrico será mediante turbinas eólicas, la variación temporal de la energía generada influye al momento de adoptar un sistema de riego. En la operación de las bombas, la potencia diaria demandada por ellas varía mensualmente, pero es constante dentro del día. La energía se consume de forma discreta por la bomba que va hacia el estanque (en caso de existir) y de forma continua por la que presuriza los equipos de riego (dentro de las horas de riego).

Es necesario disponer de sistemas eléctricos que permitan a las bombas aprovechar la mayor cantidad de la energía generada por los aerogeneradores. Dos fueron los sistemas de generación analizados para este trabajo, uno con baterías y otro sin ellas. Las características de estos esquemas se dan a continuación.



### 3.1.1 Esquema sin baterías

En un principio se consideró un sistema de generación eléctrico donde la potencia se entrega de forma directa a la(s) bomba(s), es decir, sin el empleo de baterías (ver Figura 3.1). Este esquema implica que el consumo de energía debe ser instantáneo, por lo que si se genera mayor potencia de la que se necesita esta se pierde. En caso contrario, si se genera menor potencia de la necesaria, las bombas no funcionan y la energía se vuelve a perder.

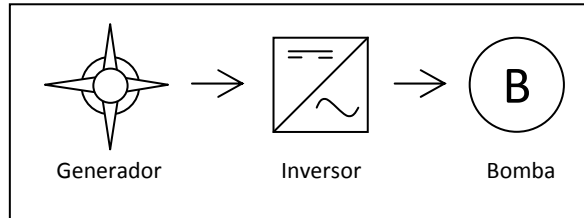


Figura 3.1: “Configuración de generación. Esquema sin baterías”

En el caso de tener un sistema de riego que contemple una bomba de captación y estanque de acumulación, es necesario minimizar la potencia de consumo en la operación de las bombas, lo que se logra teniendo un volumen para el estanque lo suficientemente grande que permita acumular toda el agua que entregue la bomba de captación cada vez que esta tenga potencia suficiente para operar. De esta forma, cuando se esté dentro de las horas de riego, se puede priorizar el uso de la bomba de riego y sólo hacer funcionar la de captación cuando haya potencia suficiente para abastecerlas a ambas, o cuando no haya potencia para la de riego y sólo haya para la de captación.

La Figura 3.2 ilustra las curvas típicas de generación y consumo para el sistema antes descrito, considerando que las horas de riego son entre las 8:00 y 22:00 hrs. En él se puede apreciar que el área color naranja es la energía consumida, las áreas achuradas rojas son la energía que falta para poder hacer funcionar la(s) bomba(s), en tanto las áreas amarillas corresponden a la energía perdida por los siguientes motivos:

- La potencia de consumo es menor a la potencia generada.
- La potencia generada es menor a la necesaria para operar las bombas, por lo que la energía en estos intervalos, también se pierde.

Es claro que este esquema no hace eficiente el uso de la energía, impidiendo que, en algunos días, se entregue toda el agua que demanda el cultivo para su crecimiento. Esto se hace crítico si se mantiene la situación durante 10 o más días consecutivos.

Por este motivo se consideró también un esquema con un banco de baterías, lo que permitiría un uso más eficiente de la energía.

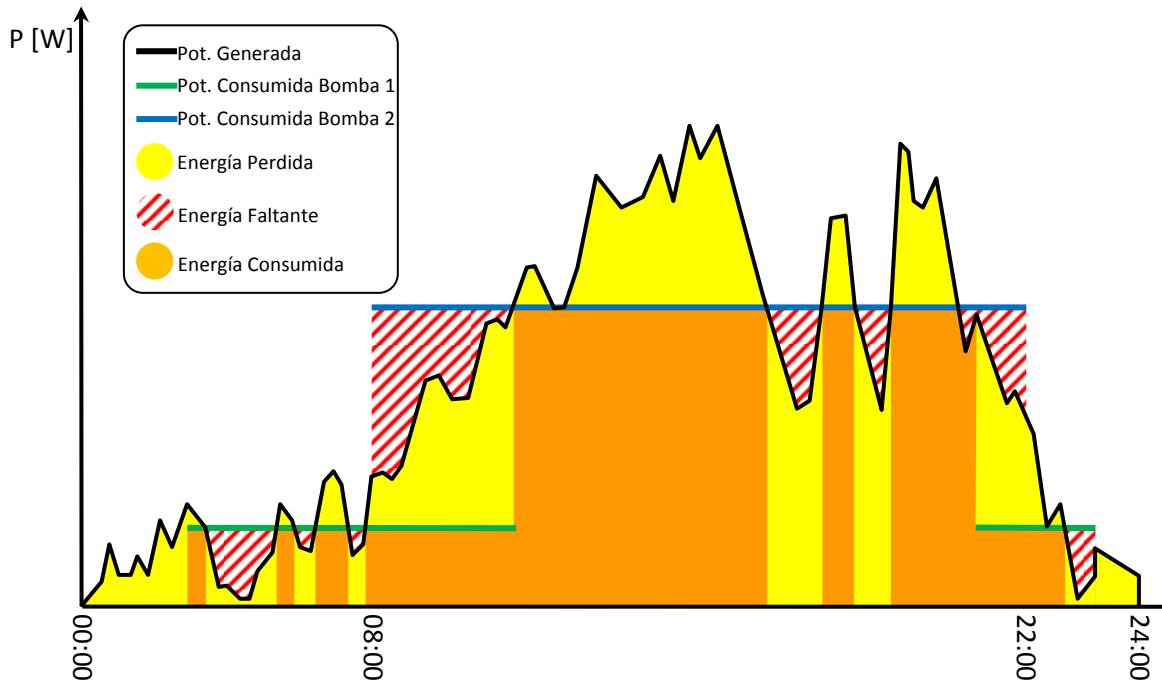


Figura 3.2: “Curva de generación y consumo de energía para un sistema de riego con bomba de captación y estanque de acumulación”

### 3.1.2 Esquema con baterías

Un esquema con baterías permite utilizar la energía generada en algún momento posterior al cual se produjo. Eléctricamente, esto implica una menor eficiencia en la entrega de potencia ya que son más los elementos de control necesarios en la configuración. En particular, se necesita agregar un regulador de carga que proteja las baterías de sobrecargas ó descargas excesivas. La Figura 3.3 muestra un esquema típico de generación con baterías.

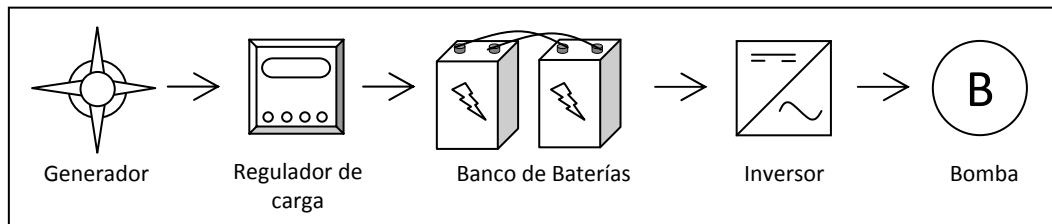


Figura 3.3: “Configuración de generación. Esquema con baterías”

Las baterías se emplean para almacenar la energía excedente cuando la potencia de consumo sea menor a la generada, y así poder completar los momentos cuando es mayor. Las flechas de la Figura 3.4 esquematiza esta situación.

La capacidad del banco implicará poder guardar más o menos cantidad de la energía excedente, lo que influirá en la seguridad energética para días posteriores, ya que en días donde la generación es suficiente, toda la energía excedente se almacena.

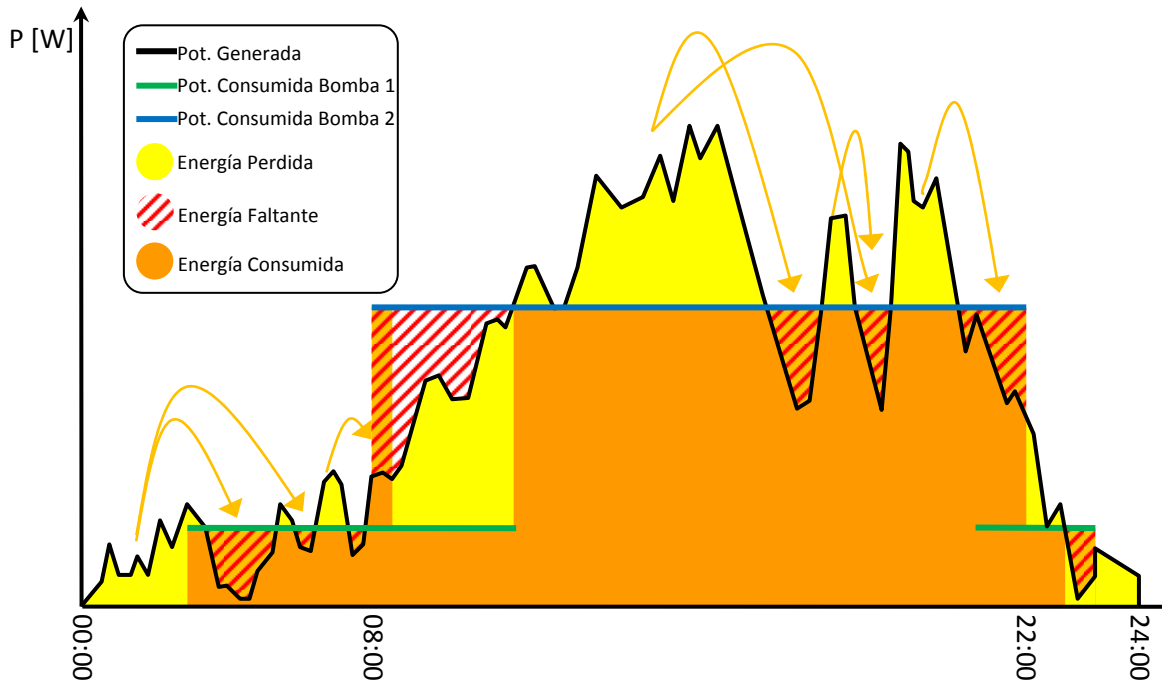


Figura 3.4: “Curva de generación y consumo de energía para un esquema con baterías y un sistema de riego con bomba de captación y estanque de acumulación”

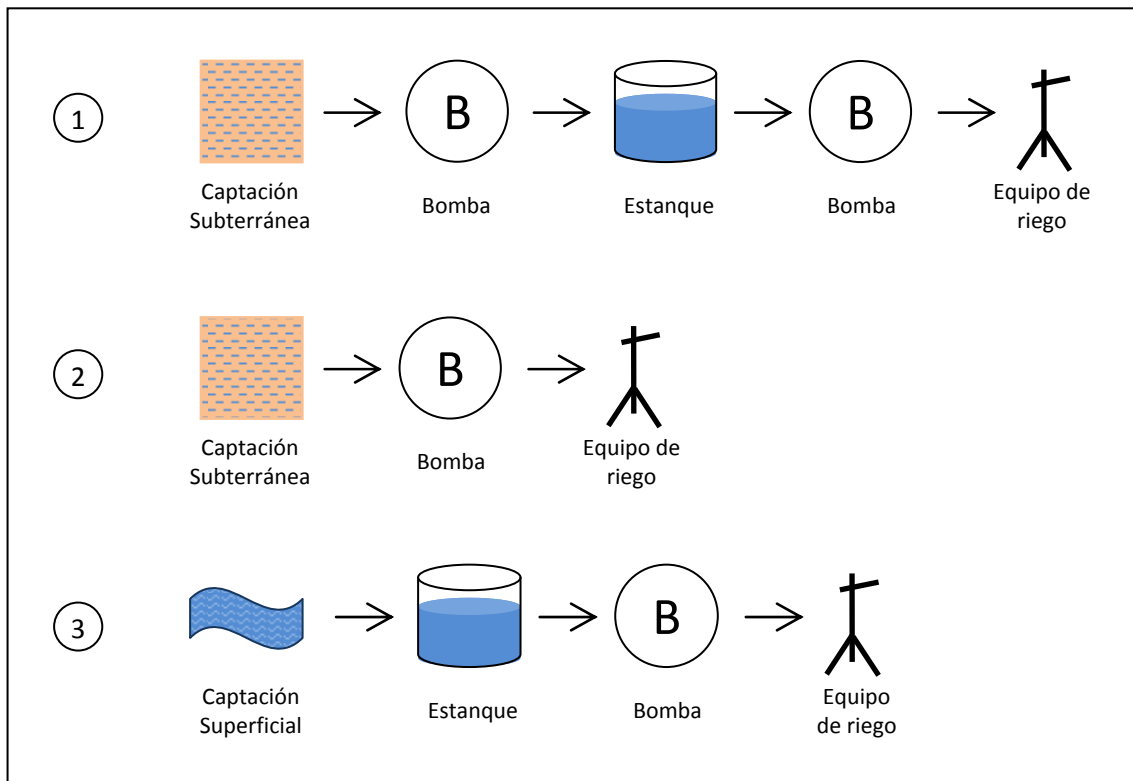
Otro factor importante al utilizar baterías es que, como la energía se aprovecha de forma más eficiente, ya no es necesario contar siempre con un estanque de acumulación para captar la mayor cantidad de agua posible, como en el caso sin baterías, sino que, basta con uno de tamaño tal que acumule, fuera de las horas de riego, el volumen de agua que falta cuando el caudal disponible es menor que el caudal necesario para el riego. Esto implica reducir de gran forma los costos de construcción que sobrepasan de gran forma al costo de inversión en baterías.

Ya analizados los sistemas energéticos, es posible definir el esquema de riego a utilizar. Este trabajo profundizará en el esquema con baterías, por lo que se explicará el funcionamiento de la plataforma computacional diseñada para este caso.

Los sistemas de riego que serán posibles evaluar se detallan a continuación.

### 3.1.3 Sistemas de Riego

Considerando la disponibilidad del recurso hídrico y un esquema energético con baterías, los sistemas de riego que se pueden evaluar son los mostrados en la Figura 3.5. Estos sistemas son típicamente utilizados en la agricultura.



**Figura 3.5: “Sistemas de riego a evaluar en la plataforma computacional”**

Independiente de cuál sea la configuración adoptada, para este trabajo se tienen consideraciones transversales a todas las configuraciones que corresponden a:

- Existe disponibilidad absoluta del recurso hídrico en la fuente, es decir, nunca faltará agua para regar.
- Las bombas empleadas funcionan en un único punto de operación (no tienen variador de frecuencia) y utilizan corriente alterna.
- El caudal de riego tendrá una variación mensual y el dimensionamiento de las bombas será para el máximo caudal.

Existen otros elementos relevantes a considerar dentro del sistema de riego, que permiten operar las bombas de forma correcta, no haciéndolas trabajar en exceso y evitando rebases del estanque, en caso que éste exista. Estos elementos son:

- Programador electrónico de riego: Dispositivo en el cual se ingresan la hora de partida y término del riego, caudal requerido, sectores a regar y la mayoría de los parámetros automatizados del sistema de riego.
- Sensor de nivel de agua: Son dispositivos que se instalan en el estanque para definir un nivel máximo y mínimo de agua, para el cual las bombas se detienen o parten, respectivamente. Este dispositivo puede ser electrónico, como un sensor ultrasónico, ó mecánico, mediante una válvula de flotador.

## 3.2 PLATAFORMA COMPUTACIONAL

Con el fin de poder evaluar la prefactibilidad de implementar generadores eólicos en un sistema de riego tecnificado, se ha confeccionado una plataforma computacional que, a través de una interfaz sencilla, permite obtener alternativas técnica y económicamente viables dentro de un conjunto de éstos. La plataforma considera los sistemas de riego y eléctricos descritos en el acápite anterior.

Dado que dentro de los objetivos de este trabajo, se pretende que la plataforma computacional pueda ser usada por la mayor cantidad de interesados en esta materia, como consultores relacionados con el riego, agricultores, revisores, etc. se ha programado un código mediante Visual Basic operable a través de Microsoft Excel.

Es importante señalar que esta herramienta es una extensión de la confeccionada por Navas (2009). En el acápite 3.5 se señalan las mejoras y extensiones.

A la plataforma se ingresan variables hidráulicas y meteorológicas como el caudal disponible, caudal demandado, altura manométrica requerida y registros de viento, entregando como resultados el tipo de generador y la cantidad de éstos necesarios para el proyecto, la inversión total y valores de indicadores económicos que dependerán de la superficie y el cultivo a plantar en ella.

A continuación se darán a conocer las características de la herramienta y se explicará cuales son las variables de entrada, los algoritmos realizados y las variables de salida. En lo sucesivo, el texto, se referirá a la plataforma computacional indistintamente como software o herramienta.

### 3.2.1 Características

El software se puede dividir en dos partes fundamentales.

La primera, consiste en la simulación del sistema de riego, con las condiciones establecidas por el usuario, para alguna de las configuraciones descritas en la Figura 3.5, es decir, para cada intervalo de tiempo, según la cantidad de datos meteorológicos que se tenga, determina cuánta es la potencia generada con un determinado rotor eólico, para luego comprobar si dicha potencia es menor o mayor a la requerida por la operación de las bombas en dicho instante, con lo que se sabe si es necesario ocupar energía del banco de baterías o si se puede almacenar en ellas, respectivamente. En adelante, esta parte será nombrada como “Simulación”.

La operación de las bombas posee ecuaciones de continuidad cuya discretización temporal es tan pequeña como el intervalo de tiempo de la serie de viento que el usuario ingrese al programa. Ahora bien, el límite del balance de energía y volumen es de un día que parte a las 0:00 hrs. y termina a las 23:59 hrs.

La segunda parte de la plataforma, utiliza las variables de salida de la primera parte para realizar un flujo de caja, que involucra el proyecto completo (inversión en equipos, ganancia del cultivo, mantención, etc.), para entregar los indicadores económicos VAN y TIR con los que se puede tener una

recomendación sobre la factibilidad del proyecto. En adelante, esta parte será nombrada como “Evaluación Económica”.

La herramienta consta de una entrada de datos para las dos partes descritas, la cual es ingresada por el usuario y dependerá de las características del proyecto que quiera evaluar. Hay que señalar que la plataforma no diseña el proyecto agrícola, sólo evalúa la alternativa energética del viento, por lo que, antes de ingresar los datos, el usuario debe tener su proyecto diseñado y dimensionado.

Además, para su funcionamiento, el software cuenta con una base de datos interna, tanto para la simulación como para la evaluación económica.

Conceptualmente el programa tiene la siguiente estructura:

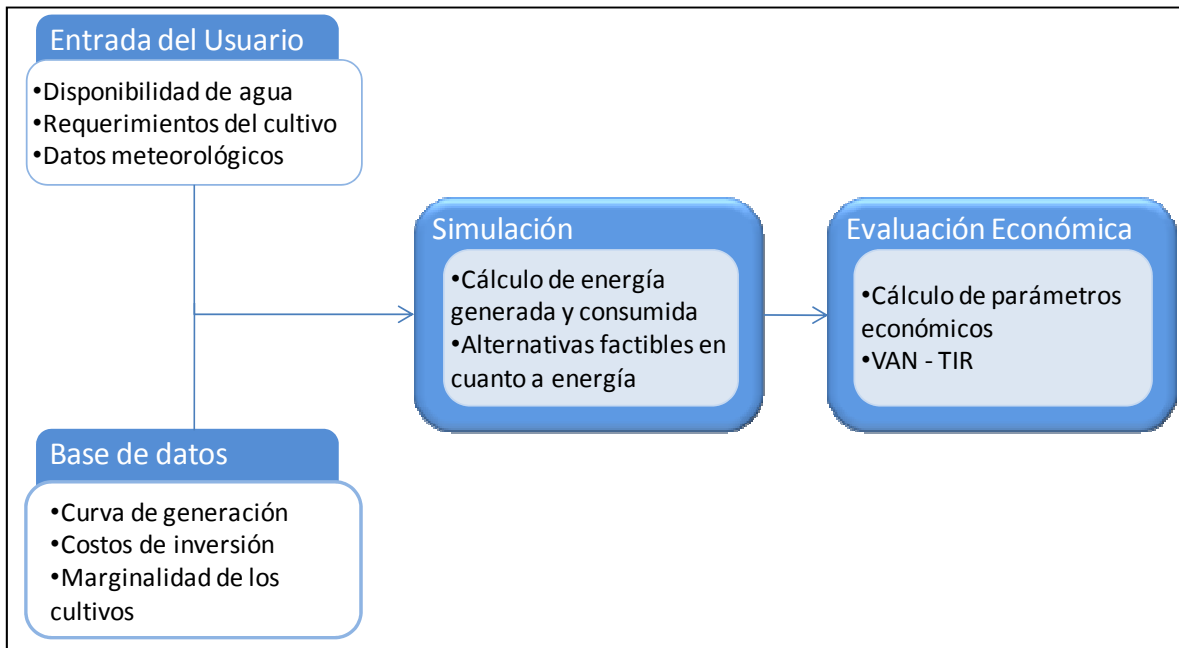


Figura 3.6: “Estructura conceptual de la plataforma computacional”

Las 2 partes mencionadas poseen algoritmos independientes entre sí, por lo que, sólo cuando termina la Simulación, se puede ejecutar la Evaluación Económica. Esto implica la existencia de una interacción con el usuario entre un paso y otro, el que debe escoger 3 de los resultados de la simulación para evaluarlos económicamente.

En las páginas siguientes se explicará, por separado, cada una de las partes; profundizando las operaciones que realiza la plataforma para hacer la simulación y evaluación económica, y no en el funcionamiento del software (es decir, no es un tutorial).

### 3.3 SIMULACIÓN

La simulación es la parte del software encargada de hacer el análisis de factibilidad energética. Toma los datos de viento disponibles y, para cada uno de ellos, de forma consecutiva, determina la

cantidad de potencia generada para dicha velocidad con el rotor eólico para el cual se esté haciendo la simulación.

Una vez determinada la potencia generada, determina si esta es suficiente para la operación de las bombas, que representa la demanda de energía, en el mismo instante, con lo que se puede saber si las bombas funcionarán, si es necesario consumir energía de las baterías o si se puede almacenar energía en ellas.

### **3.3.1 Variables de entrada**

La entrada de datos define los aspectos fundamentales del proyecto agrícola que se quiere evaluar, la velocidad del viento en la zona y las opciones del software. Estos son:

1. La demanda de agua del cultivo, el tipo de captación y disponibilidad de agua, el tamaño del estanque, seguridad de riego y horas de riego.
2. La cantidad y la presentación de los datos meteorológicos de la zona del proyecto.
3. Tamaño de las baterías y eficiencia de los elementos de control de potencia.
4. Las opciones específicas para el funcionamiento del software: detalle diario de salida, cantidad máxima de días de falla (total y continuos).

Todas estas variables son ingresadas en la hoja “Entrada” de la plataforma, la cual está dividida en secciones según lo que se esté definiendo. La hoja tiene la forma de la Figura 3.7.

Las variables que la herramienta toma de cada sección de esta hoja y la implicancia de éstas, se detallan a continuación:

#### **a) Bomba de captación**

El caudal y la altura manométrica definen la disponibilidad de agua del sistema y la energía necesaria para poder llevar esta agua hacia el estanque de acumulación, respectivamente.

La eficiencia en tanto, es característica de la bomba seleccionada (dato del fabricante) y será utilizada para calcular la potencia requerida por ésta.

El valor comercial de la bomba también se ingresa en esta sección.

Los parámetros de esta sección sólo son ingresados en caso de tener una captación subterránea, en caso contrario, se definen con un valor igual a 0 (cero).

#### **b) Estanque de acumulación**

El volumen del estanque se asigna dependiendo de la cantidad de agua que se requiera suplir cuando el caudal de captación es menor al de riego.

Se puede asignar también, un volumen inicial de agua en el estanque con el que se cuenta para el primer intervalo de la simulación.

Las variables del estanque tienen una relevancia significativa en la definición del sistema de riego a evaluar, ya que con ellas, y las de la bomba de captación, se especifican las opciones de la Figura 3.5. Estas variables las ingresa el usuario y se especifican de la siguiente forma:

- Sistema 1: En este caso existe la necesidad de un estanque de acumulación por lo que los parámetros se ingresan según el proyecto.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	<b>Bomba de Captación</b>			OK	<b>Demanda de Riego</b>							
2	Caudal	3,5	[m <sup>3</sup> /hr]		Caudal	[m <sup>3</sup> /dia]	[m <sup>3</sup> /hr]	[l/s]				
3	Altura Manométrica	15	[m]		Jun	5	0,36	0,10				
4	Eficiencia	80	[%]		Jul	5	0,36	0,10				
5	Valor	\$ 800.000	[\$]		Agosto	6	0,43	0,12				
6												
7	<b>Estanque de Acumulación</b>											
8	Volumen	60	[m <sup>3</sup> ]	Sep	10	0,71	0,20					
9	Volumen Inicial	10	[m <sup>3</sup> ]	Oct	10	0,71	0,20					
10				Nov	20	1,43	0,40					
11	Vol. Mínimo Necesario	11,00	[m <sup>3</sup> ]	Dic	55	3,93	1,09					
12				Ene	60	4,29	1,19					
13				Feb	60	4,29	1,19					
14	<b>Datos de Viento</b>			Mar	10	0,71	0,20					
15	Columna Velocidad 1	3	[Numero]	Abr	7	0,50	0,14					
16	Altura de Medición 1	20	[m]	May	5	0,36	0,10					
17	Columna Velocidad 2	7	[Numero]									
18	Altura de Medición 2	10	[m]									
19	Intervalo de Datos	10	[min]									
20	Inicio Simulación	22-12-2006	0:00									
21	Término Simulación	06-11-2007	23:50									
22												
23												
24	<b>Aerogeneradores y Alturas [m] a Considerar</b>											
25		Altura 1	Altura 2	Altura 3								
26	<input type="checkbox"/> Kestrel 800	15,2										
27	<input type="checkbox"/> Whisper 100	15,2	19,8	24,4								
28	<input type="checkbox"/> BWCXL1	18,3	24,4	30,5								
29	<input type="checkbox"/> Whisper 200	15,2	19,8	24,4								
30	<input type="checkbox"/> Kestrel 1000	15,2										
31	<input type="checkbox"/> SkyStream 3.7	10,1	13,7	18,3								
32	<input type="checkbox"/> Kestrel 3000	15,2										
33	<input checked="" type="checkbox"/> Whisper 500	15,2	19,8	24,4								
34	Tensión del sistema		24	[V]								
35	Eficiencia Reg. De Carga		70	[%]								
36	Eficiencia Inversor		95	[%]								
37												
38	<b>Baterías</b>											
39	Capacidad		100	[Ah]								
40	Voltaje		12	[Volt]								
41	Profundidad de Descarga		80	[%]								
42												
								<b>Altura Manométrica</b>				
								30 [m]				
								<b>Seguridad de Riego</b>				
								100 [%]				
								<b>Tiempo de Riego</b>				
								14 [hr]				
								<b>Hora inicio de riego</b>				
								8:00 [hh:mm]				
								<b>Opciones Simulación</b>				
								Máx. días sin agua				
								400				
								Máx. días continuos sin agua				
								400				
								<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar Detalle Energético				
								<input checked="" type="checkbox"/> Mostrar Detalle del Estanque				
								<input type="checkbox"/> Simular fuera del periodo de Riego				
								SIMULAR				
								<b>Detalle Diario</b>				
								<input checked="" type="checkbox"/> Volumen del Estanque				
								<input checked="" type="checkbox"/> Volumen Regado				
								<input type="checkbox"/> Energía Generada				
								<input checked="" type="checkbox"/> Energía Consumida				

Figura 3.7: “Interfaz de entrada de datos. Hoja: Datos”

- Sistema 2: Cuando el caudal disponible es mayor al de riego, no es necesario un estanque, requiriendo sólo una bomba desde la napa hasta el equipo de riego. En esta situación, se debe asignar un volumen muy grande al estanque de acumulación y considerarlo completamente lleno al inicio de la simulación, para asimilarlo a un acuífero infinito, y definir valores igual a 0 en la sección de la bomba de captación.



- Sistema 3: Se define de la misma forma que el sistema 2. Esto porque como se asume que siempre habrá disponibilidad de agua, podemos obviar el llenado y vaciado del estanque considerando que este tiene un volumen muy grande y se encuentra completamente lleno al inicio de la simulación. La salvedad en este caso es que, en la Evaluación Económica, se debe considerar el costo de construcción del estanque real del proyecto.

### **c) Demanda de riego**

En esta sección se ingresan todos los parámetros relacionados con el riego, que son propios de cada proyecto agrícola a evaluar.

El caudal demandando por el cultivo tiene una variación mensual, dependiente de la evapotranspiración, dentro de la temporada de riego. Por tal motivo, se ingresa el valor a nivel mensual para poder tener una estimación real de la potencia utilizada por la bomba en cada mes.

Cabe señalar que la bomba para riego se dimensiona para la máxima demanda y sus características se ingresan en la hoja llamada “BaseBomba” (ver Figura 3.8). Es necesario contar con la curva característica (Q-H), la curva de eficiencia y/o la curva de potencia de la bomba. Si el fabricante entrega la curva de potencia puede ingresarse directamente, si no se tendrá que calcular a través de la Fórmula [2.1].

Es importante contar con un detalle de puntos de 0,1 [m<sup>3</sup>/hr] en la curva de potencia, para que el simulador tome el valor más cercano de la potencia asociada al caudal. Para esto, la plataforma cuenta con una herramienta que posee una spline cúbica para hacer las interpolaciones. De forma más simplificada, podrían ingresarse sólo las potencias asociadas a los caudales de cada mes.

La altura manométrica, al igual que en la sección de “bombas de captación”, corresponde a la energía requerida para distribuir el agua y dar presión a los equipos de riego. Si bien es cierto, hay una parte de esta energía que depende del caudal (altura de velocidad y pérdidas friccionales), la variación mensual que implican estas componentes se puede despreciar dado que la mayor cantidad es debido a la altura de impulsión y la presión mínima de funcionamiento de los equipos.

La seguridad de riego define el porcentaje de agua diario mínimo que debe haberse entregado al final del día al cultivo para que éste no sufra problemas de crecimiento o marchitez. Si no se puede entregar este volumen de agua el día se considera como fallado.

El tiempo de riego es la cantidad de horas durante la cual se riega en el día, y la hora de inicio es la hora a la cual parte este tiempo.

### **d) Datos de viento**

En esta sección se especifica la forma en la cual se ingresaron los datos de viento dentro de la plataforma. Los registros se ingresan en la hoja “Viento” (ver Figura 3.9), y son leídos por el programa según lo especificado en la sección que se está explicando.

Se debe indicar el intervalo de tiempo de los datos con los que se cuenta (10 min, 30 min, etc.) y la(s) altura(s) de medición de la estación meteorológica.

Como sólo es necesario hacer la evaluación en la temporada de riego, el inicio y término de simulación acotan el rango de fecha y hora en el cual se ejecutará ésta.

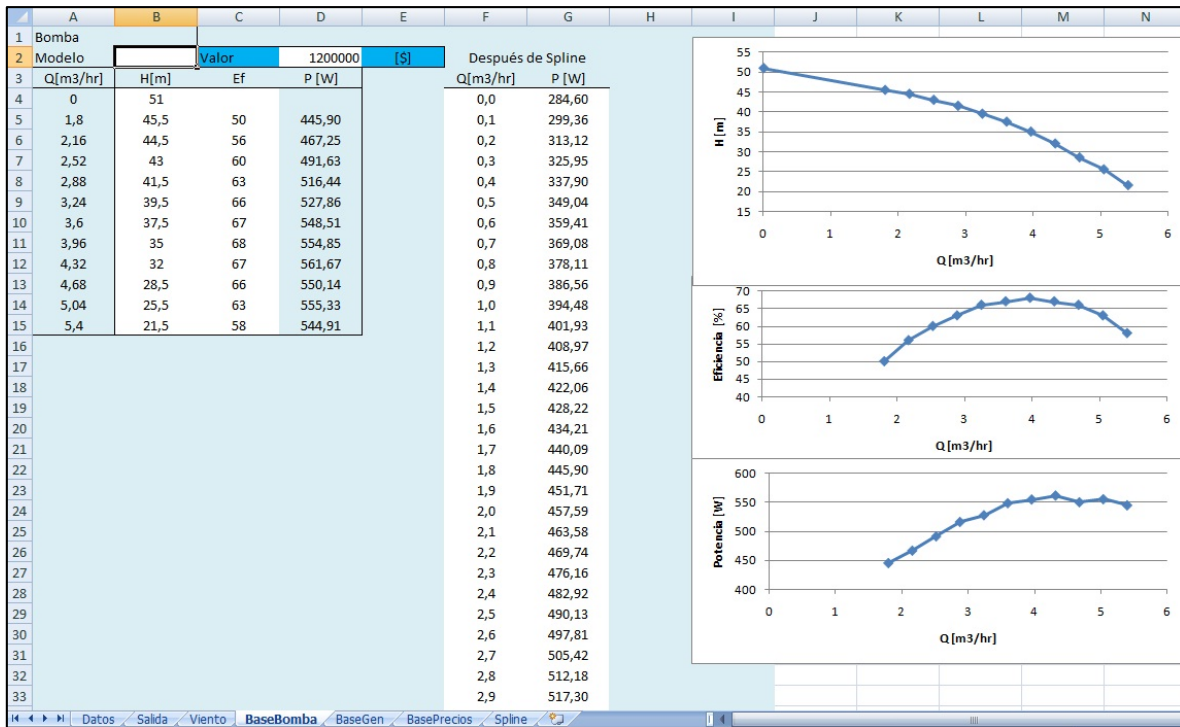


Figura 3.8: “Hoja para ingresar características de la bomba de riego”

### e) Aerogeneradores y altura a considerar

La plataforma cuenta con una base de datos que contiene una serie de aerogeneradores con sus respectivas curvas de potencia. Estos varían en su potencia nominal y altura de instalación, por lo que el usuario tiene la opción de seleccionar cuales emplear en la simulación<sup>3</sup> de su proyecto.

Las características de los aerogeneradores se encuentran en la sección “Base de Datos” en el acápite 3.3.1.

Se debe definir la tensión a la cual trabajará el sistema eléctrico. Esto dependerá principalmente de dos cosas: primero, de la tensión a la cual puede trabajar el aerogenerador, que por lo general es modificable y varía entre 12, 24 y 48 Volts; y segundo, de la seguridad de las personas que operen los equipos eléctricos. Una tensión mayor a 24 volts puede tener riesgo vital.

Por último, en esta sección también se especifica la eficiencia del regulador de carga y el inversor de corriente. Se recomienda considerar una eficiencia del 70% para el regulador de carga y, para el inversor de corriente, basta con un 95%.

<sup>3</sup> El software simulará hasta 5 unidades de cada aerogenerador conectados en paralelo.

## f) Baterías

En esta parte, sólo se deben especificar las características nominales de las baterías que se estén empleando en el proyecto. El simulador evaluará hasta 5 unidades, más la cantidad, en paralelo, necesarias para cumplir con la tensión del sistema definida en la sección anterior.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
1	Date	Time	CH1Avg	CH1SD	CH1Max	CH1Min	CH2Avg	CH2SD	CH2Max	CH2Min	CH3Avg	CH3SD	CH3Max	CH3Min
2	22-12-2006	0:00:00	6,4	0,6	7,6	4,9	5,8	0,7	7,2	4,2	181	5	182	0
3	22-12-2006	0:10:00	5,9	0,7	8,4	4,6	5,2	0,7	7,2	3,4	180	6	178	0
4	22-12-2006	0:20:00	7,1	0,5	8,4	5,7	6,6	0,7	8,4	4,6	176	6	175	0
5	22-12-2006	0:30:00	7,4	0,7	9,1	5,7	6,7	0,9	8,8	3,4	172	7	176	0
6	22-12-2006	0:40:00	6,4	0,8	8,4	4,2	5,6	0,8	7,6	3,4	170	7	163	0
7	22-12-2006	0:50:00	6,1	0,8	8,4	3,4	5,3	0,8	7,2	3,4	164	7	172	0
8	22-12-2006	1:00:00	4,6	0,7	6,8	3	4	0,6	6,1	2,6	157	8	177	0
9	22-12-2006	1:10:00	4,7	0,6	6,5	3,4	4,2	0,6	5,7	2,3	165	8	179	0
10	22-12-2006	1:20:00	4,2	0,7	6,5	2,6	3,7	0,7	6,1	2,3	175	7	179	0
11	22-12-2006	1:30:00	4,7	0,6	6,1	3	4,1	0,5	5,3	2,6	178	7	179	0
12	22-12-2006	1:40:00	5,4	0,6	6,8	3,8	4,4	0,6	6,5	3	174	6	183	0
13	22-12-2006	1:50:00	4,6	0,6	6,5	3	3,8	0,6	5,7	2,6	174	7	174	0
14	22-12-2006	2:00:00	5,6	0,7	7,6	4,2	4,8	0,7	7,2	3	178	7	173	0
15	22-12-2006	2:10:00	5,2	0,6	6,8	3,4	4,5	0,6	6,1	3	179	7	185	0
16	22-12-2006	2:20:00	5,1	0,4	6,5	3,4	4,4	0,6	5,7	2,6	171	8	176	0
17	22-12-2006	2:30:00	4,2	0,7	5,7	3	3,7	0,6	5,3	2,6	157	8	159	0
18	22-12-2006	2:40:00	3,2	0,3	4,2	2,3	3,1	0,4	3,8	2,3	148	5	153	0
19	22-12-2006	2:50:00	3,9	0,3	4,6	3,4	3,7	0,3	4,6	2,6	151	7	164	0
20	22-12-2006	3:00:00	2,9	0,7	4,6	1,1	2,3	0,8	4,2	0,7	143	9	142	0
21	22-12-2006	3:10:00	0,7	0,4	1,9	0,4	0,4	0,1	1,1	0,4	166	22	133	0
22	22-12-2006	3:20:00	1,2	0,5	2,3	0,4	1,2	0,5	1,9	0,4	16	61	53	0
23	22-12-2006	3:30:00	1,8	0,3	2,6	1,1	1,6	0,3	2,3	0,7	42	13	55	0
24	22-12-2006	3:40:00	1,5	0,5	2,6	0,4	1,4	0,4	2,3	0,4	32	13	19	0
25	22-12-2006	3:50:00	1,4	0,5	3	0,4	1,1	0,5	2,3	0,4	59	82	174	0
26	22-12-2006	4:00:00	2	1	4,2	0,4	1,5	1	3,8	0,4	152	21	172	0
27	22-12-2006	4:10:00	2,5	0,4	3,8	1,5	2,2	0,4	3	1,1	159	10	182	0
28	22-12-2006	4:20:00	3,9	0,8	5,3	2,3	3,2	0,7	4,6	1,9	167	6	168	0
29	22-12-2006	4:30:00	5,3	1,1	6,8	2,3	4,7	1,1	6,8	1,9	187	6	186	0
30	22-12-2006	4:40:00	6,7	0,5	7,6	5,3	5,8	0,6	7,2	4,2	192	4	189	0
31	22-12-2006	4:50:00	6,2	0,5	7,6	4,9	5,4	0,7	7,2	3,4	191	4	199	0
32	22-12-2006	5:00:00	5,6	0,5	6,8	4,2	4,8	0,6	6,1	3	182	7	186	0
33	22-12-2006	5:10:00	4,9	0,4	5,7	3,8	4,1	0,4	4,9	3	166	6	171	0
34	22-12-2006	5:20:00	3,3	0,7	5,3	1,5	3	0,7	4,6	1,5	141	11	163	0
35	22-12-2006	5:30:00	2,8	0,7	4,6	1,5	2,3	0,6	3,8	1,5	154	12	174	0
36	22-12-2006	5:40:00	3,4	0,3	4,2	2,6	3	0,4	3,8	1,9	170	6	171	0
37	22-12-2006	5:50:00	3,3	0,5	4,6	2,3	2,9	0,4	4,2	1,9	177	8	175	0
38	22-12-2006	6:00:00	4,2	1,7	8,4	1,5	3,7	1,6	8	1,1	186	11	199	0
39	22-12-2006	6:10:00	7,5	0,8	9,1	5,3	6,7	0,9	9,1	4,2	187	6	191	0

Figura 3.9: “Hoja para el ingreso del registro de datos”

## g) Opciones de simulación

Antes de dar la explicación de esta sección, es necesario definir el concepto de “Falla” para los efectos de este trabajo. Se define como un día donde no se pudo entregar el volumen mínimo de agua requerido por el cultivo, debido a que la energía generada no fue suficiente para operar las bombas durante el tiempo requerido.

Al definir un máximo de días sin agua, total y continuos, en esta sección, se está precisando el máximo de fallas para el sistema, estableciendo así una restricción a la simulación, lo que implica tener resultados más acotados y un menor tiempo de cálculo en la ejecución del programa.

Lo que hace la plataforma con éstas restricciones es que cuando la alternativa que se está simulando sobrepasa alguna de las dos, la desecha de inmediato dejando de calcular para el resto de los datos meteorológicos.

Las otras alternativas son opciones de visualización de resultados, salvo “simular fuera del periodo de riego” que permite estimar la energía posible de generar cuando no se utilizan los equipos de

bombeo. Si bien, esta opción se aleja de los alcances del trabajo, resulta interesante dado que se le podría dar un valor como externalidad positiva a esta energía.

#### h) Detalle diario

Las opciones de esta sección sólo tienen la función de seleccionar cuáles son las variables que se quiere mostrar en el detalle diario de la simulación.

### 3.3.1 Base de Datos

El programa consta de datos predefinidos y actualizables que utiliza dentro de la ejecución del programa. En el caso de la simulación, sólo se tiene la base de datos de generadores eólicos.

Los distintos generadores tienen características que definen la potencia que pueden entregar. En el caso de las turbinas eólicas se tiene la curva potencia-velocidad, que indica la potencia que genera para cada velocidad del viento.

Se han incorporado 8 modelos diferentes en la plataforma que varían en la potencia nominal y diámetro del rotor. Los generadores considerados son los siguientes:

**Tabla 3.1: “Aerogeneradores base de datos”**

Modelo	Fabricante	Potencia Nominal [W]	Diámetro de rotor [m]	Peso [Kg]
Kestrel 800	Kestrel	800	2.1	25
Whisper 100	SWWP	900	2.1	25
BWC XL.1	Bergey	1000	2.5	34
Whisper 200	SWWP	1000	2.7	35
Kestrel 1000	Kestrel	1000	3	60
SkyStream 3.7	SWWP	1900	3.7	77
Kestrel 3000	Kestrel	3000	3.8	180
Whisper 500	SWWP	3000	4.5	70

Estas turbinas son aquellas que se encuentran en el mercado actualmente y se tiene un presupuesto actualizado.

### 3.3.2 Salida de Datos

La simulación arroja una serie de datos, resultado de la ejecución del software, que describen la factibilidad energética para cada una de las opciones evaluadas. Los resultados son desplegados en una hoja dentro de la plataforma como lo muestra la Figura 3.10.

Cada fila de la hoja, muestra los resultados correspondientes a una opción simulada según lo especificado por el usuario en la hoja de entrada. Éstas se encuentran ordenadas ascendentemente por la cantidad de fallas y luego por la máxima cantidad de fallas continuas.

Cada columna de la hoja “Salida” representa una variable de salida y expresan lo siguiente:

- **Modelo:** Marca y modelo del aerogenerador simulado.
- **Altura:** Altura de instalación del aerogenerador. [m]

- **Cantidad Generadores:** Cantidad total del aerogenerador simulado conectados en paralelo. [N°]

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	Generadores			Baterías			Fallas continuas								
2	Modelo	Altura	Cantidad Generadores	Capacidad Total	Cantidad	Fallas	Cantidad	Máxima	Inversión (\$)	\$/KWh	E. Total [kWh]	E. Util [kWh]	E. Cons [kWh]	E. Faltante [kWh]	E. No Usada [kWh]
3	Whisper 500	19,8	2	24000	8	3	1	2	\$ 14.162.000	\$ 3.607	3926	2748	758	23	2007
4	Whisper 500	24,4	2	24000	8	3	1	2	\$ 15.676.000	\$ 3.747	4184	2928	759	21	2175
5	Whisper 500	15,2	3	24000	8	3	1	2	\$ 18.139.000	\$ 3.349	5415	3791	759	21	3057
6	Whisper 500	19,8	3	24000	8	3	1	2	\$ 18.994.000	\$ 3.225	5889	4122	760	20	3375
7	Whisper 500	24,4	3	24000	8	3	1	2	\$ 21.265.000	\$ 3.389	6275	4393	762	19	3661
8	Whisper 500	15,2	4	24000	8	3	1	2	\$ 22.686.000	\$ 3.142	7221	5054	761	19	4357
9	Whisper 500	19,8	4	24000	8	3	1	2	\$ 23.826.000	\$ 3.034	7852	5496	762	18	4788
10	Kestrel 3000	15,2	4	24000	8	3	1	2	\$ 26.530.000	\$ 5.394	4918	3443	763	17	2686
11	Whisper 500	24,4	4	24000	8	3	1	2	\$ 26.854.000	\$ 3.209	8367	5857	764	16	5156
12	Whisper 500	15,2	5	24000	8	3	1	2	\$ 27.233.000	\$ 3.017	9026	6318	763	18	5625
13	Whisper 500	19,8	5	24000	8	3	1	2	\$ 28.658.000	\$ 2.920	9815	6870	764	16	6182
14	SkyStream 3.7	13,7	5	24000	8	3	1	2	\$ 29.268.000	\$ 5.518	5304	3713	758	22	2985
15	Kestrel 3000	15,2	5	18000	6	3	1	2	\$ 31.178.000	\$ 5.071	6148	4304	761	20	3560
16	Kestrel 3000	15,2	5	24000	8	3	1	2	\$ 32.038.000	\$ 5.211	6148	4304	765	15	3550
17	Whisper 500	24,4	5	24000	8	3	1	2	\$ 32.443.000	\$ 3.102	10459	7321	766	14	6628
18	SkyStream 3.7	18,3	5	24000	8	3	1	2	\$ 42.153.000	\$ 7.246	5817	4072	759	21	3346
19	Whisper 500	24,4	2	18000	6	4	1	3	\$ 14.816.000	\$ 3.541	4184	2928	753	27	2186
20	Whisper 500	15,2	3	18000	6	4	1	3	\$ 17.279.000	\$ 3.191	5415	3791	754	26	3067
21	Whisper 500	19,8	3	18000	6	4	1	3	\$ 18.134.000	\$ 3.079	5889	4122	756	25	3385
22	Whisper 500	24,4	3	18000	6	4	1	3	\$ 20.405.000	\$ 3.252	6275	4393	757	24	3670
23	Whisper 500	15,2	4	18000	6	4	1	3	\$ 21.826.000	\$ 3.023	7221	5054	756	24	4366
24	Whisper 500	19,8	4	18000	6	4	1	3	\$ 22.966.000	\$ 2.925	7852	5496	758	23	4798
25	Kestrel 3000	15,2	4	18000	6	4	1	3	\$ 25.670.000	\$ 5.219	4918	3443	757	23	2697
26	Whisper 500	24,4	4	18000	6	4	1	3	\$ 25.994.000	\$ 3.107	8367	5857	759	21	5166
27	Whisper 500	15,2	5	18000	6	4	1	3	\$ 26.373.000	\$ 2.922	9026	6318	758	22	5634
28	Whisper 500	19,8	5	18000	6	4	1	3	\$ 27.798.000	\$ 2.832	9815	6870	760	21	6192
29	SkyStream 3.7	13,7	5	18000	6	4	1	3	\$ 28.408.000	\$ 5.356	5304	3713	752	29	2996
30	Whisper 500	24,4	5	18000	6	4	1	3	\$ 31.583.000	\$ 3.020	10459	7321	761	19	6638
31	SkyStream 3.7	18,3	4	18000	6	4	1	3	\$ 33.762.000	\$ 7.255	4654	3258	751	29	2539
32	SkyStream 3.7	18,3	4	24000	8	4	1	3	\$ 34.622.000	\$ 7.439	4654	3258	757	23	2528
33	SkyStream 3.7	18,3	5	18000	6	4	1	3	\$ 41.293.000	\$ 7.098	5817	4072	754	27	3356

Figura 3.10: “Hoja Salida”

- **Baterías**
  - **Capacidad Total:** Energía máxima posible de acumular en el banco de baterías. [KWh]
  - **Cantidad:** Cantidad total de las baterías, especificadas en la hoja de entrada, conectadas en serie y paralelo. [N°]
- **Fallas:** Cantidad total de fallas dentro del periodo de simulación. [N°]
- **Fallas Continuas:** Se define como la cantidad de días donde no se puede entregar el volumen mínimo de agua por más de un día consecutivo.
  - **Cantidad:** Cantidad de veces que se tienen fallas de forma continua dentro del periodo de simulación. [N°]
  - **Máxima:** Cantidad máxima de días fallos continuos dentro de las veces que se produjo esta situación. [N°]
- **Inversión:** Corresponde al valor total, en pesos chilenos, de los componentes del sistema eléctrico: Generadores, Baterías, Regulador de Carga e Inversor. [Pesos del año en que se ingresen los valores de insumos en la plataforma]
- **\$/Kwh:** Indicador que muestra la razón entre la inversión en equipos eléctricos y la cantidad total de energía generada. [\$/KWh]

- **E. Total:** Energía total generada por la opción simulada. [KWh]
- **E. Útil:** Energía total útil debido a la eficiencia de los elementos de control. [KWh]
- **E. Cons.:** Energía consumida por la operación de las bombas. [KWh]
- **E. Faltante:** Energía que falta para poder lograr cero fallas con la opción simulada. [KWh]
- **E. No Usada:** Energía perdida porque no se pudo almacenar o porque no se utilizó al momento de generarse . [KWh]

Opcionalmente, se puede dar un detalle diario de los resultados los que son mostrados en la misma hoja “Salida” a la derecha de lo mostrado en la Figura 3.10. Del mismo modo, cada columna representa una variable (ver Figura 3.11) las que corresponden a:

- **V:** Volumen de agua en el estanque para el día indicado. [m3]
- **Reg:** Volumen de agua entregado al cultivo en el día indicado. [m3]
- **Gen:** Energía generada en el día indicado. [KWh]
- **Cons:** Energía consumida por la operación de las bombas en el día indicado. [KWh]

S	T	U	V	W	X	Y	Z	AA	AB	AC	AD	AE	AF	AG	AH
01-12-2006				02-12-2006				03-12-2006				04-12-2006			
	V[m3]	Reg[m3]	Gen[KWh]	Cons[KWh]	V[m3]	Reg[m3]	Gen[KWh]	Cons[KWh]	V[m3]	Reg[m3]	Gen[KWh]	Cons[KWh]	V[m3]	Reg[m3]	Gen[KWh]
9999933	37,3	4,9	4	9999802	72,7	26,5	7,8	9999658	79,2	43,8	8,5	9999514	79,2	48	
9999933	37,4	5,2	4	9999794	77	27,9	8,3	9999650	79,2	46,9	8,5	9999506	79,2	51,2	
9999933	37,5	6,7	4	9999789	79,2	37,4	8,5	9999645	79,2	60,1	8,5	9999501	79,2	66,2	
9999932	37,7	7,4	4	9999788	79,2	39,8	8,5	9999644	79,2	65,7	8,5	9999500	79,2	72	
9999932	37,8	7,9	4,1	9999788	79,2	41,8	8,5	9999644	79,2	70,3	8,5	9999500	79,2	76,8	
9999932	37,8	9	4,1	9999788	79,2	49,9	8,5	9999644	79,2	80,2	8,5	9999500	79,2	88,2	
9999932	37,8	9,8	4,1	9999788	79,2	53,1	8,5	9999644	79,2	87,6	8,5	9999500	79,2	96	
9999932	39,6	5,3	4,3	9999790	78,4	32,7	8,4	9999646	79,2	51,9	8,5	9999502	79,2	60,1	
9999932	38	10,5	4,1	9999788	79,2	55,8	8,5	9999644	79,2	93,8	8,5	9999500	79,2	102,4	
9999931	37,9	11,2	4,1	9999787	79,2	62,3	8,5	9999643	79,2	100,2	8,5	9999499	79,2	110,3	
9999931	37,9	12,3	4,1	9999787	79,2	66,3	8,5	9999643	79,2	109,5	8,5	9999499	79,2	120,1	
9999933	37,3	5,9	4	9999789	79,2	37,2	8,5	9999645	79,2	59,6	8,5	9999501	79,2	66,5	
9999930	40,6	6,6	4,4	9999786	79,2	40,9	8,5	9999642	79,2	64,9	8,5	9999498	79,2	75,2	
9999930	40,6	6,6	4,4	9999786	79,2	40,9	8,5	9999642	79,2	64,9	8,5	9999498	79,2	75,2	
9999931	38,2	13,1	4,1	9999787	79,2	69,7	8,5	9999643	79,2	117,2	8,5	9999499	79,2	128	
9999933	37,4	6,4	4	9999789	79,2	40	8,5	9999645	79,2	66	8,5	9999501	79,2	73,3	
9999933	37,4	5,2	4	9999794	77	27,9	8,3	9999650	79,2	46,9	8,5	9999506	79,2	51,2	
9999933	37,5	6,7	4	9999789	79,2	37,4	8,5	9999645	79,2	60,1	8,5	9999501	79,2	66,2	
9999932	37,7	7,4	4	9999788	79,2	39,8	8,5	9999644	79,2	65,7	8,5	9999500	79,2	72	
9999932	37,8	7,9	4,1	9999788	79,2	41,8	8,5	9999644	79,2	70,3	8,5	9999500	79,2	76,8	
9999932	37,8	9	4,1	9999788	79,2	49,9	8,5	9999644	79,2	80,2	8,5	9999500	79,2	88,2	
9999932	37,8	9,8	4,1	9999788	79,2	53,1	8,5	9999644	79,2	87,6	8,5	9999500	79,2	96	
9999932	39,6	5,3	4,3	9999790	78,4	32,7	8,4	9999646	79,2	51,9	8,5	9999502	79,2	60,1	
9999932	38	10,5	4,1	9999788	79,2	55,8	8,5	9999644	79,2	93,8	8,5	9999500	79,2	102,4	
9999931	37,9	11,2	4,1	9999787	79,2	62,3	8,5	9999643	79,2	100,2	8,5	9999499	79,2	110,3	
9999931	37,9	12,3	4,1	9999787	79,2	66,3	8,5	9999643	79,2	109,5	8,5	9999499	79,2	120,1	
9999933	37,3	5,9	4	9999789	79,2	37,2	8,5	9999645	79,2	59,6	8,5	9999501	79,2	66,5	
9999930	40,6	6,6	4,4	9999786	79,2	40,9	8,5	9999642	79,2	64,9	8,5	9999498	79,2	75,2	
9999930	40,6	6,6	4,4	9999786	79,2	40,9	8,5	9999642	79,2	64,9	8,5	9999498	79,2	75,2	
9999931	38,2	13,1	4,1	9999787	79,2	69,7	8,5	9999643	79,2	117,2	8,5	9999499	79,2	128	
9999933	37,4	6,4	4	9999789	79,2	40	8,5	9999645	79,2	66	8,5	9999501	79,2	73,3	
9999933	37,4	5,2	4	9999794	77	27,9	8,3	9999650	79,2	46,9	8,5	9999506	79,2	51,2	
9999933	37,5	6,7	4	9999789	79,2	37,4	8,5	9999645	79,2	60,1	8,5	9999501	79,2	66,2	
9999932	37,7	7,4	4	9999788	79,2	39,8	8,5	9999644	79,2	65,7	8,5	9999500	79,2	72	
9999932	37,8	7,9	4,1	9999788	79,2	41,8	8,5	9999644	79,2	70,3	8,5	9999500	79,2	76,8	
9999932	37,8	9	4,1	9999788	79,2	49,9	8,5	9999644	79,2	80,2	8,5	9999500	79,2	88,2	
9999932	37,8	9,8	4,1	9999788	79,2	53,1	8,5	9999644	79,2	87,6	8,5	9999500	79,2	96	
9999932	39,6	5,3	4,3	9999790	78,4	32,7	8,4	9999646	79,2	51,9	8,5	9999502	79,2	60,1	
9999932	38	10,5	4,1	9999788	79,2	55,8	8,5	9999644	79,2	93,8	8,5	9999500	79,2	102,4	
9999931	37,9	11,2	4,1	9999787	79,2	62,3	8,5	9999643	79,2	100,2	8,5	9999499	79,2	110,3	
9999931	37,9	12,3	4,1	9999787	79,2	66,3	8,5	9999643	79,2	109,5	8,5	9999499	79,2	120,1	
9999933	37,3	5,9	4	9999789	79,2	37,2	8,5	9999645	79,2	59,6	8,5	9999501	79,2	66,5	
9999931	38,2	13,1	4,1	9999787	79,2	69,7	8,5	9999643	79,2	117,2	8,5	9999499	79,2	128	
9999933	37,2	5,2	4	9999798	75	32	8,1	9999654	79,2	52,8	8,5	9999510	79,2	58,6	
9999933	37,2	5,2	4	9999798	75	32	8,1	9999654	79,2	52,8	8,5	9999510	79,2	58,6	
9999933	37,4	6,4	4	9999789	79,2	40	8,5	9999645	79,2	66	8,5	9999501	79,2	73,3	
9999933	37,3	4,9	4	9999802	72,7	26,5	7,8	9999658	79,2	43,8	8,5	9999514	79,2	48	
9999932	37,8	9	4,1	9999788	79,2	49,9	8,5	9999644	79,2	80,2	8,5	9999500	79,2	88,2	

Figura 3.11: “Hoja Salida. Detalle Diario”

### 3.3.3 Algoritmos de la simulación

El algoritmo para la simulación abarca la toma de datos, procesamiento de la velocidad del viento, cálculo de generación eléctrica según rotor eólico, operación de las bombas, cálculo del consumo energético, almacenamiento y salida de energía en baterías, almacenamiento de agua en estanque y, por último, la salida de datos.

Este algoritmo tiene por finalidad programar todos los pasos lógicos que permiten simular las opciones disponibles para determinar su factibilidad energética en el proyecto agrícola. Además, indica los pasos del funcionamiento de Software. Dentro de éste, destacan los procesos de generación eléctrica y la operación de las bombas, que son aquellos que representan la ingeniería de este trabajo.

La operación de las bombas está programada, dentro del algoritmo, mediante una gran cantidad de condiciones energéticas e hidráulicas, que determinan si éstas pueden funcionar, por cuánto tiempo y qué energía sobra o falta de la generada. Este proceso se explicará de forma independiente y será considerado como un subalgoritmo del principal.

Los algoritmos serán explicados para el caso de un esquema con estanque de acumulación, que es el más restrictivo, y dos bombas. Los pasos, se detallan a continuación:

#### a) Simulación

1. Ingreso de datos y guardado en variables internas.
2. Selección del primer generador chequeado por el usuario.
3. Selección de la primera altura de instalación para el generador seleccionado.
4. Cálculo de la rugosidad asociada a cada intervalo de tiempo. Si la velocidad sólo está medida para una altura, la rugosidad es cero.
5. Calcula la velocidad del viento, basado en la rugosidad, para la altura a la cual se instala el generador en cada intervalo.
6. Selección de la cantidad de generadores a utilizar (desde 1 hasta 5).
7. Selección de la cantidad de baterías a utilizar
8. En un día, para cada intervalo, asumiendo una velocidad del viento constante dentro del intervalo, se calcula la potencia generada por el(los) generador(es) considerando la eficiencia de los elementos de control, es decir, la potencia disponible para la operación de las bombas.<sup>4</sup>
9. Se realiza la operación de las bombas dependiendo de la potencia generada (ver detalle del algoritmo para la operación de las bombas).<sup>4</sup>

---

<sup>4</sup> Eléctricamente, los pasos 8, 9 y 10, se realizan de forma simultánea. Se presentan de forma consecutiva sólo con fines explicativos.

10. Se determina si falta o sobra energía. En caso de faltar, se ocupa la disponible en las baterías. Por el contrario, de haber excedente, se guarda en ellas.<sup>4</sup>
11. Se guardan los resultados obtenidos al final del día: Energía generada, energía consumida, energía excedente, energía faltante, energía en baterías, volumen de agua en el estanque y volumen de agua entregado al cultivo.
12. Se determina si el volumen de agua entregado al cultivo en el día satisface la demanda diaria. Si no la satisface se guarda el día como día fallido.
13. Si la cantidad de fallas no cumple con las condiciones ingresadas por el usuario, se interrumpen las iteraciones para la alternativa en simulación y se pasa al punto 17.
14. Se pasa al siguiente día y se vuelve al punto 7 hasta completar todos los días de simulación.
15. Se calculan los costos de inversión del sistema eléctrico y el costo específico de generación [\$/KWh].
16. Se despliega en pantalla los resultados obtenidos para el sistema simulado de acuerdo a las opciones elegidas en la entrada de datos. Se muestra también la cantidad de días que falla y la cantidad de días continuos de falla dentro del período de simulación.
17. Lo anterior se repite para todas las alturas de instalación y generadores chequeados, volviendo así a los puntos 3 y 2.

Los pasos anteriores se representan mediante el diagrama de flujo de la Figura 3.12.



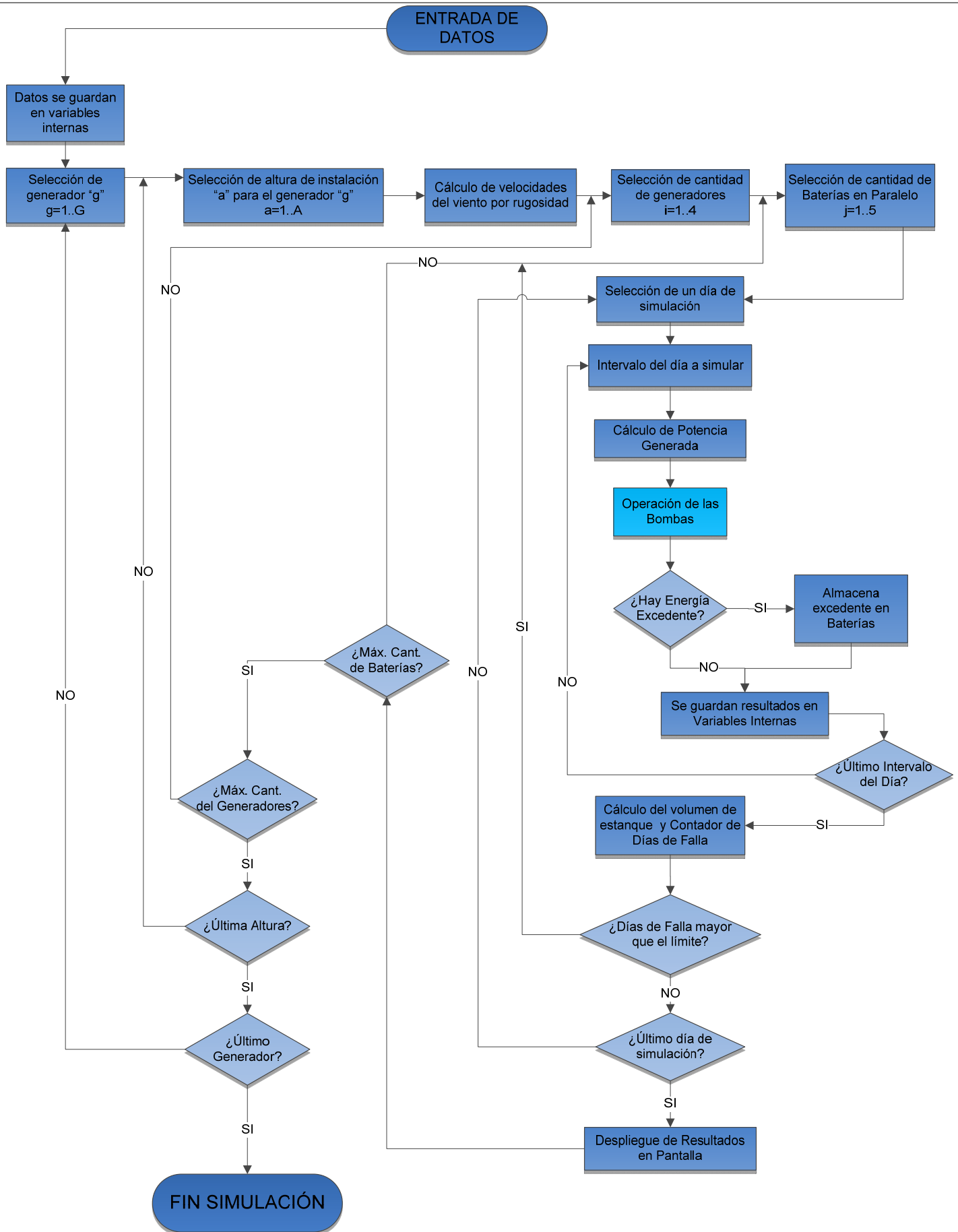


Figura 3.12: "Diagrama de Flujo de la Simulación"

**b) Algoritmo de Operación de Bombas**

Los criterios fundamentales para la operación de las bombas son, en primer lugar, la disponibilidad energética, y luego la disponibilidad del recurso hídrico.

Se considera primero la condición energética, porque si no hay potencia suficiente para operar las bombas, no se riega y el volumen de agua en el estanque se mantiene invariable. Sólo habría que determinar qué cantidad de energía se puede almacenar en las baterías y cuál se pierde.

El detalle del algoritmo es el siguiente:

1. Se determina la hora del intervalo que se está simulando para saber si se está dentro o fuera de las horas de riego del día.
2. Se determina si la potencia generada más la almacenada en las baterías es suficiente para operar las bombas de captación ( $P_1, Q_1$ ) y riego ( $P_2, Q_2$ ).
3. Si lo es, verifica que el volumen de agua ( $V_i$ ) alcance para entregar lo demandado por el cultivo. Luego, si hay agua, se entrega lo demandado, sino se entrega todo lo que hay en el estanque
4. Se determina si de la energía generada ( $P_{GEN}$ ) hay excedentes, y cuánta de ésta es almacenada y/o perdida.
5. Si la energía generada más la de las baterías ( $Bat_i$ ), no es suficiente para operar las bombas, y el volumen de agua es, a lo menos, el requerido por el cultivo, se riega durante el tiempo que puedan abastecer las baterías.
6. Luego de operar las bombas, se realiza el balance volumétrico y se verifica que el volumen de agua no haya alcanzado el máximo ( $V_{max}$ ) o el mínimo ( $V_{min}$ ).
7. Si llega al máximo, se apaga la bomba de captación se apaga hasta que llegue al nivel mínimo, del mismo modo, si llega al mínimo, se enciende hasta que se tenga el volumen máximo.
8. Si se está fuera del tiempo de riego ( $T_{hr}$ ), sólo se verifica si hay potencia suficiente para operar la bomba de captación y se realiza el balance volumétrico en el estanque.
9. Se guardan las variables de energía consumida ( $E_{cons}$ ), energía excedente ( $E_{exc}$ ) y volumen de agua regado ( $V_{reg}$ ).
10. El ciclo anterior se repite para todos los intervalos de simulación.

El Diagrama de Flujo del algoritmo anterior se presenta en la siguiente figura:

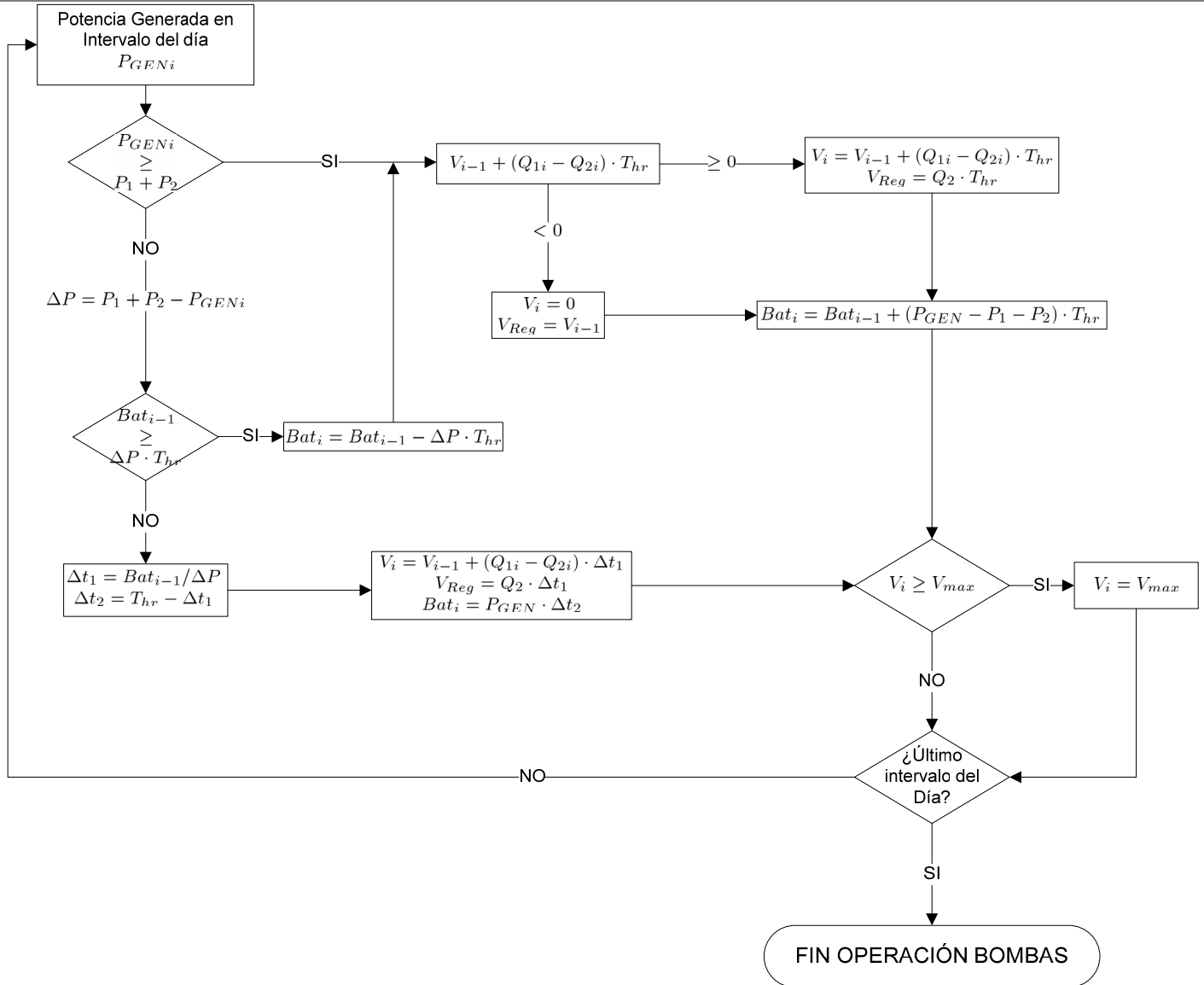


Figura 3.13: “Diagrama de Flujo de la Operación de las Bombas”

### 3.4 EVALUACIÓN ECONÓMICA

Esta sección de la plataforma tiene por objetivo confeccionar el flujo de caja para el proyecto agrícola, incorporando alguna de las alternativas arrojadas por la simulación, y poder compararla con las opciones energéticas convencionales como un generador a combustión interna y la conexión a la red eléctrica.

El flujo de caja se realiza de forma convencional, considerando las tasas de impuesto e intereses que rigen en Chile (Consultar suplemento tributario del Servicio de Impuestos Internos). Los componentes del flujo de caja son los siguientes:

- Ingresos
- Costos fijos y variables
- Depreciación
- Ganancia o pérdida de Capital
- Pérdida del ejercicio anterior
- Impuesto de Primera categoría
- Inversiones
- Capital de Trabajo
- Valor Residual

No cabe dentro de los objetivos de este trabajo profundizar la teoría económica, por lo que, si se quiere profundizar en el tema, puede consultar cualquier apunte o libro de Evaluación de Proyectos (Ej.: Nassir Sapag, Criterios de evaluación de proyectos. McGraw-Hill, España).

Para poder comparar las alternativas energéticas, el software realiza de forma simultánea el flujo de caja para el generador eólico, a combustión interna y con conexión a la red eléctrica; entregando como resultados los indicadores económicos TIR y VAN. Adicionalmente, el usuario puede calcular cualquier otro indicador, ya que se entrega como resultado el flujo de forma completa y detallado para las 3 alternativas energéticas.

Al igual que en la simulación, se necesita de una serie de datos que debe ingresar el usuario, pero además toma otros directamente de la hoja de salida de la simulación. También consta de una base de datos actualizable.

Los procesos y variables de entrada y salida, se describen a continuación.

#### 3.4.1 Variables de Entrada

La entrada de datos, por parte del usuario, corresponde a todos los valores económicos relacionados con el proyecto agrícola, más la inversión en generadores eléctricos y dispositivos de control y, en el caso del generador a combustión interna y la red eléctrica, las tarifas y rendimientos del combustible y electricidad, respectivamente.

El ingreso de los valores se hace en la hoja “E. Económica” que tiene la forma de la Figura 3.14.

La descripción de las secciones de las hojas y sus respectivas variables se da a continuación:

**a) Condiciones de Evaluación**

La evaluación se hará a precios de mercado.

Se ingresa la tasa de descuento a la cual que se quiere evaluar el proyecto, en Chile equivale a un 15% (S.I.I), y el periodo de evaluación en años.

**b) Aerogeneradores a Evaluar**

La herramienta puede evaluar, simultáneamente, hasta cuatro aerogeneradores para un mismo proyecto agrícola. Para esto, basta con ingresar los números de fila correspondientes a los resultados de la hoja “Salida” para cada aerogenerador.

**c) Cultivo a Evaluar**

El usuario puede optar por hacer la evaluación económica para uno de los cultivos predefinidos en la plataforma, cerezos y uva de exportación, o bien, para el cultivo que se desee. Para esta última opción, es necesario modificar, en la base de datos de la plataforma, la alternativa de cultivo “Otro” (ver acápite 3.4.2a)).

Además, es necesario ingresar la superficie a plantar.

**d) Valores Económicos**

En esta sección se ingresan todas las variables económicas, de cada elemento, tanto del sistema de riego, como del eléctrico, necesarias para el cálculo de los distintos componentes del flujo de caja.

Se debe especificar la vida útil y años de depreciación de los elementos. Así también, si se debe reinvertir en ellos dentro del periodo de evaluación, como por ejemplo las baterías. Esto último se hace en la columna “Reposición”.

La mantención anual de los elementos se estimará como un porcentaje de la inversión, por lo que es éste valor el que se debe ingresar. También deber ser ingresado el valor residual de cada uno.

Por último, hay que especificar la tarifa del combustible y energía eléctrica (según contrato con la compañía), y rendimiento del generador a combustión interna.

**e) Inversión**

Esta parte se completa de 2 formas distintas. La primera, es mediante funciones programadas que toman los resultados de la simulación y los ingresan en esta hoja. Las funciones, dependen del número de fila que se ha ingresado en la sección “Aerogeneradores a Evaluar”, o bien, del cultivo escogido. Los elementos que se completan de esta forma son: Generadores, Baterías, Inversor, Regulador de Carga, bombas hidráulicas y cultivo.

La segunda, es ingresando el monto de la inversión de los componentes que no son considerados por las funciones. Estos son: Estanque, generador diesel y conexión a la red eléctrica.

Todos los valores no incluyen IVA.

Condiciones de Evaluación			Aerogeneradores a Evaluar			
Tasa de Descuento	12	[%]	Opción 1	12		
Impuesto de 1ra Categoría	15	[%]		Opción 2		3
Periodo de Evaluación	15	[años]		Opción 3		24
				Opción 4		25
Capital de Trabajo	\$ 2.000.000	[\$]				
Valores Económicos						
	Vida Útil [años]	Tiempo de Depreciación [años]	Mantenimiento Anual [%]	Valor Residual [\$]	Reposición	Rend [kwh/l]
Generadores Eólico (Incluye Torre)	30	10	2	\$ 5.000.000	NO	
Baterías	5	5	1	-	SI	
Inversor	30	10	2	\$ 100.000	NO	
Regulador de Carga	30	10	1	\$ 100.000	NO	
Bombas Hidráulicas	15	15	3	-	NO	
Estanque	30	10	2	\$ 1.000.000	NO	
Generador Diesel	15	10	1	-	NO	0,625
Conexión Red Eléctrica	30	20	1	\$ 500.000	NO	
Valor Diesel	1000			\$/l		
Valor energía	150			\$/KWh		

Cultivo a Evaluar		EVALUACIÓN		
Cultivo	Cerezos			
Superficie [ha]	10			
<b>Inversión [\$]</b>				
	Opción 1	Opción 2	Opción 3	Opción 4
Generadores Eólico (c/ Torre)	\$ 22.356.000	\$ 22.356.000	\$ 9.094.000	\$ 22.356.000
Baterías	\$ 516.000	\$ 688.000	\$ 688.000	\$ 344.000
Inversor	\$ 700.000	\$ 700.000	\$ 700.000	\$ 700.000
Regulador de Carga	\$ 1.725.000	\$ 1.725.000	\$ 1.725.000	\$ 1.725.000
Bombas Hidráulicas	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000	\$ 2.000.000
Estanque	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000	\$ 5.000.000
Cultivo	\$ 24.973.601	\$ 24.973.601	\$ 24.973.601	\$ 24.973.601
Generador Diesel	\$ 500.000			
Conexión Red Eléctrica	\$ 3.000.000			

Figura 3.14: “Hoja de entrada de datos. Ev. Económica”

### **3.4.2 Base de Datos**

#### **a) Marginalidad de los cultivos**

Este ítem indica la rentabilidad que da un determinado cultivo por hectárea según el año en que se encuentre.

Los márgenes económicos son calculados a nivel de productor (o “a puerta de predio”) considerando todos los costos, directos e indirectos, que involucra la producción del cultivo en sus distintas etapas, es decir, en la plantación, crecimiento y cosecha.

Dichas marginalidades, fueron ingresadas tomando como referencia los datos del estudio “Análisis Comparado entre Conducción Entubada y Abierta en Canales de Riego” (CNR-PROCIVIL, 2010). La base de datos, cuenta con sólo dos cultivos ingresados: Cerezos y Uva de exportación. No obstante, se tiene la opción de modificarla con el fin de evaluar cualquier otro cultivo del que se tengan sus marginalidades, ya sean obtenidas del estudio citado, o de información propia. Los datos se encuentran en la hoja “Marginalidades” y tiene la forma de la Figura 3.15.

En el Anexo II, se presenta el cálculo de las marginalidades económicas de los dos cultivos ingresados en el software. La metodología con la cual se estiman los valores, se puede revisar en la sección 2.4 del estudio.

Respecto a los precios de insumos y productos agrícolas, cabe hacer una acotación especial. Existe una alta sensibilidad sobre los precios puntuales de productos agrícolas, especialmente de frutas y hortalizas, los que suelen tener gran variabilidad estacional e inter-anual y cíclica. Sin embargo, los proyectos de riego deben evaluarse en un horizonte de 30 años, período en el que los productos agrícolas considerados en los proyectos de riego pueden tener varios ciclos de alzas y bajas, por tanto no sería razonable considerarlos no rentables o muy rentables, según el momento del ciclo en que se realice la evaluación. Para evitar este efecto, en todos los estudios de mercado de productos agrícolas, los precios corresponden a promedios de 5 o 10 años, según los productos, de esta forma se minimizan los sesgos cíclicos(CNR-PROCIVIL, 2010).

Además de las marginalidades, es necesario especificar el monto depreciable del año 0, que corresponde al año de inversión, y los años de depreciación. No es el valor completo, porque dentro de éste, existen gastos no depreciables, como por ejemplo las remuneraciones.

#### **b) Base de Precios**

En una hoja diferente, están especificados los valores de los aerogeneradores (valores sin IVA), y sus respectivas torres, más todos los componentes eléctricos y elementos de control para el sistema de riego.

Esto se especifica en la hoja “BasePrecios” y se debe actualizar, en caso de querer hacerlo, antes de ejecutar la simulación.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Cerezos			Uva Exportación			Otro	
2	Año	[\$/ha]		Año	[\$/ha]		Año	[\$/ha]
3	0	-\$ 2.497.360		0	-\$ 3.752.483		0	-\$ 3.752.483
4	1	-\$ 624.340		1	-\$ 589.361		1	-\$ 589.361
5	2	-\$ 381.211		2	\$ 570.489		2	\$ 570.489
6	3	\$ 256.497		3	\$ 2.893.969		3	\$ 2.893.969
7	4	\$ 1.143.119		4	\$ 3.166.824		4	\$ 3.166.824
8	5	\$ 2.159.499		5	\$ 3.166.824		5	\$ 3.166.824
9	6	\$ 3.711.019		6	\$ 3.166.824		6	\$ 3.166.824
10	7	\$ 4.386.043		7	\$ 3.166.824		7	\$ 3.166.824
11	8	\$ 4.818.308		8	\$ 3.166.824		8	\$ 3.166.824
12	9	\$ 4.818.308		9	\$ 3.166.824		9	\$ 3.166.824
13	10	\$ 4.818.308		10	\$ 3.166.824		10	\$ 3.166.824
14	11	\$ 4.818.308		11	\$ 3.166.824		11	\$ 3.166.824
15	12	\$ 4.818.308		12	\$ 3.166.824		12	\$ 3.166.824
16	13	\$ 4.818.308		13	\$ 3.166.824		13	\$ 3.166.824
28	25	\$ 4.818.308		25	\$ 3.166.824		25	\$ 3.166.824
29	26	\$ 4.818.308		26	\$ 3.166.824		26	\$ 3.166.824
30	27	\$ 4.818.308		27	\$ 3.166.824		27	\$ 3.166.824
31	28	\$ 4.818.308		28	\$ 3.166.824		28	\$ 3.166.824
32	29	\$ 4.818.308		29	\$ 3.166.824		29	\$ 3.166.824
33	30	\$ 4.818.308		30	\$ 3.166.824		30	\$ 3.166.824
34								
35	Monto Depreciable de la inversión							
36	Años Depr.	[\$]		Años Depr.	[\$]		Años Depr.	[\$]
37	13	\$ 1.943.034		15	\$ 2.098.395		15	\$ 2.000.000
38								

Figura 3.15: “Hoja: Marginalidades”

### 3.4.3 Salida de Datos

Existen 4 hojas dentro de la plataforma, una para cada opción, en las cuales se muestra el flujo de caja completo de las 3 alternativas energéticas. Los resultados son desplegados según lo muestra la Figura 3.16.

Luego de mostrar el flujo de caja para la opción con generación eólica, se despliega un resumen con los valores actuales, el VAN y TIR, de las 3 alternativas energéticas, para luego mostrar el detalle de los flujos de cajas del generador diesel y la conexión a la red eléctrica (Figura 3.17).

Con esta última parte, se da por completada la ejecución de la plataforma computacional y el usuario está en condiciones de tomar una decisión teniendo en cuenta tanto la factibilidad energética como la económica.



	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Fecha de Evaluación:		24-08-2010 18:21														
2	Generador:		Whisper 500 a 24,4m. de altura														
3	Cultivo:		Cerezos														
4	Superficie:		10														
5	Periodo de Evaluación:		15														
6	Tasa de descuento:		12														
7	Valores x \$1.000																
8	Ítem	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
9	Marginalidad	0	-6.243	-3.812	2.565	11.431	21.595	37.110	43.860	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183
10	Mantenimiento E	0	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620	-620
11	Depreciación	0	-3.311	-3.311	-3.311	-3.311	-3.311	-3.311	-3.311	-3.311	-3.311	-3.311	-333	-333	-333	-183	-183
12	Cultivo	0	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	0	0
13	Genera	0	2.236	2.236	2.236	2.236	2.236	2.236	2.236	2.236	2.236	2.236	0	0	0	0	0
14	Batería	0	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103	103
15	Inverso	0	70	70	70	70	70	70	70	70	70	70	0	0	0	0	0
16	Regula	0	172	172	172	172	172	172	172	172	172	172	0	0	0	0	0
17	Bombas	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
18	Estanqu	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	0	0	0	0
19	G/P Capital (+)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.200
20	VL Tota	0	30.129	26.819	23.508	20.197	16.886	14.091	10.781	7.470	4.159	848	1.032	699	366	183	0
21	Cultivo	0	1.794	1.644	1.495	1.345	1.196	1.046	897	747	598	448	299	149	0	0	0
22	Genera	0	20.120	17.885	15.649	13.414	11.178	8.943	6.707	4.471	2.236	0	0	0	0	0	0
23	Batería	0	413	310	206	103	0	413	310	206	103	0	413	310	206	103	0
24	Inverso	0	630	560	490	420	350	280	210	140	70	0	0	0	0	0	0
25	Regula	0	1.552	1.380	1.208	1.035	862	690	518	345	172	0	0	0	0	0	0
26	Bombas	0	1.120	1.040	960	880	800	720	640	560	480	400	320	240	160	80	0
27	Estanqu	0	4.500	4.000	3.500	3.000	2.500	2.000	1.500	1.000	500	0	0	0	0	0	0
28	Perd. Ej. Anter	0	0	-10.174	-17.916	-19.281	-11.781	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
29	UAI	0	-10.174	-17.916	-19.281	-11.781	5.884	33.180	39.930	44.253	44.253	44.253	47.231	47.231	47.231	47.380	53.580
30	Imp. 1ra Cate	0	0	0	0	0	883	4.977	5.990	6.638	6.638	6.638	7.085	7.085	7.085	7.107	8.037
31	UDI	0	-10.174	-17.916	-19.281	-11.781	5.002	28.203	33.941	37.615	37.615	37.615	40.146	40.146	40.146	40.273	45.543
32	G/P Capital (-)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	-6.200
33	Depreciación	0	3.311	3.311	3.311	3.311	3.311	3.311	3.311	3.311	3.311	3.311	333	333	333	183	183
34	Perd. Ej. Anter	0	0	10.174	17.916	19.281	11.781	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
35	Flujo Caja Op	0	-6.863	-4.432	1.945	10.812	20.093	31.514	37.251	40.926	40.926	40.926	40.479	40.479	40.479	40.456	39.526
36	Inversión	-56.471	0	0	0	0	0	-516	0	0	0	0	-516	0	0	0	0

Figura 3.16: "Salida de datos de la Evaluación Económica"

42	Bombas	-1.200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
43	Estanqu	-5.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
44	Capital de Tra	-2.000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.000
45	Valor Residu	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6.200
46	Flujo Capital	-58.471	0	0	0	0	0	-516	0	0	0	0	-516	0	0	0	8.200
47	FLUJO DE CAJA	-58.471	-6.863	-4.432	1.945	10.812	20.093	30.998	37.251	40.926	40.926	40.926	39.963	40.479	40.479	40.456	47.726
48																	
49	Eólico																
50	VA	-58.471	-6.128	-3.533	1.385	6.871	11.401	15.704	16.851	16.529	14.758	13.177	11.488	10.390	9.277	8.278	8.719
51	VAN	76.698															
52	TIR	22															
53																	
54	Diesel																
55	VA	-33.674	-6.515	-3.878	1.076	6.596	10.262	15.587	16.512	16.227	14.488	12.936	11.526	10.291	9.189	8.200	7.842
56	VAN	96.666															
57	TIR	29															
58																	
59	Red Eléctrica																
60	VA	-36.174	-5.799	-3.239	1.647	7.105	10.419	15.940	16.827	16.508	14.739	13.160	11.729	10.472	9.350	8.344	8.069
61	VAN	99.096															
62	TIR	29															
63																	
64																	
65	Comprobación Diesel																
66	Ítem																
67	Marginalidad	0	-6.243	-3.812	2.565	11.431	21.595	37.110	43.860	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183	48.183
68	Mantenimiento E	0	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141	-141
69	C. Energía	0	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912	-912
70	Depreciación	0	-779	-779	-779	-779	-779	-779	-779	-779	-779	-779	-229	-229	-229	-80	-80
71	Cultivo	0	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	149	0	0
72	Gen. Di	0	50	50	50	50	50	50	50	50	50	50	0	0	0	0	0
73	Bombas	0	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80
74	Estanqu	0	500	500	500	500	500	500	500	500	500	500	0	0	0	0	0

Figura 3.17: "Salida de datos de la Evaluación Económica. Continuación"

### **3.5 MEJORAS A LA VERSIÓN DE M. NAVAS**

Como se dijo al inicio de este capítulo, se tomó como base la plataforma computacional de M. Navas diseñada en su trabajo de título (Navas, 2009). Esta fue modificada y extendida para los requisitos de este trabajo.

En la Tabla 3.2, mostrada en las dos páginas siguientes, se entrega una comparación entre esta versión y la de Navas, indicando las modificaciones y mejoras realizadas.

Tabla 3.2: “Comparación entre la versión de M. Navas y la actual”

M. Navas	Versión Actual	Comentarios
Esquema sin baterías	Esquema con Baterías	El uso de baterías, permite ocupar la energía en un momento posterior al que se generó.
Dispone de un estanque en altura.	En caso de necesitar estanque, este es a nivel del suelo.	En el caso de Navas, siempre se requiere de un estanque, ya que es la forma de almacenar energía, más aún, el balance hídrico se hace al final del día, por lo que sólo verifica que, en ese momento, se tuviese toda el agua que se requiere para un día de riego.  En esta versión, como se cuenta con baterías, basta con tener un estanque que almacene, en las horas que no se riegue, el volumen de agua faltante si la disponibilidad de agua no es suficiente para abastecer de forma instantánea.
Almacena la energía de forma potencial acumulando agua en el estanque elevado.	Almacena la energía de forma eléctrica en el banco de baterías.	Ocupar un estanque elevado para almacenar energía de forma potencial, implica un gasto mucho mayor al de un banco de baterías. Hay que considerar que un cultivo de requerimientos moderados necesita, para una hectárea, 3,6 [m <sup>3</sup> /hr], y si se busca una autonomía de un día, el volumen de agua llega a 86,4 [m <sup>3</sup> ]. Construir un estanque de esa magnitud a una altura entre 20 y 40 metros, genera un gasto excesivo, ya que debe ser en hormigón armado o acero.  Ahora bien, si existe algún punto alto en el predio, podría instalarse ahí un estanque, pero aumentando la longitud de conducción.  Esta versión considera una acumulación de energía en forma eléctrica, por lo que, en caso de haber estanque, puede instalarse a nivel del suelo.
Se utilizan bombas que poseen variador de frecuencia y de corriente continua.	Se utilizan bombas sin variador de frecuencia y de corriente alterna.	Una bomba con variador de frecuencia es muy útil si se quiere aprovechar toda la energía generada, ya que, para cualquier potencia se puede obtener una cierta cantidad de agua, sin embargo, esto no asegura poder entregar la presión requerida. Otro punto desfavorable, es que las bombas de corriente continua tienen una potencia baja.  Las bombas sin variador de frecuencia, siempre aseguran, como mínimo, el punto de operación requerido (siempre y cuando esté bien seleccionada), ahora

Tabla 3.2: “Comparación entre la versión de M. Navas y la actual”

M. Navas	Versión Actual	Comentarios
		bien, la desventaja radica en que si no se tiene la potencia mínima para elevar el caudal a una determinada altura, el sistema de riego no funcionará en ese instante, por lo que, tener el banco de baterías es indispensable para reducir las fallas.
Cuenta con una base datos donde se incorporan las bombas.	Las bombas a emplear se especifican directamente en la herramienta.	La versión anterior contaba con las curvas de operación de una serie de bombas las cuales se simulaban dentro del proyecto. Ahora, se debe ingresar la curva de operación que se quiera evaluar.  Si bien esto es un tanto más laborioso para el usuario, disminuye el tiempo de simulación, ya que sólo se simula una bomba. Se tomó esta consideración, dado que el tipo de bombas empleadas tienen características y valores similares para una misma potencia.
Se simula una solo unidad de aerogeneradores.	Se simula una cantidad, definida por el usuario, de aerogeneradores funcionando de forma simultánea	Ahora, se puede simular una cantidad definida por el usuario de aerogeneradores, funcionando simultáneamente. Esto permite evaluar la generación de más potencia.
Evaluación económica, considerando sólo la inversión, mediante anualidades y sin incorporar las variables del cultivo.	Evaluación económica realizando un flujo de caja completo, incorporando la rentabilidad del cultivo para una determinada superficie plantada.	Este punto es la mayor extensión del trabajo, ya que se puede hacer una evaluación económica acabada, mediante un flujo de caja, involucrando los componentes agrícolas en ella. Se puede seleccionar a que generadores hacer la simulación, cuales son los periodos de depreciación de las inversiones, los años de evaluación, tasas, impuestos, etc.

## 4 PRUEBA DE LA HERRAMIENTA

### 4.1 ANÁLISIS TEÓRICO DE UNA PLANTACIÓN DE CEREZOS

Para probar la herramienta, en esta sección se busca determinar la factibilidad de emplear generadores eólicos en una plantación de cerezos, y establecer la correlación que esta tiene con la superficie plantada. El análisis es teórico, es decir, no son proyectos reales.

Para esto, se definieron 4 escenarios con tamaños distintos de superficie plantada, en alguna zona ubicada entre las comunas de San Javier, Linares, Cauquenes y Constitución, las cuatro pertenecientes a la VII Región del Maule, zona en la cual, se dispone de dos estaciones meteorológicas con registros de viento: “Faro Carranza” y “Ciénagas del Name” (Ver Figura 4.1).



Figura 4.1: “Zona de Estudio y ubicación de estaciones meteorológicas”

Se dispuso el análisis en esta región dado que, según el censo agropecuario del 2007, entre la VII y VI región se concentra el 75% de las hectáreas plantadas.

La elección del Cerezo como cultivo a evaluar, es debido a que tiene una demanda de agua moderada (1 [l/s/ha]) y una rentabilidad de baja variabilidad a lo largo del tiempo, es decir, no es un cultivo “de moda”. Como ya se mencionó, el mercado agrícola es uno de los más dinámicos en la economía. Las marginalidades anuales se encuentran incorporadas en la plataforma computacional.

Los escenarios analizados se describen a continuación.

### 4.1.1 Escenarios Analizados

El sistema de riego que se consideró para esta evaluación contempla una captación subterránea asumiendo que el caudal disponible es lo suficientemente grande para satisfacer la demanda de cada escenario, por lo que no se requiere un estanque de acumulación y sólo se necesita una bomba (ver esquema 2 de la Figura 3.5).

Se consideró una demanda de agua, en el mes de máximo consumo, de 1 [l/s/ha] la cual será entregada mediante goteros. El marco de plantación será de 4 x 4 metros.

Los terrenos suponen una pendiente despreciable y la altura manométrica considerada, es tal que, se pueda entregar la presión necesaria al equipo de riego más alejado de la captación.

Las bombas son marca Caprari, de fabricación Italiana, y han sido seleccionadas procurando tener una eficiencia máxima cuando se tiene la mayor demanda de agua.

La siguiente tabla describe las características y bombas seleccionadas de cada escenario de simulación.

**Tabla 4.1: “Descripción Escenarios de Simulación”**

	Escenario 1	Escenario 2	Escenario 3	Escenario 4
Superficie [ha]	1	5	10	20
Caudal [m <sup>3</sup> /hr]	3,6	18,0	36,0	72,0
H [m]	20	23	26	30
N° de Plantas	625	3.125	6.250	12.500
Bomba + Motor	E4XP30 /5+ MC405-8V	E6X40/3 + MCH42-8V	E6SX55/2I + MACX65-8V	E9S50N /2C + MAC612-8V
Potencia Nominal [HP]	0,5	2,0	5	12

La demanda de agua varía de forma mensual según la evapotranspiración potencial y el coeficiente de cultivo ( $k_c$ ). Dado que se ha supuesto el valor máximo para la demanda, los caudales para los meses restantes se estimarán como el producto de dicho valor y la razón entre el coeficiente de cultivo máximo y el del mes correspondiente, de la forma:

$$Q_m = Q_{max} \cdot \frac{K_{c\ max}}{K_{c\ m}} \quad [3.1]$$

Donde:

- $Q_m$  : Caudal en el mes “m” [m<sup>3</sup>/hr]
- $Q_{max}$  : Caudal para el mes de máxima demanda [m<sup>3</sup>/hr]
- $K_{c\ max}$  : Coeficiente de Cultivo en el mes de máxima demanda
- $K_{c\ m}$  : Coeficiente de cultivo en el mes “m”

La Tabla 4.2 muestra los caudales para los distintos meses en cada escenario

**Tabla 4.2: “Caudales mensuales para cada escenario”**

	sep	oct	nov	dic	ene	feb	mar	abr
$k_c$	0,25	0,50	0,75	1,00	1,10	1,10	1,10	0,85
	Caudal [m <sup>3</sup> /hr]							
Escenario 1	0,8	1,6	2,5	3,3	3,6	3,6	3,6	2,8
Escenario 2	4,1	8,2	12,3	16,4	18,0	18,0	18,0	13,9
Escenario 3	8,2	16,4	24,5	32,7	36,0	36,0	36,0	27,8
Escenario 4	16,4	32,7	49,1	65,5	72,0	72,0	72,0	55,6

Ahora bien, como las curvas de operación de las bombas son únicas<sup>5</sup>, la altura manométrica y eficiencia cambian para cada caudal, por lo cual, la potencia también varía. En la Tabla 4.3 se muestran los valores correspondientes para cada escenario.

**Tabla 4.3: “Puntos de operación de cada caudal”**

Escenario 1				Escenario 2			
Q [m <sup>3</sup> /hr]	H [m]	Ef. [%]	Pot. [KW]	Q [m <sup>3</sup> /hr]	H [m]	Ef. [%]	Pot. [KW]
0,8	30,2	25,9	0,2	4,1	Fuera de Rango		
1,6	28,6	45,5	0,3	8,2	Fuera de Rango		
2,5	26,5	57,8	0,3	12,3	29,4	66,2	1,4
2,8	25,6	60,6	0,3	13,9	27,9	70,1	1,4
3,3	24	64	0,3	16,4	25,2	72,5	1,5
3,6	22,9	65,4	0,3	18,0	23	71,3	1,5
Escenario 3				Escenario 4			
Q [m <sup>3</sup> /hr]	H [m]	Ef. [%]	Pot. [KW]	Q [m <sup>3</sup> /hr]	H [m]	Ef. [%]	Pot. [KW]
8,2	31	28,9	2,2	16,4	Fuera de Rango		
16,4	29,8	51,3	2,5	32,7	41	59	5,9
24,5	28,9	66,8	2,8	49,1	38,3	69,1	7,4
27,8	28	71	2,9	55,6	37	71,6	7,9
32,7	27,3	75,6	3,1	65,5	34,7	74,2	8,4
36,0	26,6	77,9	3,3	72,0	32,9	75,2	8,7

Todo lo anterior define las condiciones hidráulicas para la simulación. Ahora, las opciones para ejecutarla, son las siguientes:

- Aerogeneradores a simular: BWC XL1, Kestrel 1000, Kestrel 3000, SkyStream 3.7 y Whisper 500
- Tensión del sistema: 24V
- Ef. del regulador de carga: 70%
- Ef. del Inversor: 95%
- Máximo días sin agua: 15

<sup>5</sup> Las curvas de operación para cada bomba se adjuntan en el Anexo III

- Máximo días continuos sin agua: 8
- Periodo de simulación: Noviembre a Febrero.
- Estación empleada: Faro Carranza
- Valor del Diesel: 1000 [\$/l] (Incluye costo de transporte, almacenamiento y seguridad)
- Tarifa Eléctrica BT1: 172 [\$/KWh]

Con todo lo anterior, se dispone de los datos requeridos para ejecutar la plataforma computacional.

#### 4.1.2 Resultados

A continuación se mostrarán, gráficamente, los resultados, obtenidos con la plataforma computacional, de los 4 escenarios analizados, más un análisis de sensibilidad para ver las variaciones de la rentabilidad en distintas situaciones. Los resultados más relevantes del análisis, arrojados por la plataforma computacional, se muestran en el Anexo IV.

El objetivo de esta presentación, es mostrar las condiciones más relevantes que influyen en la rentabilidad de instalar aerogeneradores, en un cultivo de cerezos para la zona descrita anteriormente. Para ver el detalle completo de la Simulación y Evaluación Económica, remitirse a los archivos correspondientes en el anexo digital.

El primer gráfico muestra la rentabilidad de los aerogeneradores, asociada a la superficie plantada y los días de falla del sistema.

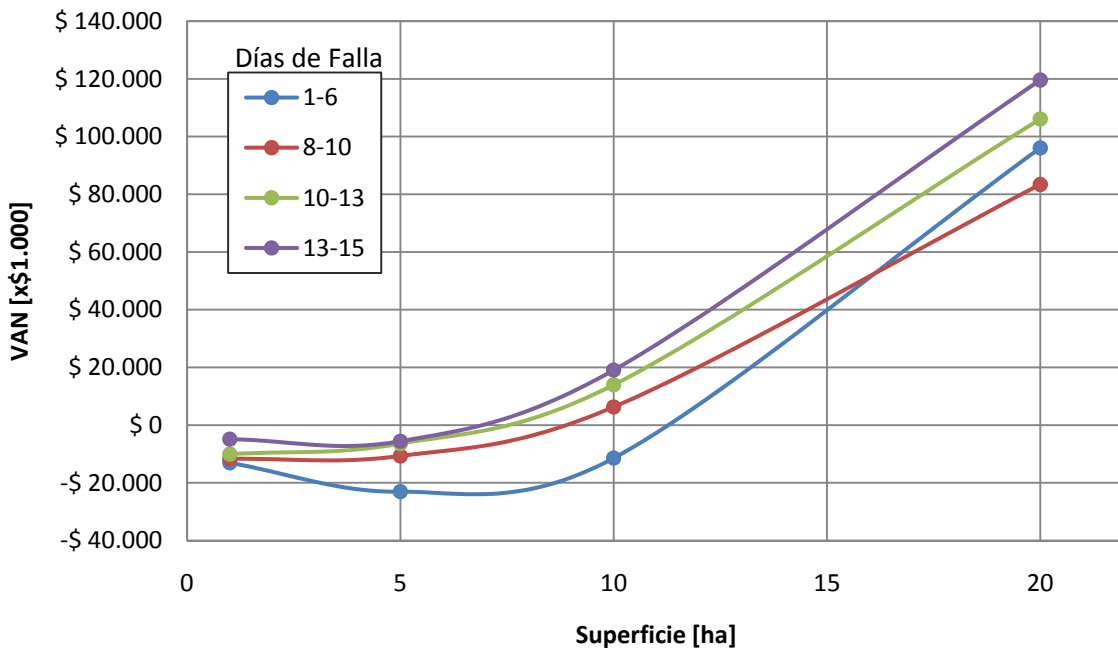


Gráfico 4.1: “Rentabilidad de Aerogeneradores dependiente del tamaño predial y días de falla”



Se puede observar que, una mayor seguridad energética implica tener un menor VAN dado que la inversión inicial es más alta. Ahora bien, la seguridad energética está directamente relacionada con la seguridad de riego, por lo que podría tenerse una menor producción o calidad si la seguridad es baja. Esto se reflejará en un gráfico más adelante.

A continuación, se muestra la rentabilidad comparada de utilizar distintos tipos de energías para el riego tecnificado, particularmente un generador diesel, red eléctrica y los aerogeneradores. Este análisis se relaciona con la superficie plantada, indicando, para cada una, la energía consumida.

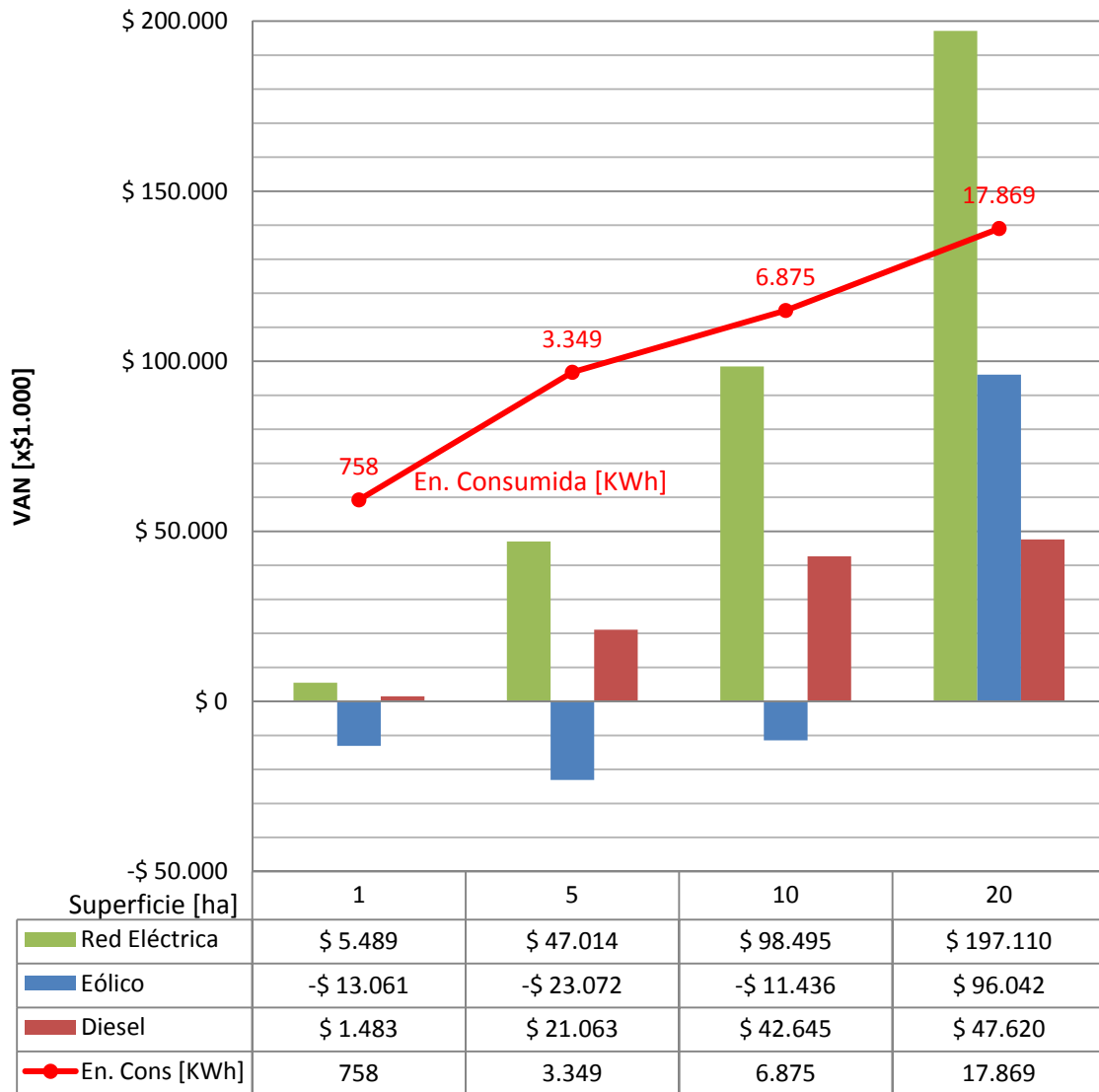


Gráfico 4.2: “Rentabilidad comparada entre distintos tipos de fuentes de energía”

Este gráfico está confeccionado con la opción más segura de cada escenario, es decir, aquella que permite tener la mejor factibilidad energética.

Para superficies hasta 10 hectáreas, los aerogeneradores muestran una rentabilidad negativa, pero cuando se llega a las 20 hectáreas plantadas, es positiva e incluso mayor a la de un sistema diesel. Esto se debe a que el costo del combustible para generar la energía necesaria en el periodo de riego, es

elevado, tanto así que, para mayores superficies, la tasa de crecimiento del VAN comienza a disminuir. El sistema conectado a la red eléctrica siempre muestra un VAN positivo y mayor al eólico.

Uno de los mayores inconvenientes en la factibilidad energética de los aerogeneradores, es que, de la energía generada, sólo alrededor de una cuarta parte es utilizada (ver Gráfico 4.3).

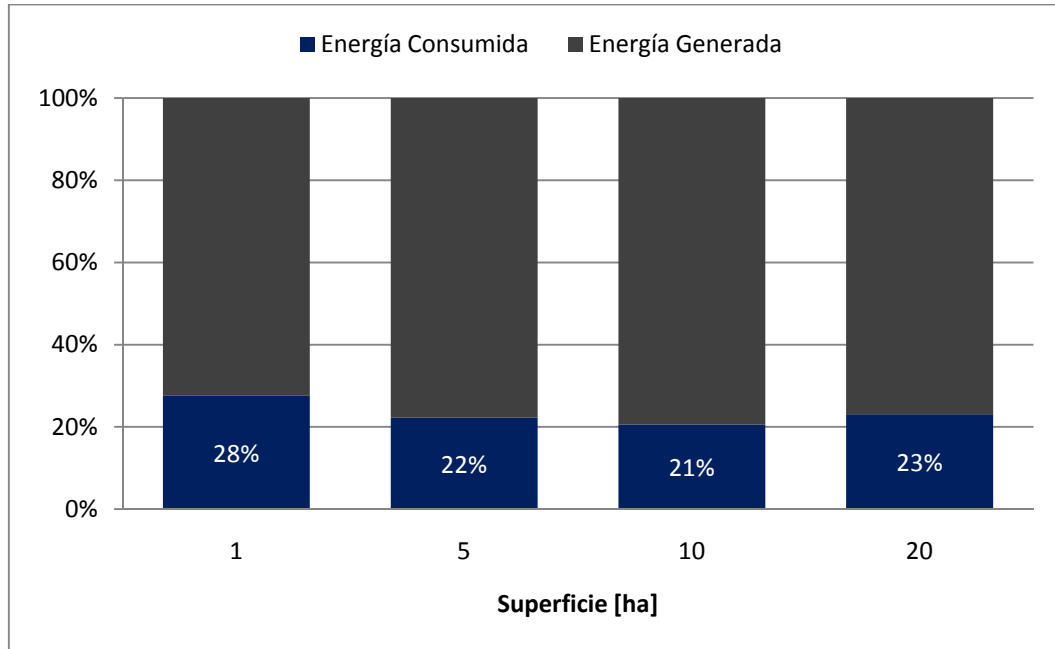


Gráfico 4.3: "Energía Consumida vs. Energía Generada"

En lo anterior influyen dos factores fundamentales: El primero, es la variación temporal de la velocidad del viento, que implica no poder abastecer siempre la potencia requerida por las bombas, que demandan una potencia constante en las horas riego. Y la segunda, es que almacenar toda la energía restante implica costos excesivos y, por ende, una disminución en la rentabilidad.

A continuación, se mostrarán los resultados del análisis de sensibilidad tomando como base, la opción más segura de los 4 escenarios. Se realizarán evaluaciones para 7 situaciones distintas que se listan en la Tabla 4.4:

Tabla 4.4: "Variación de parámetros para análisis de sensibilidad"

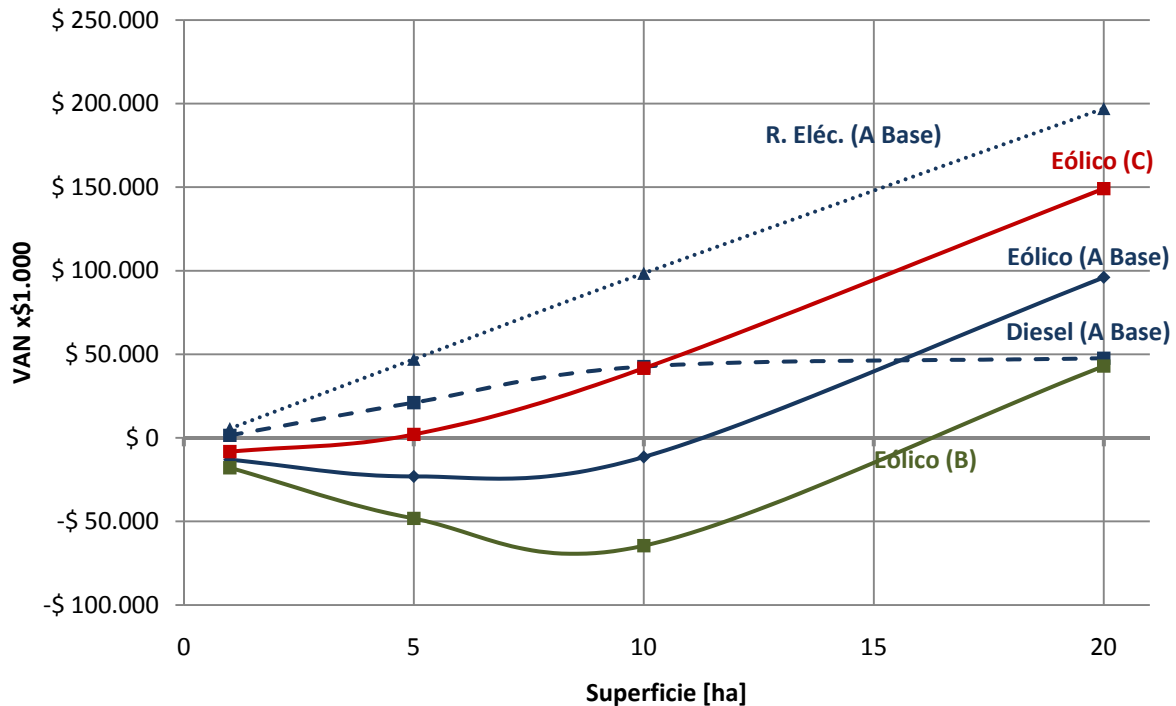
Parámetro	Caso	Variación	Causa
	A	Caso Base	
Inversión en Aerogeneradores	B	Aumenta un 50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor costo de componentes</li> </ul>
	C	Disminuye un 50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Menor Costo de Componentes</li> </ul>
Productividad	D	Aumenta un 25%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Buena elección de generadores</li> <li>• Equipos eficientes</li> <li>• Viento favorable</li> </ul>
	E	Disminuye un 25%	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Equipos no adecuados para el proyecto</li> <li>• Viento no favorable para generación</li> </ul>

Tabla 4.4: “Variación de parámetros para análisis de sensibilidad”

Parámetro	Caso	Variación	Causa
Subsidio Estatal	F	Aporte de un 75% de la inversión	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bonificación por concurso de la ley 18.450 u otras.</li> </ul>
Costos de Energías convencionales	G	Aumentan un 50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Mayor valor del Diesel</li> <li>Escasez de Energía</li> <li>Agotamiento de los recursos</li> </ul>
	H	Disminuyen un 50%	<ul style="list-style-type: none"> <li>Menor valor del Diesel</li> <li>Mayor oferta energética</li> </ul>

El primer gráfico del análisis de sensibilidad, corresponde a la evaluación de los casos B y C donde se muestra lo que ocurre con una variación en la inversión inicial en aerogeneradores.

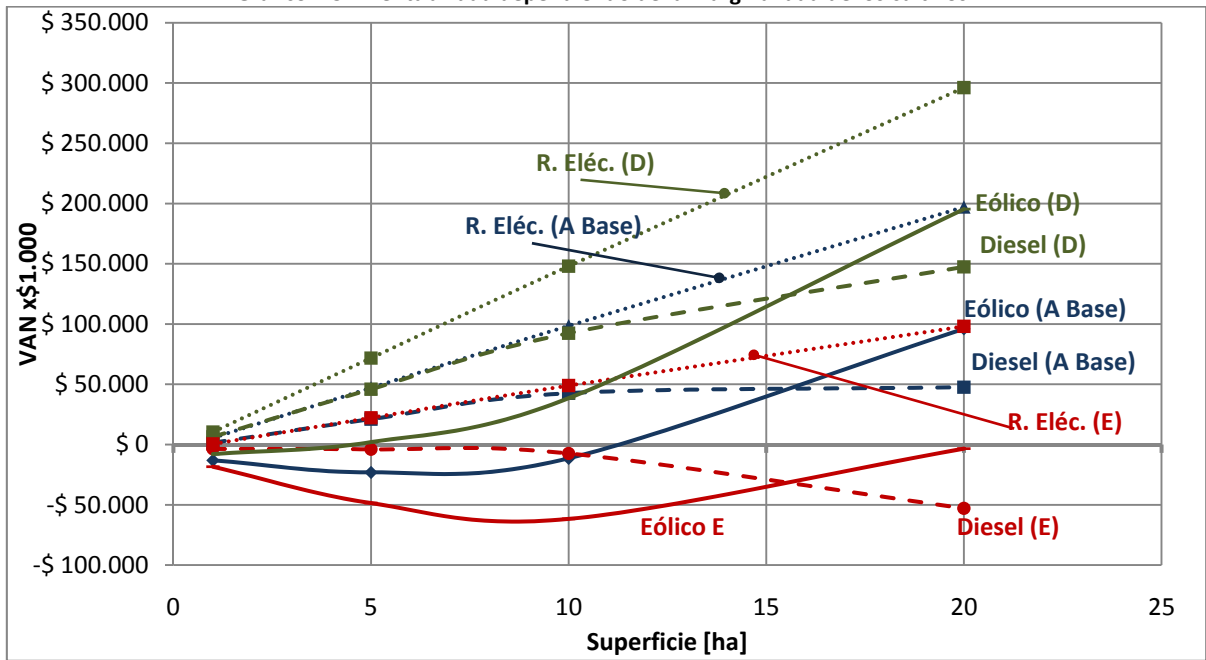
Gráfico 4.4: “Rentabilidad dependiendo de la inversión en aerogeneradores”



La rentabilidad en este caso, como era de esperarse, está directamente relacionada con la inversión. A mayor y menor inversión, menor y mayor rentabilidad, respectivamente. Ahora bien, cuando la inversión en aerogeneradores es menor, se puede superar la rentabilidad de un sistema diesel con una menor superficie plantada.

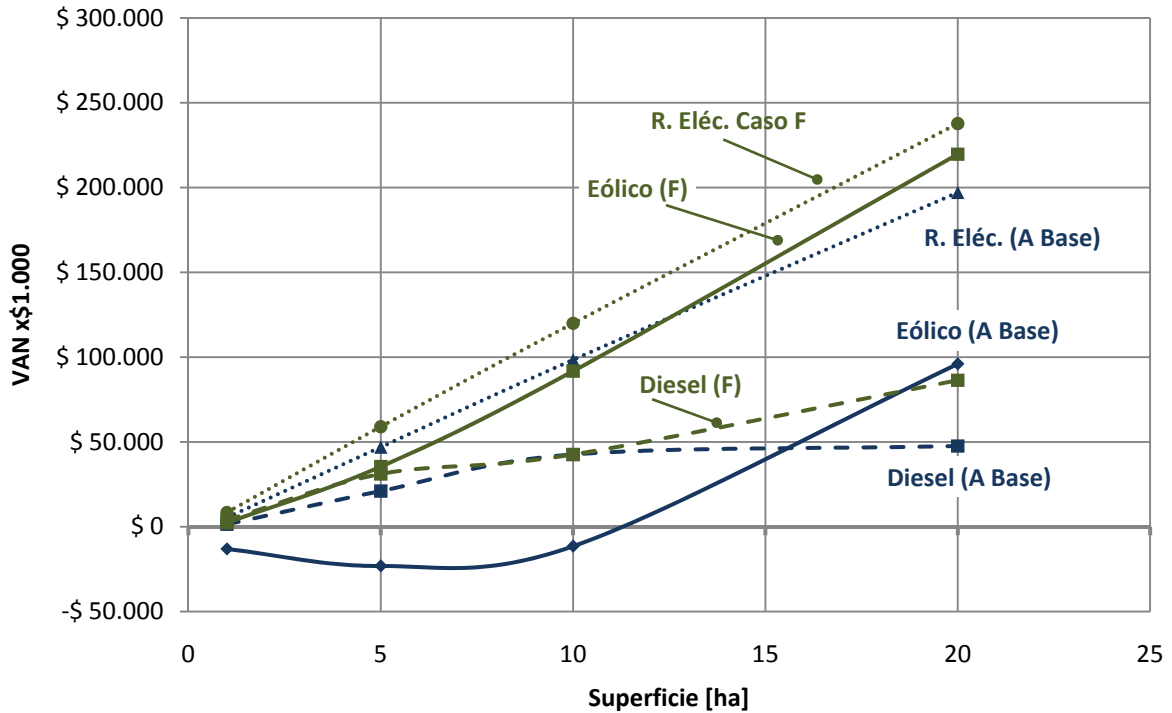
En el Gráfico 4.5 se muestra la dependencia de la rentabilidad con la producción de los cerezos. Obviamente, si ésta baja, la marginalidad baja y la rentabilidad de los aerogeneradores cae de forma considerable. De igual forma pasa con las alternativas convencionales de energía. En caso contrario, la rentabilidad aumenta en todas las alternativas energéticas.

Gráfico 4.5: “Rentabilidad dependiendo de la marginalidad de los cultivos”



Un subsidio estatal ciertamente aumentaría la factibilidad de instalar aerogeneradores ya que disminuye la inversión inicial. Ahora bien, los concursos de la ley 18.450 bonifican las instalaciones eléctricas, independiente de cuál sea su fuente, por lo que la rentabilidad de las otras alternativas también aumenta. El Gráfico 4.6 refleja esta situación.

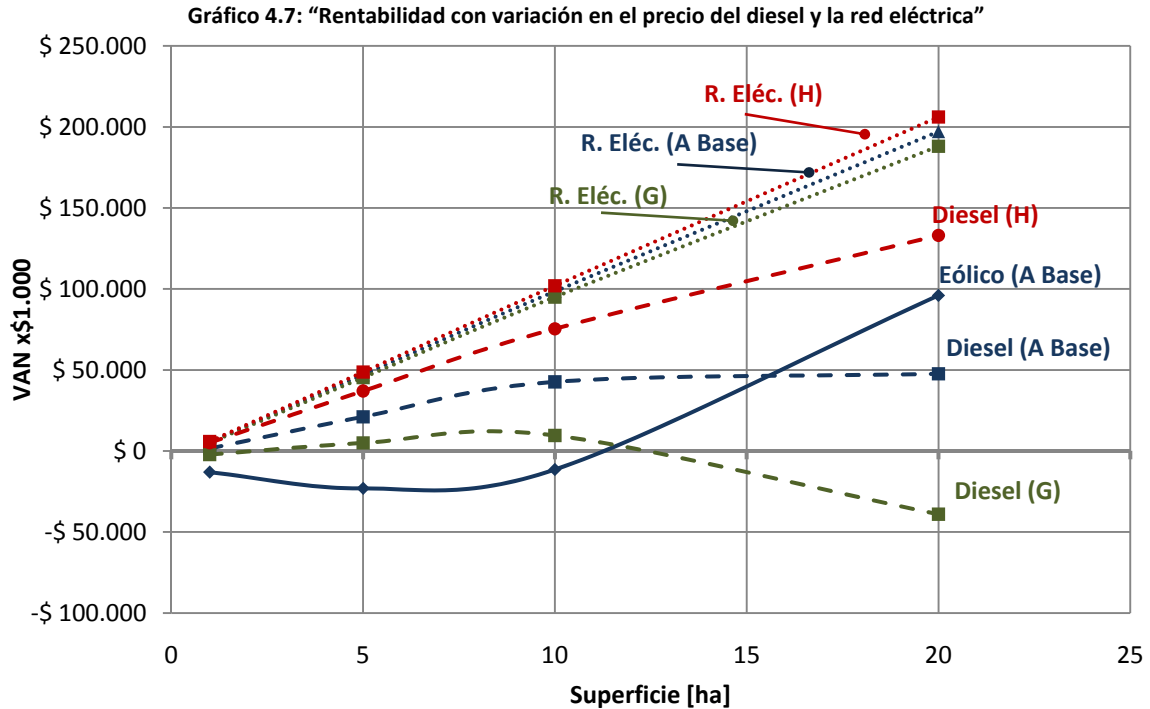
Gráfico 4.6: “Rentabilidad cuando hay subsidio estatal”



La bonificación en los aerogeneradores aumenta significativamente la rentabilidad del sistema, ya que, la inversión inicial es mucho más alta que la de las otras 2 alternativas. Incluso se puede ver que,

luego de las 13 hectáreas, supera la de la opción conectada a la red eléctrica. La opción diesel es excedida completamente.

Por último, en el Gráfico 4.7, se muestra la incidencia de variaciones en el precio de la energía basada en diesel y la red eléctrica.



En un sistema basado en diesel, la variación del precio es trascendental para su rentabilidad. Si este aumenta, disminuye fuertemente la rentabilidad, siendo el generador eólico más atractivo cuando se superan las 12 hectáreas plantadas. Se puede ver también que para un valor elevado del diesel y superficies plantadas grandes, la rentabilidad puede llegar a ser negativa.

En el caso de la red eléctrica, la variación no es significativa y siempre su rentabilidad es mayor a la de los aerogeneradores.

## 5 CONCLUSIONES

---

### 5.1 PLATAFORMA COMPUTACIONAL

El trabajo realizado se presenta por la necesidad de evaluar el uso de alternativas energéticas sustentables en la agricultura, particularmente en el riego. Esta iniciativa parte como una inquietud de la Comisión Nacional de Riego, que pretende subsidiar instalaciones de este tipo a través de concursos de la Ley 18.450, y en el futuro elaborar términos de referencias para licitar un estudio acabado respecto a este tema, mediante el departamento de Estudios y Desarrollo de la CNR.

Lo realizado, cumple con dos objetivos fundamentales:

1. Contar con una plataforma de apoyo para la evaluación de proyectos eólicos que se presenten a los concursos de la Ley.
2. Tener un primer acercamiento al tema de energías renovables no convencionales, permitiendo conocer las dificultades, beneficios, variables trascendentales y otros alcances que faciliten la elaboración de requerimientos en futuros términos de referencia para estudios.

La plataforma computacional desarrollada funciona como un simulador, donde se prueban todas las combinatorias posibles entre los datos que ingrese el usuario más la base de datos que dispone la herramienta. Es capaz de entregar una evaluación de prefactibilidad técnica – económica para instalar rotores eólicos en un sistema de riego tecnificado, con el fin de poder generar la energía requerida por las bombas hidráulicas, y así evitar el uso de energías no renovables y contaminantes.

El software abarca variables hidráulicas, eléctricas y meteorológicas en el proceso de Simulación, en el cual se determina la factibilidad energética; y, para la Evaluación Económica, distintas variables para poder realizar el flujo de caja correspondiente, y así entregar un indicador que sugiera una determinada prefactibilidad.

Los resultados entregados permiten al usuario tomar una decisión sobre que generador instalar teniendo en cuenta dos condiciones principales:

1. La seguridad energética dentro del periodo de riego, medida a través de días de falla.
2. La rentabilidad económica medida a través del VAN y/o TIR, donde se involucra la marginalidad de un cultivo y las inversiones respectivas.

Esta plataforma presenta una serie de ventajas y desventajas, así como algunas restricciones en su operación. Todo esto se describe a continuación.

### 5.1.1 Ventajas

- Es posible evaluar las instalaciones más típicas en el riego tecnificado, que corresponden a:
  1. Captación Subterránea → Bomba → Estanque → Bomba → Equipo de Riego
  2. Captación Subterránea → Bomba → Equipo de Riego
  3. Captación Superficial → Estanque → Bomba → Equipo de Riego
- El usuario tiene la posibilidad de hacer la evaluación económica, de forma simultánea, a una selección de 4 alternativas de generadores factibles, que entrega como resultado la simulación.
- Los flujos de caja se muestran de forma detallada por lo que, además de los indicadores que se entregan como resultado, el usuario puede calcular otros que le sean de utilidad.
- La evaluación económica incorpora la rentabilidad del cultivo, por lo que se podría definir para qué cultivos, qué superficie plantada y en qué zonas es factible instalar los generadores eólicos.
- Simultáneamente a la evaluación económica de los aerogeneradores, se realiza para las alternativas de un generador diesel y una conexión a la red eléctrica, permitiendo así, realizar una comparación de rentabilidad entre ellas.
- Las bases de datos son actualizables, por lo que puede variarse los tipos de aerogeneradores, marginalidades de los cultivos, años de evaluación, etc.
- La plataforma se presenta mediante una interface sencilla en Microsoft Excel, lo que permite ser usada por una gran cantidad de usuarios.
- El contar con una herramienta computacional, de código abierto y modificable, permite además ir realizando mejoras constantes en el tiempo, ya sea para ampliar las opciones de simulación, modificar los resultados desplegados ó ajustar los algoritmos de operación, según las necesidades de cada usuario.

### 5.1.2 Desventajas

- La forma de operación de las bombas es única, pudiendo variar sólo la hora de inicio del riego. Este punto es fundamental ya que, podría darse el caso, que una operación distinta de las bombas pueda reducir la cantidad de elementos de generación y almacenamiento eléctrico, reduciendo la inversión.
- El punto anterior podría solucionarse cambiando el código del programa, pero siempre se mantendrá una única operación en la simulación. No busca la mejor alternativa de operación, en otras palabras, no es un proceso de optimización.
- La simulación se hace sólo para una temporada de riego, por ejemplo: Noviembre → Febrero del 2006 → 2007. Entonces, para obtener una impresión más acabada de la factibilidad, se podría

realizar la misma simulación, pero para más temporadas, por ejemplo: 1997 → 1998, 2001 → 2002, etc.

- La programación de la herramienta fue realizada en Visual Basic, lenguaje intrínsecamente ineficiente, por lo que ésta puede ser perfeccionada con una mejor programación.

## 5.2 PRUEBA DE LA HERRAMIENTA

Se analizó la prefactibilidad técnica – económica de instalar generadores eólicos en un cultivo de cerezos para un predio de la VII región del Maule, entre las comunas de San Javier, Linares, Cauquenes y Constitución.

El Análisis se realizó empleando la herramienta computacional diseñada, obteniendo así una serie de resultados que permiten tomar una decisión dependiendo de las condiciones del lugar. Se hizo una comparación entre las distintas alternativas energéticas, y se determinó la rentabilidad según la seguridad energética ofrecida por un sistema eólico. Además, se hizo un análisis de sensibilidad para relacionar la rentabilidad con diferentes factores que pueden ser significativos en ella, esto son: inversión inicial en aerogeneradores, volumen de producción de cerezas, subsidio estatal y costo de las energías convencionales.

De los resultados presentados en el capítulo 4, se puede concluir lo siguiente:

Contar con una mayor seguridad energética implica tener una inversión inicial mayor en aerogeneradores, por lo que la rentabilidad disminuye a medida que ésta aumenta (Gráfico 4.1). Luego, una menor seguridad energética implica una mayor rentabilidad. Cabe recordar que las restricciones de seguridad se impusieron de forma tal que, aún cuando se opte por la menor, esto no afecte al cultivo, y la producción y calidad de las cerezas se mantenga. Entonces, esto sólo es válido hasta los 15 días de falla total y 8 días continuos.

Al comparar la rentabilidad entre las distintas alternativas energéticas (Gráfico 4.2), es claro que la conexión a la red eléctrica es la más rentable, y mantiene esto a medida que aumenta la superficie plantada. En el caso de los aerogeneradores, a medida que la superficie plantada aumenta, la rentabilidad también aumenta, pasando de un VAN negativo para 5 hectáreas a uno positivo en las 20. Esto se explica porque la alta inversión inicial, se amortiza a lo largo de los años al no incurrir en gastos energéticos y el bajo costo de mantención de los equipos. Contrariamente, en el caso del generador Diesel la tasa de rentabilidad disminuye con el aumento de la superficie plantada, esto se debe a que es necesaria más energía para poder regar y el costo del combustible es elevado, castigando la baja inversión inicial.

Uno de los mayores problemas para obtener una seguridad energética aceptable, es el aprovechamiento de la energía generada. Como se aprecia en el Gráfico 4.3, alrededor de un 20% del total generado es utilizado por las bombas de riego. La magnitud de la energía perdida, en todo el periodo de simulación, va desde los 2 [GWh] para 5 hectáreas y los 60 [GWh] para 20 hectáreas. Esto



implica que si quiere aumentar la seguridad, es necesario aumentar la inversión en baterías, monto que se debe repetir cada 5 años, por lo que la rentabilidad del sistema disminuye.

Lo anterior se puede explicar por la variación temporal de la velocidad del viento que no permite tener una potencia constante en el día, como lo demandan las bombas de riego. A diferencia de un hogar, que tiene peaks de potencia en el día, el riego demanda una potencia constante durante todas sus horas de riego.

Una menor inversión inicial en aerogeneradores ciertamente aumenta la rentabilidad de esta opción energética, siendo incluso más atractiva que la de un generador diesel. La menor inversión puede ir asociada a dos factores: El primero, a una disminución de los precios por mayor oferta o mejor tecnología, y el segundo, a un subsidio estatal. Esto queda reflejado en el Gráfico 4.4 y Gráfico 4.6, respectivamente.

Es claro que, un subsidio por parte del estado, en estas tecnologías, fomentaría el uso de energías renovables, particularmente la eólica, en proyectos de riego tecnificado, dado que la rentabilidad aumenta de forma significativa con respecto a las alternativas convencionales. Otros mecanismos de fomento también podrían dar mayores rentabilidades como una disminución de impuestos y una depreciación acelerada.

El volumen de producción se puede ver afectado por diversos factores, a lo largo de los años de producción, tales como: baja seguridad energética no permitiendo tener un riego aceptable, cambios en las condiciones climáticas, años secos, enfermedades en el cultivo, etc. Esta baja implica una disminución de la marginalidad por hectárea, lo que afecta de forma considerable la rentabilidad de todas las opciones energéticas (Gráfico 4.5), pudiendo incluso llegar a la decisión de cambiar el cultivo. En caso contrario, si hay factores que benefician la producción, se puede llegar a tener rentabilidades importantes y poder optar por la opción energética de aerogeneradores.

Al aumentar el precio de las fuentes convencionales de energía, la opción diesel es la más sensible, pudiendo llegar a rentabilidades negativas si el valor por litro aumenta demasiado. Hay que considerar que se debe contemplar el gasto de transporte y almacenaje del combustible. En el caso de la red eléctrica, si la tarifa aumenta hasta un 50%, la variación de la rentabilidad no es significativa manteniéndose siempre mayor a la de los aerogeneradores.

A modo general, de la simulación realizada, se puede mencionar lo siguiente:

De la simulación realizada se puede concluir que para superficies pequeñas la factibilidad energética es mayor y la económica menor, en tanto para superficies grandes la factibilidad energética disminuye, pero aumenta la económica.

No basta con que la rentabilidad de la opción eólica sea positiva por sí sola, si no también debe ser más atractiva que las alternativas convencionales. Para esto se puede bonificar en mayor porcentaje, o dar incentivos tributarios exclusivos, a la implementación de fuentes de energías renovables no convencionales.

La rentabilidad del generador diesel es la más sensible a los cambios económicos dado que el gasto en combustible aumenta con la superficie plantada y castiga su baja inversión inicial.

La inversión inicial en aerogeneradores es elevada, pero se ve beneficiada por los bajos costos de mantención y el no incurrir en gastos por energía.

Es importante recordar que el objetivo de la plataforma es dar una recomendación de prefactibilidad, por lo que es importante realizar un análisis más acabado para las alternativas que se escojan.

### **5.3 COMENTARIOS GENERALES**

Al momento de evaluar la instalación de aerogeneradores, u otro generador basado en ERNC, en sistemas de riego tecnificado, es fundamental saber la disponibilidad de los recursos renovables en el sector, ya que estos varían de una zona a otra, pudiendo encontrar opciones más factibles para un caso u otro.

Dado lo anterior, es claro que no basta sólo con evaluar una alternativa energética, sino más bien, varias, lo que permitiría tener la mejor opción dada la zona donde se encuentre el proyecto, pudiendo incluso llegar una opción híbrida entre las tecnologías.

En lugares donde, por razones como la distancia, condiciones geográficas, etc. no hay abastecimiento energético desde la red eléctrica, o donde el costo de transportar y almacenar combustible es elevado. Las energías renovables aparecen como una alternativa atractiva para tecnificar el riego en dichos sectores, aún cuando la inversión sea elevada.

La accesibilidad a registros meteorológicos es una de las barreas más significativas encontradas al momento de querer realizar una evaluación para instalar generadores basados en ERNC. Las redes de estaciones actuales, que pertenecen a la Dirección Meteorológica de Chile (DMC), no permiten contar con registros de forma fácil, es necesario comprarlos o “conseguirlos”. Además de esto, la distribución de las estaciones es escasa, por lo que no se puede contar con datos en todos los sectores de interés. Con el fin de dar una solución a este último problema, la Comisión Nacional de Energía, en conjunto con el departamento de Geofísica de la Universidad de Chile, a través de un modelo meteorológico, diseñaron un Mapa Eólico Nacional, que permite, mediante una interface computacional y en línea, saber la velocidad media del viento en cualquier punto geográfico del país. Lamentablemente, hasta la fecha, este mapa sólo entrega resultados para los meses de Marzo, Junio, Septiembre y Diciembre, entre las regiones I y IV.

Una de las principales conclusiones de este trabajo es que la variación temporal de la velocidad del viento, es uno de los factores más influyentes al momento de evaluar la viabilidad de instalar un aerogenerador en un proyecto de riego tecnificado, ya que, la potencia generada varía directamente con ella, lo que implica una generación variable en día, mientras que el consumo de las bombas es constante dentro de las horas de riego, y muchas veces elevado.

Es por esto, que es importante contar con una estadística, de vientos, amplia y confiable que, al menos, permita hacer una evaluación en 3 temporadas distintas, o se pueda confeccionar una serie de datos de viento “promedio” empleando algún modelo, en base a los registros disponibles, con la cual hacer la simulación. Con esto se podría contar con una evaluación más confiable.

Aún así, es recomendable tener alguna otra alternativa energética de respaldo, que permita suplir la falta de energía, cuando la abastecida por el recurso eólico no sea suficiente.

La alta inversión inicial de esta tecnología, se ve compensada por los casi nulos costos de mantención a los equipos, más el beneficio de reducir el empleo de energías contaminantes. Sin embargo, esto no es siempre suficiente para tomar la decisión de ocupar energías limpias. Es indispensable contar con incentivos estatales para poder implementar estas tecnologías. El uso de instrumentos como subvenciones o beneficios tributarios, ciertamente fomentarían el estudio e instalación de sistemas de energías renovables, pudiendo así, desarrollar una agricultura sustentable.

Una alternativa para poder aprovechar mayor cantidad de energía, y ahorrar en la inversión de baterías, podría ser entregar a la red eléctrica toda la potencia generada por los sistemas de ERNC y negociar con la compañía eléctrica una tarificación menor a la estándar, para la temporada de riego.

Otro punto a favor, que no se evalúa en este trabajo, es la externalidad positiva de poder contar con energía para otros usos, fuera de la temporada de riego. Esta externalidad implicaría reducir los gastos eléctricos, ya sea en el hogar u otra actividad productiva, que incluso, podrían hacer factible, económicamente, el proyecto agrícola.

En este trabajo sólo se evaluó la energía eólica, pero en general los sistemas de riego están dispuestos en sectores donde es posible aprovechar, además, la energía solar. Esto implica que se podrían adoptar paneles fotovoltaicos o una opción híbridas de energía (solar – eólica), haciendo más atractivo el uso de estas energías. Dado esto, se propone como extensión a esta plataforma agregar una simulación solar que permita realizar la evaluación de esta opción.

Por último, como complemento a este trabajo, se podría plantear un modelo de optimización multi objetivo, que permita definir la operación de las bombas, de forma tal, que se maximice el uso de la energía generada y maximice la rentabilidad del proyecto. Para esto se podría integrar más de un tipo de energías renovables y buscar la mejor opción híbrida. Incluso, podría añadirse un generador a combustión interna, agregando el objetivo de minimizar el uso de este.

Un ejemplo de lo anterior es la recién inaugurada microred aislada de generación eléctrica a base de Energías Renovables No Convencionales de Chile, denominada ESUSCON (Energía Sustentable Cóndor), que alimenta de energía eléctrica al pueblo de Huatacondo, ubicado a 230 kilómetros al sureste de Iquique, en la comuna de Pozo Almonte, el cual tiene una población cercana a los 80 habitantes. Dentro de los objetivos de esta instalación está el abastecer el agua potable de forma constante y eficiente. El proyecto es resultado de un modelo de optimización entre el uso de energía solar, eólica, diesel y baterías (FCFM, 2010).

## 6 BIBLIOGRAFÍA

---

1. Betz, A. (1926). *Wind-Energie*.
2. CNE. (2009). *Energías Renovables No Convencionales*. Recuperado el 26 de Enero de 2010, de sitio web Comisión Nacional de Energía: <http://www.cne.cl>
3. CNE. (2008). *Política Energética: Nuevos Lineamientos*. Comisión Nacional de Energía, Chile.
4. CNR. (2009). *Bases del Concurso 20*. Recuperado el 26 de Enero de 2010, de sitio web CNR: <http://www.cnr.cl>
5. CNR. (2006). *Política Nacional de Riego y Drenaje*. Comisión Nacional de Riego, Chile.
6. CNR-PROCIVIL. (2010). *Análisis Comparado entre Conducción Entubada y Abierta en Canales de Riego*. Santiago, Chile.
7. Dominguez, F. J. (1974). *Hidráulica*. Santiago, Chile: Universitaria.
8. Doorenbos, J., & Pruitt, W. O. (1977). Crop water requirements. *Irrigation and Drainage* , Paper 24.
9. FCFM. (10 de Septiembre de 2010). *Boletín Informativo*. Recuperado el 14 de Octubre de 2010, de <http://ing.uchile.cl/boletin/noticia.php?id=15512>
10. INE. (2007). *Censo Agropecuario*. Instituto Nacional de Estadísticas, Chile.
11. INIA, CNR. (1999). *Elementos de Riego Tecnificado*. Instituto de Investigación Agropecuaria, Chile.
12. Jara, J., & Valenzuela, A. (1998). *Necesidades de agua de los cultivos*. Universidad de Concepción, CNR, Chillán, Chile.
13. Jeria, H. (2002). *Algunos aspectos que dimensionan la importancia del riego en Chile*. CNR, Chile.
14. Navas, M. (2009). *Riego Tecnificado con Energía Eólica en el Norte de Chile*. Santiago, Chile.
15. Reinke, G. (2008). *Contribución potencial de energías renovables no convencionales (ERNC) al SIC al año 2025*. Universidad Técnica Federico Santa María.
16. Ven Te Chow. (1994). *Hidrología Aplicada*. McGRAW-HILL.
17. Wyatt, A. (1992). Sistemas de bombeo electro eólicos: Estimación de tamaños y costos. *En: Seminario sobre el bombeo de agua mediante energía solar y eólica*. Ciudad de México, México.

