

## RESUMEN

### **Desarrollo de herramientas de medición para la optimización de equipos de generación de energía eólica de baja potencia, basadas en Plataforma Arduino**

*En esta tesis se desarrolla e implementa un sistema de medición de datos, de código abierto y de bajo costo, basado en la plataforma Arduino, con el objeto de estudiar el recurso eólico de una determinada zona para un correcto dimensionamiento y funcionamiento del sistema energético. Se analizan los comportamientos de los aerogeneradores y los hábitos de los consumos eléctricos de los usuarios. Se registraron más de cien mil datos durante aproximadamente tres meses en un aerogenerador de baja potencia, diseño Piggott, previamente instalado en la localidad de General Lavalle, Provincia de Buenos Aires. Mediante un registrador de datos desarrollado en esta tesis, denominado "Data-Duino": se determina la eficiencia del aerogenerador y detectan fallas en el sistema eólico, proponiendo soluciones para lograr un correcto funcionamiento del sistema en estudio. Finalmente se presenta un manual de construcción, montaje e instalación del sistema Data-Duino y sus instrumentos de medición, para que constituya una herramienta útil y económica para usuarios, instaladores y diseñadores de aerogeneradores.*

## ABSTRACT

### **Development of measurement tools for the optimization of low power wind power generation equipment, based on Arduino Platform**

*This thesis develops and implements an open source and low cost data measurement system, based on the Arduino platform, in order to study the wind resource of a specific area for a correct sizing and operation of the energy system. The behavior of the wind turbines and the habits of the electric consumptions of the users are analyzed. More than hundred thousand data were recorded for approximately three months on a low-power wind turbine, Piggott design, previously installed in the town of General Lavalle, Province of Buenos Aires. A datalogger developed in this thesis called "Data-Duino" has determined the efficiency of the wind turbine and detect faults in the wind system, proposing solutions to achieve a correct operation of the system under study. Finally, a manual for the construction, assembly and installation of the Data-Duino system and its measuring instruments was developed to be a useful and economical tool for users, installers and designers of wind turbines.*

# AGRADECIMIENTOS

A mis padres, Hernán y Mercedes por haber estado en cada momento de mi carrera apoyándome paso a paso en este camino, brindándome sus consejos y asistencia.

A mi compañera Verónica que me apoyo y me estimuló para continuar y no abandonar.

A Federico que me abrió las puertas de su establecimiento para que pueda realizar esta tesis.

A mis fieles y silenciosos compañeros Nico y Tamy.

Al ingeniero Esteban Van Dam, que me dio la idea y oportunidad de trabajar en este proyecto

Finalmente a mi director de tesis Magister Sebastián Miguel, por toda su paciencia, por sus correcciones, por defender y entender a quienes innovamos, que no existe emoción más intensa para un inventor que ver alguna de sus creaciones funcionando, esa emoción hace que uno se olvide de comer, de dormir, de todo.

“...A lo largo del universo hay energía: ¿es esta estática o cinética?, en el primer caso nuestras esperanzas son vanas, en el segundo y eso lo sabemos con certeza no es más que cuestión de tiempo para el hombre en tener éxito, en sincronizar su maquinaria con los engranajes mismos de la naturaleza”

Nikola Tesla

# ÍNDICE

I.	INTRODUCCIÓN	13
I.1.	Electrificación Rural	15
I.2.	Extrayendo Energía del Viento	16
I.2.a	Definición Aerogeneradores de Baja Potencia	16
I.2.b	Tipos de Aerogeneradores	16
I.2.c	Instalación Típica de un Sistema Eólico Rural	18
I.2.d	Diseño Piggott	19
I.2.e	Selección del Sitio	20
II.	OBJETIVOS Y ALCANCE	21
III.	ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL	22
III.1.	La Energía Eólica en la Argentina	22
III.2.	Evolución de los Sistemas de Medición Eólica	23
III.3.	Análisis del DataDuino	24
III.3.a	El Rol de <i>Wind Empowerment</i>	24
III.3.b	El Rol de 500 RPM	25
III.3.c	El Rol de la Universidad de Flores	26
IV.	METODOLOGÍA	27
IV.1.	Relevamiento de Datos	27
IV.2.	Evaluación Económica y Construcción del Equipo	27
IV.3.	Instalación del Sistema <i>Data-Duino</i>	27
IV.4.	Mediciones y Recolección de Datos	27
IV.5.	Análisis de Datos y Resultados	27
IV.6.	Cronograma	27
IV.7.	Datos y Métodos	28
IV.7.a	Velocidad de Viento	29
IV.7.b	Dirección del Viento	29
IV.7.c	Sensor de Corriente	29
IV.7.d	Sensor de Voltaje	30
IV.7.e	Variables Auxiliares	30
IV.7.f	Procesamiento de Datos	31
	V.7.g.1 Filtro de Datos	31
	V.7.g.2 Factor de Corrección	31
	V.7.g.3 Caracterización de la Curva de Potencia	31
V.	DESARROLLO	33
V.1.	Caso de Estudio	33
V.1.a	Hábitos del Consumo Eléctrico	35
V.2.	<i>Data-Duino</i> Eólico	35
V.2.a	<i>Shield</i> de Vientos	36
V.2.b	<i>Shield</i> de Corrientes	36
V.3.	Instalación del <i>Data-Duino</i>	37
V.4.	Calibraciones	38
V.4.a	Anemómetro	38
V.4.b	Veleta	39
V.4.c	Voltaje	40
V.4.d	Corrientes	41
	V.4.d.1 Calibración del <i>offset</i>	41

V.5.	Análisis de Costos del <i>Data-Duino</i> . . . . .	42
V.5.a	Equipos de Similares Prestaciones . . . . .	42
VI.	RESULTADOS DE LAS MEDICIONES . . . . .	45
VI.1.	Dirección y Velocidad del Viento . . . . .	45
VI.2.	Datos del Generador Eólico . . . . .	45
VI.2.a	Rendimiento Eléctrico . . . . .	45
VI.2.b	Curva de Potencia . . . . .	46
VI.2.c	Influencia del Banco de Baterías . . . . .	48
VI.2.d	Producción Anual de Energía (AEP) . . . . .	48
	V.4.d.1 Cálculo de Energía: Método de la Curva de Potencia . . . . .	50
VI.3.	Datos de Consumo . . . . .	50
VI.3.a	Regulador de Carga . . . . .	52
VII.	CONCLUSIONES . . . . .	53
VII.1.	Fortalezas y Conclusiones del Caso de Estudio . . . . .	53
VII.2.	Conclusiones Finales . . . . .	54
VII.2.a	Recomendaciones . . . . .	54
	BIBLIOGRAFÍA . . . . .	56
	APÉNDICES . . . . .	58
I.	MANUAL DEL DATA-DUINO . . . . .	58
I.1.	MANUAL DE MONTAJE Y INSTALACIÓN . . . . .	58
I.1.a	Montaje del PCB . . . . .	58
I.1.b	Pilas externas o Banco de Baterías . . . . .	60
I.1.c	Mecanizado de la Caja Eléctrica . . . . .	60
I.1.d	Cableado del Anemómetro y la Veleta . . . . .	61
I.1.e	Cableado de los Sensores de Corriente . . . . .	62
I.2.	MANUAL DE CONFIGURACIÓN <i>DATA-DUINO</i> . . . . .	64
I.2.a	Compilación del Código Arduino al <i>Data-Duino</i> . . . . .	64
I.2.b	Configuración de la Referencia . . . . .	65
I.2.c	Configuración del Tiempo y la Fecha . . . . .	66
I.2.d	Configuración de la Frecuencia de Muestreo . . . . .	66
I.3.	MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DEL <i>DATA-DUINO</i> EÓLICO . . . . .	67
I.3.a	Lista de Componentes Placa <i>Data-Duino</i> . . . . .	67
	I.3.b.1 Secuencia de Armado <i>Data-Duino</i> . . . . .	68
I.3.b	Lista de Componentes <i>Shield</i> Eólico . . . . .	74
	I.3.c.1 Secuencia de Armado <i>Shield</i> Eólico . . . . .	75
I.3.c	Lista de Componentes <i>Shield</i> Corrientes . . . . .	79
	I.3.d.1 Secuencia de Armado del <i>Shield</i> de Corrientes . . . . .	79
I.3.d	Diagrama de los Circuitos del <i>Data-Duino</i> . . . . .	82
II.	CUESTIONARIO DE HÁBITOS DE CONSUMO . . . . .	83

## GLOSARIO DE TERMINOLOGIAS Y SIGLAS

A lo largo de esta tesis se utilizan a menudo los siguientes términos técnicos para describir el rendimiento de la turbina eólica:

**Curva de potencia:** Una gráfica de la potencia (potencia de CC entregada a las baterías) en función a la velocidad del viento, indica cuánta potencia producirá la turbina eólica en un determinado rango de condiciones de viento. Estas curvas deberían estar disponibles para la mayoría de las máquinas comerciales, una curva estándar producida según las especificaciones internacionales por una agencia de pruebas independiente; Sin embargo, la curva de potencia real de cualquier máquina en particular después de la instalación en un sitio real es probable que sea diferente. Para las máquinas fabricadas localmente, los datos son mucho menos fiables, ya que por lo general son medidos por el propio fabricante utilizando equipos muy básicos. Esta tesis presenta algunas curvas de potencia de diferentes máquinas.

**Potencia nominal:** Es la potencia producida por el aerogenerador a su velocidad nominal del viento, definida por el fabricante. Dos aerogeneradores del mismo diámetro pueden tener rendimientos idénticos antes que el mecanismo *furling*<sup>1</sup> se active y pueden tener variaciones de potencia significativamente distintas, porque lo que varía es que ambos tiene una velocidad nominal distintas.

**Sistema híbrido:** Es un sistema de generación eléctrica con al menos dos o más formas de generar energía por ejemplo un sistema fotovoltaico y eólica.

**Factor de capacidad o carga:** Es relación entre la producción de energía anual real con respecto a la cantidad de energía que se habría producido si el dispositivo estuviera operando a potencia nominal durante un año entero.

**TSR o Relación de Velocidad Periférica:** Es la relación entre la velocidad de la punta del aspa y la velocidad del viento.

**Coefficiente par motor  $C_m$ :** Es la relación entre el rendimiento del aerogenerador y el TSR

**Plataforma Arduino:** Es una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto (*open-source*) el cual cuenta con hardware y software. Su función es crear objetos o entornos interactivos.

**Shields:** Son placas de circuitos modulares que se montan unas encima de otras para dar funcionalidad extra a un Arduino. Estas *shields* son apilables. Un *shield* en Arduino es un placa que se apila sobre el arduino o sobre otro *shield*, de forma que nos permite ampliar el hardware/capacidades de Arduino.

---

<sup>1</sup>Mecanismo en el cual el rotor de la turbina se desorienta lateralmente del viento para no superar la potencia nominal de diseño y proteger el alternador de una sobrecarga eléctrica.

AAAE:	Asociación Argentina de Energía Eólica
AFPM:	Imanes permanente de flujo axial
AEP:	Producción Anual de Energía
AIE	La Agencia Internacional de la Energía
ASPO	La Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el Gas
BM:	Banco Mundial
BWAE	British Wind Association
CA	Corriente Alterna
CC	Corriente Continua
CREE	Centro Regional de Energía Eólica
ESMAP	Energy Sector Management Assistance Program
FV	Fotovoltaica
GWA	German Wind Association
HAWT	Aerogeneradores de Eje Horizontal
IDE	Entorno de Desarrollo Integrado
IDEH	Índice de Desarrollo Humano
INTI	Instituto Nacional de Tecnología Industrial
LCoE	Costo de la Energía Nivelada (\$/kWh)
LGC	Costo de la Generación Nivelada (\$/kWh)
LMSWT	Pequeñas Turbinas Eólicas de Fabricación Local
MEM	Mercado Eléctrico Mayorista
MinEM	Ministerio de Energía y Minería
NdFeB	Rotor por Imanes de Neodimio
ONG:	Organización No Gubernamental
PCB	Placa de Circuito Impreso
RE:	Energías Renovables
RTC	Reloj de Tiempo Real
SD	Secure Digital
VAWT	Aerogeneradores de Eje Vertical
SWT	Pequeñas Turbinas Eólicas
TSR	Tip-Speed-Ratio o Relación de Velocidad Periférica
WE	WindEmpowerment
WWF	Organización Mundial de Conservación

## LISTA DE FIGURAS

FIG. 1	Comparación de costos de tecnologías para la generación de energía a nivel genérico. (ESMAP, 2007) . . . . .	14
FIG. 2	Mapa mundial de recursos eólicos (3TIER, 2011). . . . .	14
FIG. 3	Relación entre el consumo anual de electricidad <i>per cápita</i> y la calidad de vida, medida según el Índice de Desarrollo Humano (IDH). Fuente: (PNUD, 2006). . . . .	15
FIG. 4	<b>Paneles superiores:</b> Rendimiento aerodinámico de los diferentes tipos de aerogeneradores, se entiende como empuje ascensional a la fuerza de sustentación. <b>Panel inferior:</b> Relación entre el coeficiente par motor y TSR (ver glosario). . . . .	16
FIG. 5	<b>Panel izquierdo:</b> Molino multipala con bomba de pistón. <b>Panel derecho:</b> Generador de energía eólica Jacobs . . . . .	17
FIG. 6	<b>Panel izquierdo:</b> Aerogenerador Savonius. <b>Panel central:</b> Aerogenerador Darrius. <b>Panel derecho:</b> Aerogenerador Darrius acoplado con dos Savonius que actúan como arranque . . . . .	17
FIG. 7	Esquema de un típico sistema de energía eólica fuera de la red . . . . .	18
FIG. 8	Productividad energética mensual estimada para aerogeneradores de baja potencia de hasta 5m de diámetro de rotor en diferentes velocidades de viento. Fuente de datos: (Khennas <i>et al.</i> , 2008) . . . . .	18
FIG. 9	Ilustración CAD de una SWT de fabricación local, identificando y clasificando los componentes clave y las interacciones entre ellos. Imagen tomada de <a href="https://www.windempowement.org/">https://www.windempowement.org/</a> y adaptada para esta tesis. . . . .	19
FIG. 10	Curso de 500 RPM proceso de fabricación del aerogenerador de 700W de diseño Piggott. . . . .	20
FIG. 11	<b>Panel izquierdo:</b> Registrador de datos <i>Data-Duino</i> . <b>Panel derecho:</b> Registrador de datos comercial figura tomada de <a href="https://www.windlogger.eu/">https://www.windlogger.eu/</a> . . . . .	21
FIG. 12	Mapas confeccionados por el (CREE) <b>Panel izquierdo:</b> Mapa eólico de la Argentina a 50m de altura. <b>Panel derecho:</b> Mapa eólico de la Argentina con factores de capacidad mayores a 35 % a 70m de altura. . . . .	22
FIG. 13	<b>Panel izquierdo:</b> Adjudicaciones del plan GENREN. <b>Panel derecho:</b> Adjudicaciones del plan RenovAR. . . . .	23
FIG. 14	<b>Panel izquierdo:</b> Placa principal <i>Data-Duino</i> , su función es almacenar datos y alojar el micro-controlador donde se almacena la programación. <b>Panel Central:</b> Placa para conexión FTDL. <b>Panel Derecho:</b> Cable USB-FTDL. . . . .	24
FIG. 15	Distribución global de los miembros de <i>WindEmpowerment</i> . . . . .	25
FIG. 16	Registrador de datos eólico <i>Data-Duino</i> . . . . .	25
FIG. 17	Curso de 500 RPM probando el funcionamiento del aerogenerador terminado en la costanera de Vicente López, provincia de Buenos Aires . . . . .	26
FIG. 18	Aerogenerador 700W instalado por 500 RPM en la estancia El Carrizal. . . . .	26
FIG. 19	Cronograma de la metodología. . . . .	28
FIG. 20	Anemómetro de cazoletas N96FY utilizado en el proyecto. . . . .	29
FIG. 21	Veleta de estación meteorológica Wh1081. . . . .	29
FIG. 22	Sensor de corriente HASS 50-S . . . . .	30
FIG. 23	<b>Panel izquierdo:</b> <i>Set</i> de datos medidos. <b>Panel derecho:</b> El conjunto de datos medidos a 25,2V $\pm 5\%$ y su curva de potencia. La barra de error representa la desviación estándar de la potencia de salida en cada <i>bin</i> . . . . .	31
FIG. 24	<b>Panel izquierdo:</b> Zona de la provincia de Buenos Aires donde se encuentra el establecimiento en estudio. <b>Panel derecho:</b> Zona ampliada. . . . .	33
FIG. 25	<b>Panel izquierdo:</b> Foto aérea del establecimiento tomada desde un dron. <b>Panel derecho:</b> Foto de la propiedad estudiada en esta tesis . . . . .	34
FIG. 26	Recurso eólico del establecimiento. Base de datos de (NASA, 2016) obtenido con el programa HOMER pro. . . . .	34
FIG. 27	El equipo de generación de energía actualmente instalado en el establecimiento . . . . .	35
FIG. 28	<i>Data-Duino</i> eólico completo . . . . .	36

FIG. 29	<b>Panel Izquierdo:</b> <i>Shield</i> de vientos. <b>Panel Central:</b> Colocación del <i>shield</i> de vientos sobre el <i>Data-Duino</i> . <b>Panel Derecho:</b> <i>Shield</i> de vientos montado sobre el <i>Data-Duino</i> . . . . .	36
FIG. 30	<b>Panel Izquierdo:</b> <i>Shield</i> de corrientes. <b>Panel Central:</b> Colocación del <i>shield</i> de corrientes sobre la <i>shield</i> de vientos. <b>Panel Derecho:</b> <i>Shield</i> de corrientes montado sobre el <i>shield</i> de vientos y está montada sobre el <i>Data-Duino</i> . . . . .	36
FIG. 31	<b>Panel Izquierdo:</b> Fotografía de la distancia de los instrumentos al mástil mostrando su proximidad al aerogenerador. <b>Panel Derecho:</b> Instalación del brazo del anemómetro en el mástil del aerogenerador . . . . .	37
FIG. 32	<b>Panel Izquierdo:</b> Instalando el <i>Data-Duino</i> debajo del tablero eléctrico. <b>Panel derecho:</b> <i>Data-Duino</i> cableado e instalado. . . . .	37
FIG. 33	Diagrama de cableado del equipo <i>Data-Duino</i> instalado en el aerogenerador de la casa de campo en el Carrizal. . . . .	38
FIG. 34	<b>Panel Izquierdo:</b> Sensores de corriente HASS-50s instalados. <b>Panel Central:</b> Calibración del sistema de sensores de corriente utilizando una computadora portátil. <b>Panel Derecho:</b> <i>Data-Duino</i> instalado tomando datos debajo del tablero eléctrico. . . . .	38
FIG. 35	<b>Panel izquierdo:</b> Datos totales y depurados para la velocidad de $20\text{km.h}^{-1}$ el mismo procedimiento se realizó para $40\text{km.h}^{-1}$ , $60\text{km.h}^{-1}$ , $70\text{km.h}^{-1}$ , $80\text{km.h}^{-1}$ y $100\text{km.h}^{-1}$ . <b>Panel derecho:</b> Cada punto rojo representa el promedio de los datos depurados a cada una de las velocidades utilizadas para la calibración. La recta roja en trazos es la de correlación de velocidad del viento en función de los pulsos del anemómetro. La recta azul continua es la teórica de calibración. . . . .	39
FIG. 36	Calibrando la veleta al norte geográfico . . . . .	40
FIG. 37	Recta de calibración de voltaje en función de los pulsos. . . . .	40
FIG. 38	<b>a:</b> Circuito esquemático para la calibración del sensor de corriente. <b>b:</b> Conexión de la calibración del sensor de corriente. . . . .	41
FIG. 39	<b>Panel izquierdo:</b> Recta de calibración del sensor de corriente HASS-50S en el banco de prueba. <b>Panel derecho:</b> Recta de calibración del sensor de corriente Hass-50S <i>in situ</i> . . . . .	41
FIG. 40	<b>Panel izq.:</b> Registrador de datos <i>Logic Energy</i> . <b>Panel der.:</b> Registrador de datos <i>Symphonie-plus3</i> . Figuras tomadas de <a href="https://www.windlogger.eu/">https://www.windlogger.eu/</a> y <a href="https://www.nrgsystems.com">https://www.nrgsystems.com</a> respectivamente. . . . .	42
FIG. 41	<b>Panel izq.:</b> Registrador de datos <i>Vortex</i> . <b>Panel der.:</b> Registrador de datos <i>Power Predictor</i> Figuras tomadas de <a href="http://www.inspeed.com">http://www.inspeed.com</a> y <a href="http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/power-predictor-from-better-generation/">http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/power-predictor-from-better-generation/</a> respectivamente. . . . .	43
FIG. 42	<b>Panel Izquierdo:</b> Rosa de velocidades, velocidades en $\text{m.s}^{-1}$ . <b>Panel derecho:</b> Frecuencia de distribución de vientos del sitio, durante el periodo de muestreo. . . . .	45
FIG. 43	<b>Panel izquierdo:</b> Rendimiento eléctrico total de la turbina eólica. <b>Panel derecho:</b> Imagen del alternador dañado. . . . .	46
FIG. 44	<b>Panel izquierdo:</b> Curva de potencia estudiada en General Laval. <b>Panel Derecho:</b> Curva de potencia de un aerogenerador de 700W de las mismas características, instalado en la península de Scoraig Escocia, gráfico cedido por gentileza de Jon Sumanik Leroy. . . . .	47
FIG. 45	<b>Panel izquierdo:</b> Influencia del banco de baterías en la curva de potencia. <b>Panel derecho:</b> Frecuencia de carga de las baterías en el periodo de muestreo, se observa el periodo de mayor frecuencia en 22V. . . . .	48
FIG. 46	Cálculo de la producción anual de energía. . . . .	49
FIG. 47	Curva de potencia y de distribución de Weibull superpuestas. . . . .	50
FIG. 48	Consumo de un día típico del establecimiento, se observa el pico por el encendido de la bomba de agua en los horarios vespertinos, superpuesto a la velocidad de los vientos, la disipación termina ( <i>dump load</i> ) y la carga del banco de baterías. . . . .	51
FIG. 49	<b>Panel izquierdo:</b> Conjuntos de datos medidos. El área entre líneas punteada representan el rango de voltaje de $25.2 \pm 5\%$ . <b>Panel derecho:</b> El mismo gráfico del panel izquierdo, pero para un banco de baterías en buen estado, figura tomada de (Quéval <i>et al.</i> , 2014). . . . .	52

FIG. 50	Materiales necesarios para el montaje del <i>Dataduino</i> . . . . .	58
FIG. 51	Placa base de madera donde se fija el <i>Data-Duino</i> . . . . .	58
FIG. 52	<b>Panel izquierdo:</b> Placa base de madera con los separadores con los tornillos de 3mm. <b>Panel derecho:</b> Montaje utilizado en esta tesis. . . . .	59
FIG. 53	<b>Panel izquierdo:</b> <i>Shield</i> eólico montado sobre la placa base <i>Data-Duino</i> . <b>Panel derecho:</b> <i>Shield</i> de corrientes montado sobre la <i>shield</i> eólica. . . . .	59
FIG. 54	<b>Panel izquierdo:</b> <i>Data-Duino</i> alimentado con baterías externas tipo D. <b>Panel derecho:</b> Alimentación utilizada en esta tesis. . . . .	60
FIG. 55	<b>Panel izquierdo:</b> Caja eléctrica donde se monta el <i>Data-Duino</i> con las perforaciones para pasar el cableado. <b>Panel derecho:</b> Introduciendo tarjeta SD en el <i>Data-Duino</i> . . . . .	60
FIG. 56	<b>Panel izquierdo:</b> Caja eléctrica donde se monta el <i>Data-Duino</i> . <b>Panel central:</b> Ajustando el <i>Data-Duino</i> a la caja eléctrica con el tornillo de cabeza gruesa. <b>Panel derecho:</b> Ajustando el tornillo de cabeza delgada entre los dos porta pila . . . . .	61
FIG. 57	<b>Panel izquierdo:</b> Conectando el anemómetro en el <i>shield</i> eólico. <b>Panel derecho:</b> Conectando la veleta <i>shield</i> eólico. . . . .	61
FIG. 58	<b>Panel izquierdo:</b> <i>Switch</i> modo calibración y el <i>switch power Data-Duino</i> . <b>Panel derecho:</b> Cable FTDI conectado desde el CPU al <i>Data-Duino</i> . . . . .	62
FIG. 59	<b>Panel izquierdo:</b> Los cuatro sensores de corrientes conectados a la <i>shield</i> de corrientes. <b>Panel derecho:</b> Referencias de los pines del sensor de corriente Hass. . . . .	62
FIG. 60	<b>Panel izquierdo:</b> Montaje del <i>Data-Duino</i> con baterías sin la <i>shield</i> de corrientes. <b>Panel derecho:</b> Montaje del <i>Data-Duino</i> con la <i>shield</i> de corrientes directamente conectado al banco de baterías. . . . .	63
FIG. 61	<b>Panel a:</b> Led rojo (datos) parpadeando. <b>Panel b:</b> Conector jack de 2.1mm. <b>Panel c:</b> Detalle de la fuente conmutada. . . . .	64
FIG. 62	<b>Panel a:</b> Cable FTDI. <b>Panel b:</b> IDE del Arduino. <b>Panel c:</b> Led verde encendido cuando se conecta el cable FTDI. . . . .	65
FIG. 63	<b>Panel a:</b> Lugar donde se encuentra el serial monitor en el IDE de arduino. <b>Panel b:</b> En el serial monitor se ven los datos en tiempo real y el cambio de referencia . . . . .	66
FIG. 64	<b>Panel izquierdo:</b> Configuración del tiempo. <b>Panel derecho:</b> Configuración de la fecha. . . . .	66
FIG. 65	Paso 6 . . . . .	66
FIG. 66	Componentes para el ensamble de la placa <i>Data-Duino</i> . . . . .	67
FIG. 67	Porta tarjeta SD, ubicación de la tarjeta SD en el PCB . . . . .	68
FIG. 68	Soldadura de la puesta tierra del porta tarjeta . . . . .	69
FIG. 69	Colocación de las resistencias. . . . .	69
FIG. 70	Colocación correcta de la dirección de los diodos. . . . .	70
FIG. 71	Orientación correcta de los zocalos. . . . .	70
FIG. 72	a: C1 - 100 $\mu$ f. b: C2, C9 - 100nf. c: C4, C5 - 22pf. d: C3, C6, C7 - 10 $\mu$ f. . . . .	71
FIG. 73	Polaridad de los capacitores. . . . .	71
FIG. 74	<b>Panel izquierdo:</b> Porta batería, conector <i>jack</i> y <i>reset</i> . <b>Panel derecho:</b> Componentes soldados . . . . .	71
FIG. 75	Posicionamiento del capacitor variable . . . . .	72
FIG. 76	<b>Panel izquierdo:</b> <i>Leds</i> de 3 mm y <b>Panel derecho:</b> <i>Leds</i> soldados y doblados en 90° . . . . .	72
FIG. 77	<b>Panel izquierdo:</b> Cristales de 32,768 kHz y 16 MHz. <b>Panel derecho:</b> Cristales colocados en el PCB . . . . .	72
FIG. 78	Pines para programar y comunicarse con el microcontrolador . . . . .	73
FIG. 79	Regulador MC1703 de 3,3V . . . . .	73
FIG. 80	Integrados utilizados: el PCF8563 y el ATMEGA328 . . . . .	73
FIG. 81	Batería del reloj de tiempo real insertada en el porta batería . . . . .	74
FIG. 82	Componentes del <i>Shield</i> eólica . . . . .	74
FIG. 83	Soldadura de las resistencias . . . . .	75
FIG. 84	Soldadura de los interruptores . . . . .	76
FIG. 85	Capacitor C1 100 $\mu$ f. . . . .	76

FIG. 86	Soldadura del capacitor y del diodo <i>Led</i> . . . . .	77
FIG. 87	Soldadura del termistor. . . . .	77
FIG. 88	Soldadura de las borneras. . . . .	77
FIG. 89	Soldadura de los pines para los conectores rectos hembras. . . . .	78
FIG. 90	Paso 8: Colocación en la placa base <i>DataDuino</i> . . . . .	78
FIG. 91	Componentes del <i>Shield de Corrientes</i> . . . . .	79
FIG. 92	Soldadura de las resistencias . . . . .	80
FIG. 93	<b>Panel izquierdo:</b> Zócalo y IC 4051. <b>Panel derecho:</b> Soldadura de los pines . . . . .	80
FIG. 94	Soldadura de la fuente DC/DC . . . . .	80
FIG. 95	<b>Panel izquierdo:</b> Soldadura de las borneras <b>Panel derecho:</b> <i>Shield</i> de corrientes. . . . .	81
FIG. 96	<b>Panel superior:</b> Circuito <i>DataDuino</i> . <b>Panel inferior:</b> Circuito <i>shield</i> eólico . . . . .	82
FIG. 97	<b>Panel izquierdo:</b> Encuesta modelo propuesta para mejorar la calidad de la información requerida. . . . .	83

## LISTA DE TABLAS

TABLA 1	Consumo eléctrico de la vivienda según lo declarado por sus habitantes . . . . .	35
TABLA 2	Valor Total del <i>Data-Duino</i> . . . . .	42
TABLA 3	Tabla comparativa de los equipos. Confeccionada con las especificaciones técnicas proporcionadas por las páginas web mencionadas anteriormente mencionadas en esta sección V.5.a . . . . .	44
TABLA 4	Tabla Curva de potencia medida para el conjunto de datos y sus subconjuntos. . . .	47
TABLA 5	Listado de componentes . . . . .	68
TABLA 6	Identificación de las resistencias . . . . .	69
TABLA 7	Identificación de los capacitores . . . . .	70
TABLA 8	Listado de partes del <i>shield</i> eólico . . . . .	75
TABLA 9	Identificación de las resistencias del <i>shield</i> eólico . . . . .	75
TABLA 10	Identificación de los Capacitores del <i>Shield</i> Eólico . . . . .	76
TABLA 11	Listado de las partes del <i>shield</i> de corrientes . . . . .	79
TABLA 12	Identificación de las resistencias del <i>shield</i> corrientes . . . . .	79

## I. INTRODUCCIÓN

A la naturaleza le tomó varios millones de años en producir los combustibles fósiles que consume el mundo en un año. Durante el siglo XX, el paradigma energético dominante se centró en producir energía, en cantidad abundante para abastecer la demanda. El efecto de su producción a gran escala no fue motivo de preocupación ambiental hasta fines de la década de los ochenta. Es claro, que sin fuentes energéticas abundantes no hubiera sido posible sostener el ritmo de crecimiento económico mundial (IEA, 2010).

Sin embargo, el crecimiento exponencial de la población humana requiere cada vez más energía. A partir de 1860 la fuente de energía elegida para abastecer el crecimiento socio-económico producido por la era industrial fueron los combustibles fósiles como es el carbón, petróleo y el gas.

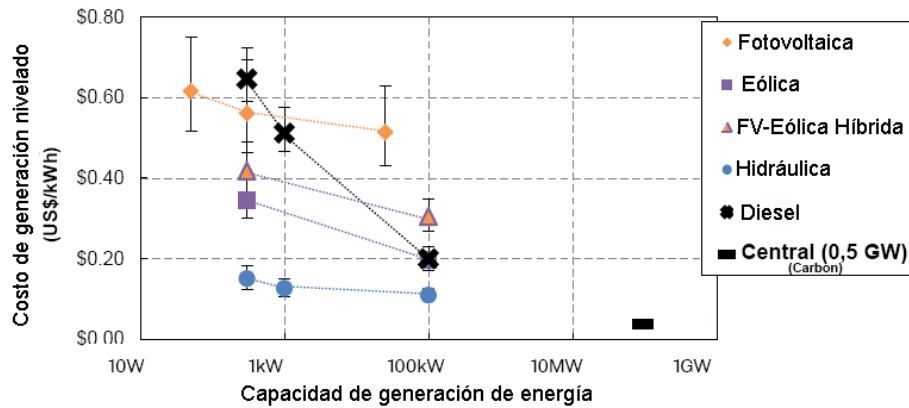
Estos combustibles fósiles son recursos no renovables. La teoría de M. King Hubbert define como “pico del Petróleo” el momento en que la mitad de las reservas mundiales se hayan acabado (Hubbert, 1956). Basado en dicha teoría la Asociación para el Estudio del Pico del Petróleo y el gas (ASPO), fundada por el geólogo Colin Campbell, utilizó la información actual sobre las reservas petrolíferas conocidas y sobre la tecnología disponible, con la cual aseveró que el pico mundial de producción habría sucedido en torno al año 2010. Sin embargo, para el gas natural el pico se retrasaría unos años más y se situaría entre el 2015 y el 2025 (Campbell *et al.*, 2008). Paralelamente, existe un límite que impone la protección y cuidado del ambiente ante la amenaza del Calentamiento Global.

De lo anterior, se desprende que en un futuro inmediato es necesario orientar los esfuerzos para maximizar la eficiencia energética e incorporar la generación de energías alternativas.

Aunque las redes centralizadas de suministro eléctrico seguirán expandiéndose, existe un creciente interés en mejorar el acceso a la electricidad en regiones remotas del mundo en desarrollo, a través de sistemas descentralizados basados en factores renovable a largo plazo, que producen energías alternativas (Wilkins, 2002). Estos sistemas son capaces de proporcionar un suministro de electricidad flexible, controlable localmente y consistente, que permitirá la expansión futura del uso de la energía a medida que aumenta la calidad de vida. A escala global, la posibilidad de un camino de desarrollo de energías alternativa añade aún más peso a dicho argumento (GNESD, 2006).

Hay una gama de tecnologías diferentes que se ofrecen en el mercado, sin embargo los recursos de energía renovables más ampliamente disponibles para la producción de electricidad a pequeña escala son el sol, el viento y los ríos. Como resultado, las tecnologías descentralizadas de generación solar, eólica y mini-hidroeléctrica pueden ofrecer a muchas comunidades rurales, un potencial de producir su propia electricidad a partir de sus recursos naturales. Por supuesto, estos recursos también existen en las áreas urbanas, sin embargo, las densidades más altas de población requieren de una infraestructura adecuada. El método más económico para la distribución urbana de electricidad es generalmente a través de una red de distribución central, representada por una central eléctrica a carbón de 500MW, (Fig. 1). En esta figura se muestra el Costo de Generación Nivelado (LGC), por sus siglas en inglés, el cual significa la relación entre los costos totales a lo largo de toda la vida útil de un proyecto de generación y la energía total que genera durante dicha vida útil. Esto representa el valor del (kWh) que debe ser vendido para que el proyecto se amortice sin tener ganancias ni pérdidas. Para ello, se asume que las centrales de energías renovables de esta figura fueron situadas en sitios donde el recurso era el adecuado para su instalación y los factores de capacidad o carga son del 20 % - 30 %, (ver glosario).

En cambio en las áreas remotas, donde a menudo es poco práctico para los gobiernos y no rentable para las compañías privadas de energía construir líneas de transmisión largas, costosas e ineficientes, para conectar muchas de las comunidades dispersas y empobrecidas, tales como las zonas rurales o aquellas distantes de los centros urbanos. En estas circunstancias, la generación descentralizada podría ser la única opción viable.



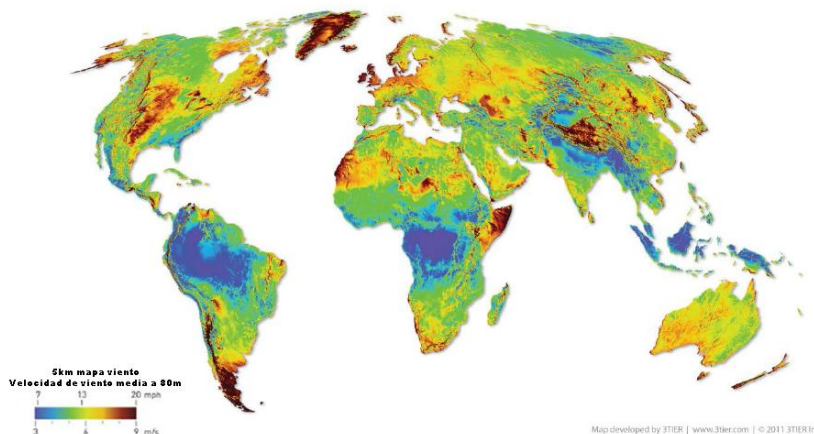
**FIG. 1.** Comparación de costos de tecnologías para la generación de energía a nivel genérico. (ESMAP, 2007)

Como resultado, los generadores Diesel se usan a menudo en sistemas de potencia independientes debido a su disponibilidad, bajos costos iniciales de compra, reducido tamaño y facilidad de instalación. Sin embargo, la necesidad de distribución continua de combustibles, el aumento de los precios de los combustibles fósiles, la contaminación ambiental y los riesgos para la salud asociados, hacen que raras veces sea la opción más económica, social o ecológicamente sostenible (Casillas, 2012).

Desafortunadamente, muchas personas utilizan esta tecnología en circunstancias inapropiadas, ya que se ha establecido una importante infraestructura en su área local para importar, distribuir, instalar y mantener generadores Diesel (así como del combustible que queman), mientras que todavía no existe un equivalente para las tecnologías de energía alternativa. La demanda de electricidad está intrínsecamente ligada a la oferta y como resultado la única opción tecnológica disponible en un lugar determinado es un costoso generador Diesel y el uso de la electricidad está a menudo severamente restringido. En consecuencia, el acceso a la electricidad se reduce drásticamente y la demanda se restringe hasta que una alternativa más apropiada esté disponible.

El uso de mini-hidroeléctrica y fotovoltaica (FV) para la electrificación rural ya está bien establecido (Wilkins, 2002). Sin embargo, estas tecnologías no son apropiadas en todos los contextos locales. Por ejemplo, un curso de agua adecuado no siempre está disponible y aunque los precios siguen bajando, (Léna, 2013), la FV en las condiciones establecidas, (Fig. 1) es más costosa que la eólica (entre 0,60 y 0,50 US\$/kWh vs. 0,30 y 0,20 US\$/kWh respectivamente) (ESMAP, 2007).

En el mundo existen regiones con diferentes disponibilidades de recursos eólicos (Fig. 2), que dependen de la geografía y de condiciones meteorológicas como ser la posición relativa de los ciclones y anticiclones.



**FIG. 2.** Mapa mundial de recursos eólicos (3TIER, 2011).

En el caso de la Argentina, la generación eléctrica se caracteriza por una alta dependencia de los combustibles fósiles, llegando al 65 % en 2012, de acuerdo al balance energético, (Villalonga, 2013). La Argentina posee uno de los potenciales eólicos más importantes del mundo. Sin embargo esta fuente de energía es poco aprovechada, alrededor del 0,3 %, tanto a nivel domiciliario como dentro de la matriz energética, (Villalonga, 2013).

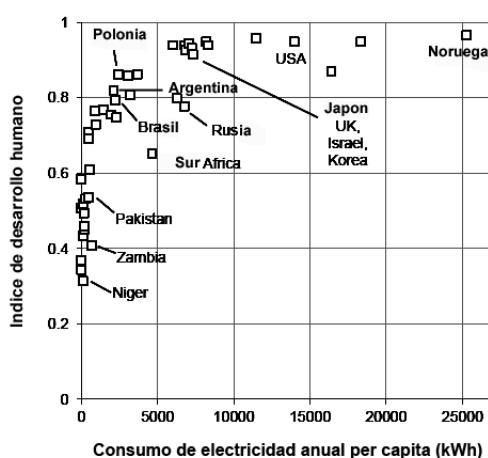
La difusión exitosa de la energía eólica, en el interior de la Argentina, donde se dispone de un recurso eólico razonable, en la cual existen, solo en la provincia de Chubut alrededor de 1500 aerogeneradores de baja potencia en operación (Mattoo, 2013), permite que la energía eólica pueda convertirse en una solución rentable (Spinadel, 2015), y fiable para la electrificación rural, (Batchelor *et al.*, 1999).

Este trabajo propone estudiar y optimizar la producción de electricidad a partir de energía eólica de baja potencia dedicada a la electrificación del ámbito rural, estas metas se analizarán con más detalle en la sección II. de objetivos.

### I.1. Electrificación Rural

A nivel mundial 1500 millones de personas no tiene acceso a la electricidad, 85 % de las cuales viven en zonas rurales (AGECC, 2010), de las cuales América Latina representa unos 31 millones (IEA, 2010). La electricidad es la forma más versátil de transportar energía, el vínculo entre el uso de la electricidad y el desarrollo humano es claro como se observa en la (Fig 3), ésta demuestra que el acceso a los primeros kilowatt-horas (kWh) tienen el mayor impacto en la calidad de vida, solo este factor justificaría el aumento del costo de llevar la electricidad a áreas remotas. Entre los muchos beneficios de la electrificación, el más frecuente es la iluminación eléctrica (Practical-Action, 2010). Las lámparas de querosene de llama abierta se usan ampliamente en todo el mundo en desarrollo, debido a su disponibilidad y bajo costo inicial de adquisición (Foster *et al.*, 2000), pero no sólo son peligrosas (Peck *et al.*, 2008) sino que además son de alto costo por unidad de producción de luz y además son muy ineficientes (Practical-Action, 2010).

A pesar de que la Argentina posee una extensa red eléctrica nacional, que alcanza 96 % de la población (Russo., 2009), el 4 % restante aún no es abastecida con energía eléctrica de red, dado la distribución geográfica de la población que ocupa grandes extensiones del territorio y sus viviendas se encuentran alejadas entre si haciendo casi imposible su abastecimiento eléctrico de forma convencional a un costo razonable (Russo., 2009). Los resultados del análisis, (Fig. 1), muestran que desde el punto de vista económico las energías alternativas renovables son sin duda, la mejor opción para la generación de la energía distribuida a pequeña escala (World-Bank, 2008)



**FIG. 3.** Relación entre el consumo anual de electricidad *per cápita* y la calidad de vida, medida según el Índice de Desarrollo Humano (IDH). Fuente: (PNUD, 2006).

## I.2. Extrayendo Energía del Viento

### I.2.a Definición Aerogeneradores de Baja Potencia

La *American Wind Association* (AWEA) define como aerogeneradores de baja potencia, aquellos que no superen los 100 kW de potencia nominal, siendo sus usos residencial o comercial, (aislado o interconectado). La *British Wind Association* (BWEA) define los mismos hasta 50 kW de potencia nominal y la *German Wind Association* (GWE) define como aerogeneradores de baja potencia hasta 100 kW de potencia nominal y para los de uso residencial hasta 30 kW.

A su vez la norma internacional IEC 61400-2 define como baja potencia aquellos aerogeneradores que poseen un área de barrido menor a  $200 \text{ m}^2$  y la IEC 61400-11 los define como aquellos que no superen los 150 kW y que poseen hasta 30 m de altura del rotor.

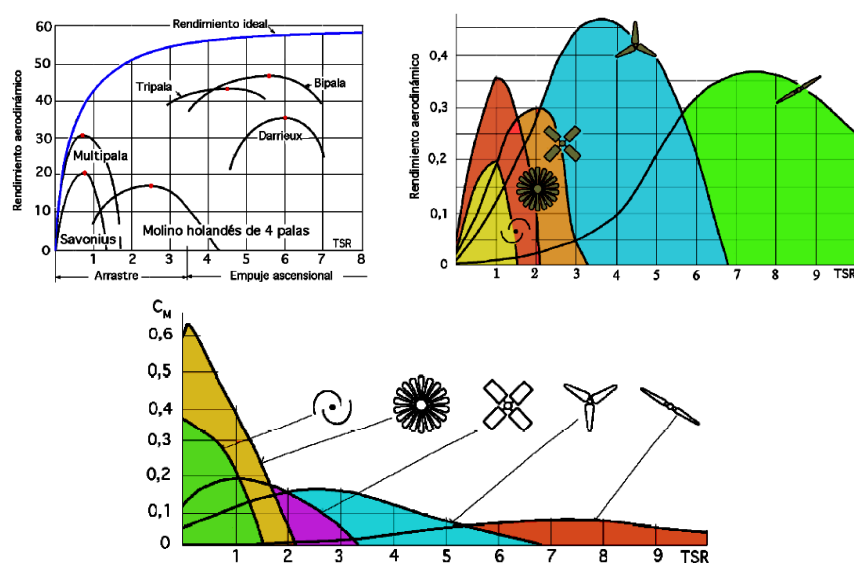
En la Argentina, el Instituto Nacional Tecnológico Industrial de Neuquén (INTI) en su último censo de fabricantes de aerogeneradores en el año 2010, menciona 16 fabricantes de aerogeneradores de baja potencia en todo el país, (Ángel Casabona *et al.*, 2010). El INTI ensaya los mismos para sus certificaciones, ninguno de los cuales superan los 10 kW de potencia nominal.

Como se puede observar existen varias definiciones alrededor del mundo y diversas normas que definen los aerogeneradores de baja potencia. Definir el rango de la potencia de un aerogenerador es relativo, dependiendo de las normas de cada país.

### I.2.b Tipos de Aerogeneradores

Los aerogeneradores se dividen en dos clases, los de eje horizontal (HAWT) y los de eje vertical (VAWT).

Los HAWT son aerogeneradores que se los utilizan para la producción energética. Estos aerogeneradores funcionan bajo el principio de la sustentación del perfil aerodinámico de las aspas. El viento incide sobre el borde de ataque de las aspas produciéndose dos tipos de fuerza la de arrastre y la de sustentación. Las aspas en los HAWT están diseñadas para que la fuerza de sustentación sea predominante sobre la fuerza de arrastre, las cuales hacen que giren a mayor velocidad y las hagan más eficientes a la hora de producir energía (Spinadel, 2015) (Fig. 4 paneles superiores).



**FIG. 4. Paneles superiores:** Rendimiento aerodinámico de los diferentes tipos de aerogeneradores, se entiende como empuje ascensional a la fuerza de sustentación. **Panel inferior:** Relación entre el coeficiente par motor y TSR (ver glosario).

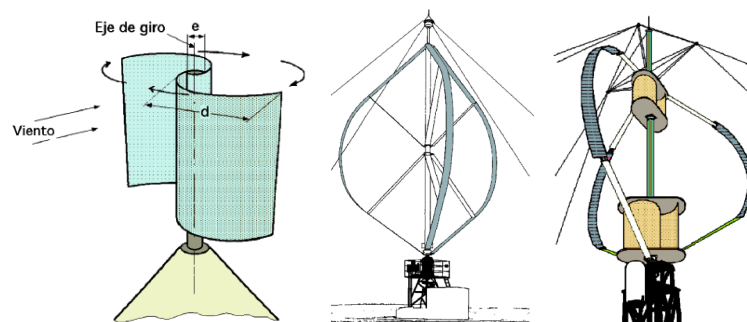
Su número de aspas puede variar entre una a múltiples aspas, dependiendo de las necesidades del diseñador, generalmente los aerogeneradores de producción energética son de tres aspas, aunque existen de una y dos aspas (Fig. 5 panel derecho) o aerogeneradores de múltiples aspas para conseguir un mayor par motor o torque, como el multipala americano (Fig. 5 panel izquierdo). Este último no posee perfiles aerodinámicos en sus aspas pues no necesitan rotar a altas velocidades ya que son máquinas de bajas rpm y su función es el bombeo de agua y no la producción energética (Fig. 4 panel inferior).



**FIG. 5. Panel izquierdo:** Molino multipala con bomba de pistón. **Panel derecho:** Generador de energía eólica Jacobs

Otro factor importante a tener en cuenta en el caso de los HAWT es que son diseñados para vientos fuertes a moderados que sean continuos y de flujo laminar, en preferencia unidireccionales aunque tengan mecanismos de orientación. Mientras menos movimientos mecánicos tenga un aerogenerador mayor será su vida útil y menor será su mantenimiento.

Los VAWT son aerogeneradores diseñados para vientos turbulentos y no logran el rendimiento de los HAWT, ya que principalmente actúan las fuerzas de arrastre y sus mejores rendimientos son a bajos *Tip Ratio Speed* (TSR), (ver glosario) como los Savonius<sup>2</sup> o los multipalas (Fig. 4 panel inferior). Estas son máquinas donde sus generadores están al nivel del suelo y son de fácil acceso, no requiriendo grandes torres como los HAWT, ya que funcionan con vientos provenientes de distintas direcciones y no necesitan mecanismos de orientación (Fig. 6 panel izquierdo). Dentro de los VAWT, el Darrieus<sup>3</sup> es un aerogenerador de perfil aerodinámico el cual puede llegar a altos rendimientos pero no alcanza el rendimiento de los HAWT, a causa de que los vientos de mayor velocidad se encuentran a grandes alturas. Debe destacarse que este aerogenerador no posee arranque propio sino que necesita de un mecanismo externo para que comience a funcionar (Fig. 6 panel central), en algunos diseños se le incorpora un Savonius dentro del Darrieus para lograr un arranque autónomo pero en altas rpm el Savonius actúa como freno para el mismo (Fig. 6 panel derecho).



**FIG. 6. Panel izquierdo:** Aerogenerador Savonius. **Panel central:** Aerogenerador Darrieus. **Panel derecho:** Aerogenerador Darrieus acoplado con dos Savonius que actúan como arranque

<sup>2</sup>Los rotores Savonius son un tipo de turbina eólica de eje vertical usada para convertir la energía del viento en torsión sobre un eje rotatorio. Fueron inventadas por el ingeniero finlandés Sigurd J. Savonius en el año 1922

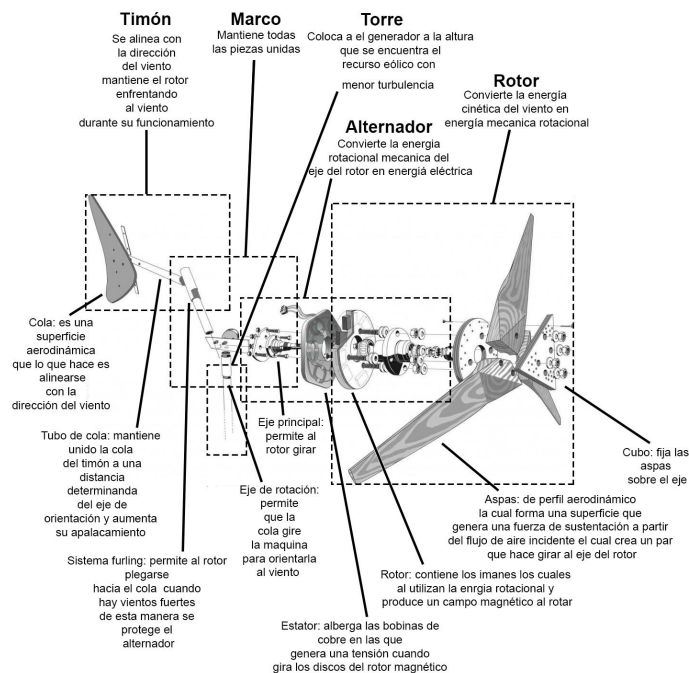
<sup>3</sup>Los rotores Darrieus son un tipo de turbina eólica de eje vertical con aspas aerodinámicas, inventadas por ingeniero francés Georges Darrieus 1931



## I.2.d Diseño Piggott

En esta tesis se estudia una turbina eólica SWT de eje horizontal de fabricación local de diseño Piggott con 2.4m de diámetro de rotor, la misma ha demostrado su adaptabilidad en todas partes del mundo lo cual lo hace ideal para zonas remotas (*Wind Empowerment*, 2013).

La guía utilizada para la fabricación de esta turbina fue proporcionada por Piggott, (Piggott, 2013) la cual brinda los diseños para una gama de SWT que van de 1,2 a 4,2m de diámetro de rotor. Piggott diseñó las máquinas para proporcionar energía a su comunidad local de Scoraig en Escocia y en los últimos 30 años, ha perfeccionado el diseño para mejorar la confiabilidad, reducir los costos y crear una máquina que es muy respetada en todo el mundo por su durabilidad, simplicidad y adaptabilidad (Sumanik-Leary *et al.*, 2013). La figura 9 describe cada uno de los componentes clave de una pequeña turbina eólica de fabricación local (LMSWT<sup>4</sup>).



**FIG. 9.** Ilustración CAD de una SWT de fabricación local, identificando y clasificando los componentes clave y las interacciones entre ellos. Imagen tomada de <https://www.windempowerment.org/> y adaptada para esta tesis.

La (Fig. 10) muestra cómo se talla la madera de las aspas, la fabricación de las bobinas, el estator y los cortes de acero, utilizando el diseño de código abierto (Piggott, 2013) en los cursos de construcción de aerogeneradores de baja potencia dictados por la ONG 500 RPM<sup>5</sup> en la Argentina.

Los materiales pueden conseguirse de forma local o incluso muchas partes componentes pueden ser obtenidos de la reutilización de otros dispositivos, como por ejemplo el eje de rotor se puede extraer de un eje de rueda de un automóvil o muchas partes de metal del mismo se pueden usar para la construcción del marco de la turbina.

El generador es de imanes permanentes de flujo axial (AFPM), diseñado especialmente para ser utilizando como rotor por imanes de neodimio (NdFeB) sobre discos de acero con resina, luego las bobinas de cobre enrolladas se establecen sobre moldes con resina para fabricar el estator.

<sup>4</sup>Se define en esta tesis como una LMSWT un aerogenerador de fabricación local

<sup>5</sup>[www.500rpm.org](http://www.500rpm.org)



**FIG. 10.** Curso de 500 RPM proceso de fabricación del aerogenerador de 700W de diseño Piggott.

### I.2.e Selección del Sitio

Seleccionar un sitio para un SWT es un equilibrio entre el mejor recurso eólico para maximizar el rendimiento energético y el mejor potencial de anclaje con el punto más cercano al usuario final para minimizar la longitud del cable de alimentación.

La evaluación del recurso eólico es la parte más complicada, ya que el viento es considerablemente variable tanto en el tiempo como en espacio.

En el análisis temporal, existen ráfagas de viento que actúan durante segundos, períodos de calma que duran días, patrones estacionales a lo largo del año e influencias climáticas que llevan a las variaciones interanuales.

En el dominio espacial, las estructuras, la vegetación y los árboles causan efectos de refugio muy localizados. Colinas suaves pueden canalizar el viento y acelerarlo como también masas terrestres continentales desacelerarlos.

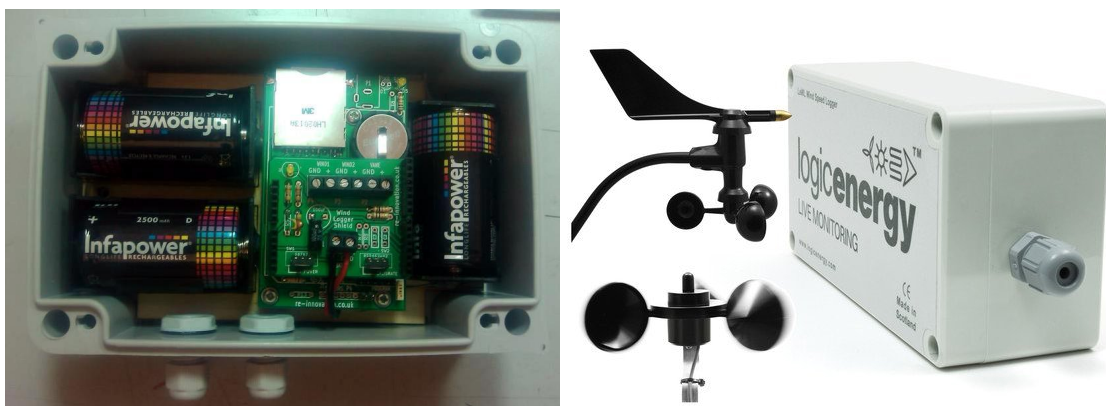
Por lo tanto, evaluar el recurso eólico es de vital importancia ya que la potencia disponible es proporcional al cubo de la velocidad del viento, lo que significa que la duplicación de la velocidad del viento produce un aumento de ocho veces su potencia, (González *et al.*, 2013), como se deduce de la siguiente fórmula.

$$P_w = \frac{\rho}{2} \cdot A \cdot v^3 \quad (1)$$

- P = potencia del viento (W)
- $\rho$  = densidad del aire ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )
- A = área de barrido del rotor ( $\text{m}^2$ )
- V = velocidad del viento ( $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ )

Una evaluación precisa del recurso eólico en cada sitio propuesto es complicada, ya que los microclimas locales y los efectos de la topografía local (vegetación, colinas, pastizales, etc.) afectan al recurso eólico. Sin embargo, una evaluación exacta de ellos es muy importante para los SWT, dado que la potencia producida es linealmente proporcional al recurso e incluso una diferencia relativamente pequeña en la velocidad media del viento en un sitio dado puede hacer la diferencia entre un sistema viable e inviable.

Mapas de viento nacionales e incluso regionales, están a menudo disponibles sin embargo, deben utilizarse con precaución, ya que los mapas del viento se producen midiendo la velocidad del viento en lugares específicos, utilizando un anemómetro, una veleta de viento y un registrador de datos, uniendo los puntos interpolando y extrapolando con modelado por computadora. Si la calidad del modelo de computacional es deficiente, las mediciones son inexactas o no son suficientes, entonces el mapa del viento resultante será impreciso. Una inspección visual del sitio y la colección de evidencias biológicas o geomorfológicas (Robertson, 1987), e incluso la información obtenida de los lugareños, puede determinar la ubicación de un buen sitio (Hiester y Pennell, 1981). Sin embargo, la única manera de medir con precisión el recurso eólico en un sitio específico es utilizando un registrador de datos (Gipe, 2009). La naturaleza altamente variable del recurso eólico significa que la instrumentación debe montarse lo más cerca posible del emplazamiento potencial de la turbina (Mattio y Tilca, 2009). El problema de estos equipos comerciales es que resultan costosos y no registran todas los parámetros necesarios para analizar el recurso y el funcionamiento del generador eólico (Fig. 11 panel derecho), por lo tanto en esta tesis se propuso utilizar el registrador de datos *Data-Duino* (Fig. 11), panel izquierdo como solución tecnológica a la problemática mencionada.



**FIG. 11. Panel izquierdo:** Registrador de datos *Data-Duino*. **Panel derecho:** Registrador de datos comercial figura tomada de <https://www.windlogger.eu/>

## II. OBJETIVOS Y ALCANCE

Los objetivos de la tesis son:

1. Demostrar que el *Data-Duino*<sup>6</sup> es una herramienta útil para la obtención de información necesaria sobre el recurso eólico, con el fin obtener mejoras en el diseño de los aerogeneradores, además de brindar información necesaria para dimensionar los sistemas eólicos y verificar el funcionamiento de los aerogeneradores de forma económica y sencilla.
2. Proponer mejoras al sistema *Data-Duino* en términos de *hardware* y *software* para reducir costos y simplificar el sistema de lectura de datos.
3. Desarrollar un manual de construcción, montaje e instalación del sistema *Data-Duino* y sus instrumentos de medición.

El alcance de esta tesis se limita a la energía eólica de baja potencia. Dado que el equipo fue diseñado para SWT y en esta tesis solo se estudió para estos sistemas en ámbitos rurales.

<sup>6</sup>Registrador de datos basado en la plataforma Arduino

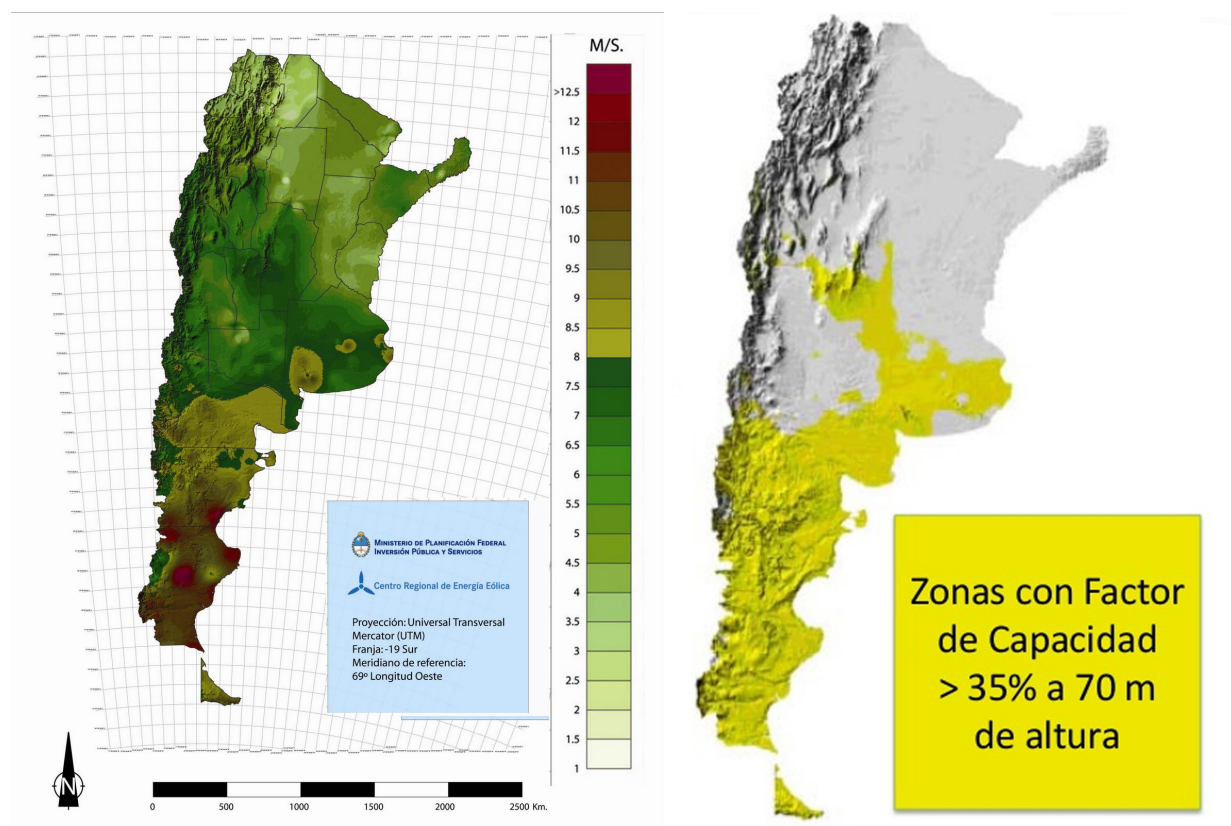
### III. ANÁLISIS DE LA SITUACIÓN ACTUAL

#### III.1. La Energía Eólica en la Argentina

Argentina es un país con larga tradición eólica. Se estima que la llanura pampeana cuenta aún hoy con la mayor concentración de molinos de campo, para el bombeo de agua, de todo el mundo, con más de 400.000 ejemplares en funcionamiento (MinEM, 2008). Si bien las primeras máquinas de viento diseñadas para generar electricidad aparecieron a comienzos del siglo pasado, la novedad de su tecnología y sus mayores costos relativos resultaron barreras insalvables para su difusión en una época dominada por los combustibles fósiles. Fue el fin de la era del petróleo barato en 1973 (Hubbert, 1956) lo que marcó el renacer del viento como fuente energética viable. Actualmente el alto grado de desarrollo alcanzado por los aerogeneradores modernos permite al viento aportar un porcentaje relevante de la generación eléctrica en muchos países.

Según la Asociación Argentina de Energía Eólica (AAAE), las perspectivas del país en materia de energía eólica son alentadoras. Se estima que el potencial eólico patagónico encierra una energía decenas de veces mayor que el contenido en toda la producción anual argentina de petróleo. Más aún, no solo el extremo sur argentino posee condiciones favorables para la instalación de granjas eólicas, sino que existen asimismo numerosas regiones aptas en las provincias de Río Negro y Neuquén, en varias zonas serranas y costeras de la provincia de Buenos Aires y en muchos otros sitios puntuales de todo el país, prácticamente el 70 % del área continental de la Argentina es privilegiada por el viento, (Spinadel, 2015).

En este sentido, el Plan Nacional de Energía Eólica encomendado por el Ministerio de Planificación Federal del Centro Regional de Energía Eólica del Chubut (CREE), sienta las bases para el primer desarrollo nacional de envergadura en esta materia. El plan comprende la confección de un mapa eólico nacional (ideado para identificar los sitios de emplazamiento óptimos), (Fig. 12 panel izquierdo).



**FIG. 12.** Mapas confeccionados por el (CREE) **Panel izquierdo:** Mapa eólico de la Argentina a 50m de altura. **Panel derecho:** Mapa eólico de la Argentina con factores de capacidad mayores a 35 % a 70m de altura.

Argentina actualmente posee seis parques eólicos localizados en tres provincias que suman una potencia instalada de 188.3MW, (MinEM, 2017). Existen otros parques eólicos de baja escala administrados por cooperativas eléctricas que suministran energía a lugares aislados. Muchos de ellos poseen aerogeneradores fuera de servicio, registrando un interesante factor de capacidad cercano al 30 %, aun cuando los parques funcionando en la Patagonia alcanzan regularmente factores de utilización muy superiores, con valores tan altos como 40 % o más, (Fig. 12 panel derecho) . Varios de estos emprendimientos han crecido al amparo de los beneficios fiscales concedidos por el “Régimen Nacional de la Energía Eólica y Solar” introducido por la Ley 25.019/98.

El ministerio de energía y minería en el año 2009 propone el Programa “GENREN”, el cual abrió un llamado a licitación (Fig. 13 panel izquierdo) de proyectos de generación eléctrica en base a energías renovables orientado a dar cumplimiento a una meta ambiciosa del 8 % al 2016 fijado por la Ley 26.190. En el año 2016 en el marco del programa “RenovAR” se convoca nuevamente para la contratación en el mercado eléctrico mayorista (MEM) de energía eléctrica de fuentes renovables, mediante la Ley 27.191 promulgada en el año 2015 y sancionada en año 2016, la cual tiene como meta la contribución de fuentes de energía renovables hasta alcanzar el 8 % del consumo de energía eléctrica nacional para el año 2018 y una expectativa creciente de metas hasta escalar al 20 % para el año 2025.

Actualmente el plan RenovAR está en la etapa de adjudicación (Fig. 13 panel derecho). La sumatoria de los proyectos que se incorporan totalizan 2923MW de origen renovable adjudicados: más de tres veces y media la capacidad renovable instalada actualmente (MinEM).

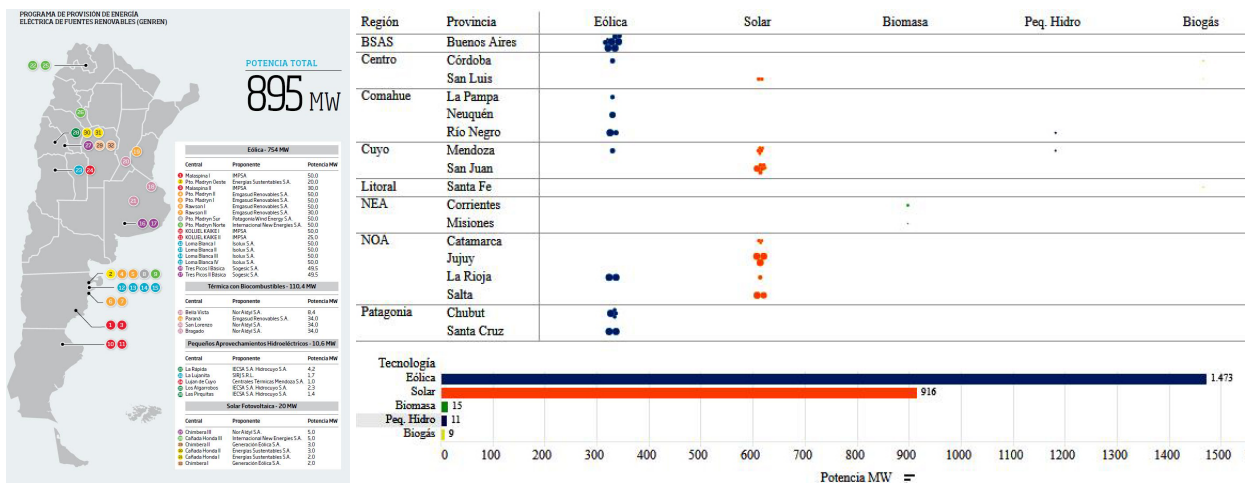


FIG. 13. Panel izquierdo: Adjudicaciones del plan GENREN. Panel derecho: Adjudicaciones del plan RenovAR.

### III.2. Evolución de los Sistemas de Medición Eólica

Hasta el desarrollo del *Data-Duino* se utilizaban mediciones de viento de estaciones meteorológicas cercanas, las cuales indicaban una velocidad viento estimativa la cual era extrapolada a la zona de instalación del aerogenerador.

O bien utilizando modelos meteorológicos, los cuales daban una precisión insuficiente, lo que conllevaba al sobredimensionamiento de los sistemas y encareciendo los proyectos, estas diferencias económicas son significativas para las personas que utilizan estos sistemas en zonas rurales.

Otra forma utilizada normalmente es la compra de registradores de datos comerciales pre diseñados para la medición de parámetros los cuales en la mayoría de los casos son insuficientes para caracterizar completamente el sistema eólico, en cuanto a los que son específicamente diseñados para los sistemas eólicos tienen costos elevados para los SWT.

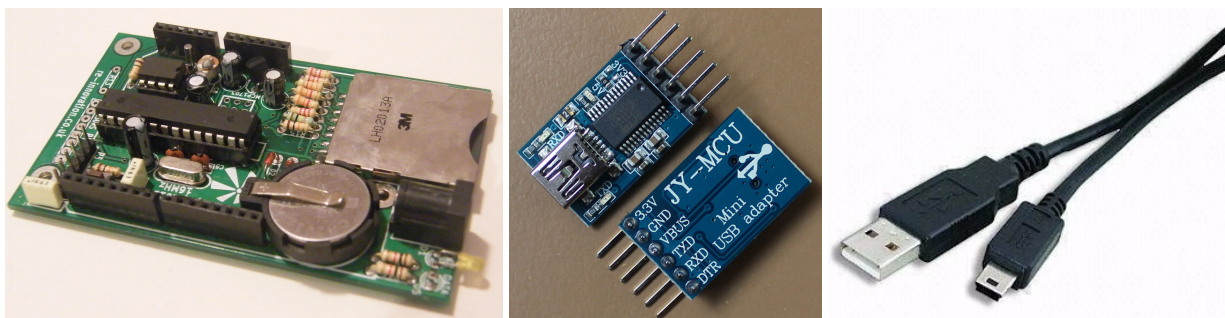
El caso de estudio comienza a partir de la utilización de un sistema de medición y registrador de datos de bajo costo desarrollado por *Wind Empowerment* (WE) para los sistemas SWT basado en la plataforma de programación *open source* *Arduino* denominado “*Data-Duino*” el cual se calibró y se configuró para la utilización en esta tesis.

### III.3. Análisis del *DataDuino*

El *Data-Duino* (Fig. 14 panel izquierdo) desarrollado por *Renewable Energy Innovation*<sup>7</sup> en la plataforma *Arduino*<sup>8</sup> es un sistema diseñado para almacenar datos en tiempo real. Es sencillo, fácilmente configurable y de bajo costo en comparación a otros registradores de datos en el mercado. Trabaja con una tarjeta de almacenamiento *Secure digital* (SD)<sup>9</sup> capaz de almacenar hasta un dato por segundo. El equipo consta además con dos placas (*shields*) que expanden sus capacidades, llamadas *shields* de vientos y *shields*, de corrientes esta última desarrollada por *V3 Power* ([v3power.co.uk](http://v3power.co.uk)). Ambas placas junto a la placa *Data-Duino* principal, hacen en su totalidad al registrador de datos eólicos *Data-Duino*

La unidad utiliza un reloj de tiempo real (RTC), por sus siglas en inglés, que cuenta con una batería para registrar datos y tiempos de manera precisa.

El conjunto *Data-Duino* consta de un total de ocho entradas para sensores de corrientes, dos anemómetros y una veleta cuyos datos son almacenados en la tarjeta SD de la placa principal, en formato *.CSV*<sup>10</sup>. El período de muestreo para el registro de datos y parámetros: como día, mes y año se pueden cambiar utilizando *IDE*<sup>11</sup>, del *Arduino* a través de una conexión serial FTDI (Fig.14 panel central) que posee el *Data-Duino* mediante un ordenador y su correspondiente cable (Fig. 14 panel derecho).



**FIG. 14. Panel Izquierdo:** Placa principal *Data-Duino*, su función es almacenar datos y alojar el microcontrolador donde se almacena la programación. **Panel Central:** Placa para conexión FTDI. **Panel Derecho:** Cable USB-FTDI.

#### III.3.a El Rol de *Wind Empowerment*

*Wind Empowerment* (WE)<sup>12</sup> es una organización internacional, fundada en el año 2011, cuyo objetivo es promover la fabricación local de aerogeneradores para lograr una electrificación rural sustentable. Nuclea a numerosas organizaciones de todo el mundo (Fig. 15), una de ellas llamada 500 RPM es una ONG argentina que participa activamente en su comisión directiva, para promover proyectos conjuntos en el país y poder llevar la tecnología a otros lugares de América Latina y el mundo. Entre sus actividades

<sup>7</sup><https://www.re-innovation.co.uk/>

<sup>8</sup><https://www.arduino.cc/>

<sup>9</sup>Es un dispositivo en formato de tarjeta de memoria para dispositivos portátiles, por ejemplo: cámaras digitales, teléfonos móviles y computadoras portátiles

<sup>10</sup>Es un tipo formato abierto sencillo para representar datos en forma de tabla

<sup>11</sup>Es una aplicación informática que proporciona servicios integrales para facilitarle al desarrollador o programador el desarrollo de *software*

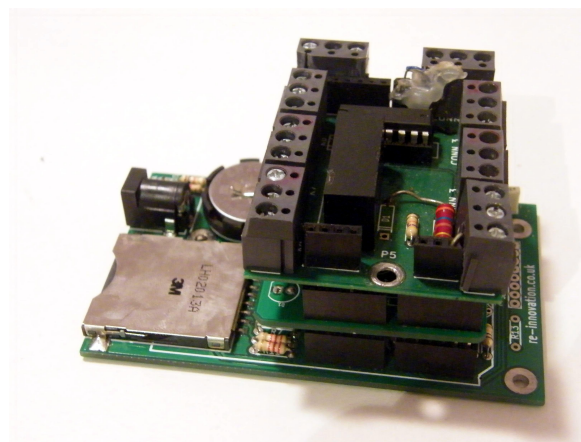
<sup>12</sup>[www.windempowerment.org](http://www.windempowerment.org)

dicta cursos de capacitación y desarrolla proyectos educativos y sociales. WE se utiliza como plataforma de intercambio de conocimientos que vincula a sus miembros y participantes con el fin de compartir sus experiencias, dentro del contexto en el cual están trabajando, desde avances técnicos y otras temáticas para que la energía eólica de baja potencia, que pueden llegar cada vez más a ser una solución viable para la electrificación rural. Desde entonces los miembros y participantes se comunican principalmente a través del sitio web <http://windempowerment.org/>, a través de *skype*, reuniones anuales en diferentes partes del mundo. Su última reunión fue realizada la provincia de Neuquén, Argentina 2016, durante la semana de la energías renovables en el parque tecnológico Cutral C6.



**FIG. 15.** Distribución global de los miembros de *WindEmpowerment*.

Existe un grupo de medición, dentro del cual se analizan y se estudian las técnicas de medición, se elaboran estándares y se realizan las mejores prácticas para los desarrolladores y usuarios finales en la evaluación del recurso eólico, el rendimiento y la optimización de los SWT. En este grupo de trabajo es donde se desarrolló el sistema de medición “*Data-Duino*” (Fig. 16).



**FIG. 16.** Registrador de datos eólico *Data-Duino*

### III.3.b El Rol de 500 RPM

500 RPM es una organización Argentina sin fines de lucro, dedicada a la transmisión de conocimientos prácticos y teóricos sobre el aerogenerador de diseño Piggott (Piggott, 2013). Dicha ONG dicta cursos y proyectos educativo-sociales, promoviendo la expansión y el desarrollo de esta tecnología y la electrificación rural sostenible. La misma trabaja en conjunto con otras organizaciones para potenciar el desarrollo de la energía eólica (La Asociación Argentina de Energía Eólica, *Wind Empowerment*, Eolocal, Colectando Sol, etc).

Esta organización realiza proyectos para escuelas y comunidades rurales que no tienen energía eléctrica o poseen un abastecimiento escaso y la cual capacita a la gente local en el uso y mantenimiento del aeroge-

nerador. El mismo se fabrica en una institución técnica de la zona y se instala en conjunto, promoviendo la vinculación urbano-rural, (Fig. 17).



**FIG. 17.** Curso de 500 RPM probando el funcionamiento del aerogenerador terminado en la costanera de Vicente López, provincia de Buenos Aires

Sus miembros trabajan con instituciones técnicas (escuelas y universidades) y organismos públicos en proyectos demostrativos, para promover el conocimiento y la apropiación de la tecnología. Fabrican e instalan aerogeneradores en las instituciones mismas y junto con ellas, a los efectos de que puedan ser utilizados para pruebas e investigaciones.

Uno de los primeros proyectos de 500 RPM fue la instalación de un aerogenerador en la costa bonaerense, en el partido de General Lavalle en el establecimiento “El Carrizal” el cual hoy en día abastece el establecimiento que carecía de electricidad y se proveía de ella a través de un generador eléctrico (Fig. 18).

Como 500 RPM forma parte WE, se propone utilizar en esta tesis el sistema de medición de múltiples parámetros “*Data-Duino*”, para analizar el recurso eólico de la zona, estudiar los hábitos de consumo del establecimiento “El Carrizal” y determinar el comportamiento de la maquina eólica de 700W de potencia nominal, fabricada por 500 RPM.



**FIG. 18.** Aerogenerador 700W instalado por 500 RPM en la estancia El Carrizal.

### III.3.c El Rol de la Universidad de Flores

La Universidad de Flores tiene un interés particular en el área de energías renovables a través del Laboratorio Bio-Ambiental de Diseño que trabaja en la investigación y en el desarrollo de proyectos.

## **IV. METODOLOGÍA**

### **IV.1. Relevamiento de Datos**

Para el desarrollo de esta tesis, primeramente se estableció contacto con el dueño de una propiedad escogida para este estudio y sugerida por 500 RPM. Se confeccionó una encuesta, (apéndices II.), para realizar al propietario a los efectos de conocer sus necesidades energéticas, (sección V.1.a), la cual fue luego contrastada con los datos medidos con el registrador Data-Duino, estimando y analizando su consumo con datos cuantitativos tomados durante un tiempo determinado, (sección VI.3.). Durante varias estadías en el sitio de estudio, se realizaron relevamientos de datos geográficos, ambientales y meteorológicos, de las actividades particulares de la propiedad y del tipo de energía que es utilizada en la misma, (sección V.1.).

### **IV.2. Evaluación Económica y Construcción del Equipo**

Se evaluó en el mercado los distintos tipos de registradores para compararlos con el registrador de datos *Data-Duino*, (sección V.5.a) y que tipos de parámetros físicos eran necesarios para la evaluación del aerogenerador en estudio y de la propiedad en la cual estaba instalado, que es abastecida energéticamente por el mismo.

Se concluyó que las magnitudes necesaria para la realización de este trabajo eran: velocidad de viento, dirección de viento, corrientes y voltaje, (sección IV.7.). Basado en ello, se comprobó que el *Data-Duino* era el equipo que se ajustaba a las necesidades económicas y técnicas para el estudio energético de la propiedad y del aerogenerador, (sección V.5.). Por lo cual se decidió la construcción del mismo y la adaptación del software a las necesidades de esta tesis, (apéndices I.).

### **IV.3. Instalación del Sistema *Data-Duino***

Durante dos días se instaló el registrador de datos *Data-Duino* y se montaron los soportes los cuales se diseñaron específicamente para colocar los instrumentos de medición meteorológicos sobre el aerogenerador en estudio, (sección V.3.). También se realizaron las conexiones necesarias para el funcionamiento del registrador de datos, (sección V.3.) y la calibración *insitu* de los instrumentos, (sección V.4.).

### **IV.4. Mediciones y Recolección de Datos**

Al equipo se lo dejó en funcionamiento recolectando datos durante un periodo de tres meses. Finalizado este plazo, se regresó a retirar la información almacenada de la tarjeta SD del *Data-Duino* para obtener las magnitudes necesarias, ya mencionadas, para la realización de esta tesis y su posterior procesamiento, (sección IV.7.f).

### **IV.5. Análisis de Datos y Resultados**

Una vez con los datos decodificados se procedió al análisis de los mismos, proceso que insumió aproximadamente dos meses, (sección IV.7.f). A los datos obtenidos, (sección IV.7.) se les aplicó los factores de corrección (sección IV.7.f.2), obteniéndose los resultados finales de la tesis, (sección VI.).

### **IV.6. Cronograma**

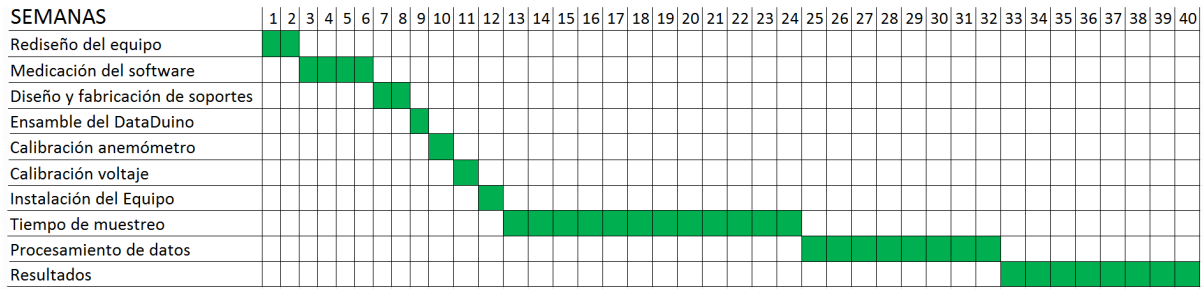


FIG. 19. Cronograma de la metodología.

#### IV.7. Datos y Métodos

Para la toma de datos se utilizó el estándar internacional para la medición del rendimiento energético de turbinas eólicas, como se describe en IEC-64100-12-1 anexo h (IEC, 2005). El estándar se aplicó como guía durante el diseño del procedimiento de medición para garantizar el mayor grado de precisión posible dado el tiempo y los recursos disponibles.

Los datos utilizados para cumplir los objetivos de este proyecto fueron tomados de forma continua desde 13 de marzo al 27 de mayo del 2016, con una frecuencia de un dato por segundo y de forma simultánea, para totalizar 104.387 datos, para cada una de siguientes variables:

1. Velocidad de viento (m/s).
2. Dirección del viento (°).
3. Corrientes (A).
  - Corriente de generación del aerogenerador (A).
  - Corriente de almacenamiento del banco de baterías (A).
  - Corriente de disipación térmica (A).
  - Corriente de consumo eléctrico (A).
4. Voltaje de carga y descarga del banco de baterías (V).
5. Distribución temporal de todas las variables arriba mencionados (t).

Todos los instrumentos fueron elegidos por su disponibilidad en el mercado y su bajo costo.

#### IV.7.a Velocidad de Viento

El instrumento utilizado para medir la velocidad del viento es un anemómetro de cazoletas N96FY que viene en los *kits* de repuestos de estaciones meteorológicas, (Fig. 20).



FIG. 20. Anemómetro de cazoletas N96FY utilizado en el proyecto.

#### IV.7.b Dirección del Viento

El instrumento utilizado para medir la dirección del viento es una veleta del *kit* de repuestos de estaciones meteorológicas modelo Wh1081, (Fig. 21)

La convención para determinar la dirección de vientos es la siguiente:

- Vientos que soplan desde el Norte:  $0^\circ$  ( $360^\circ$ )
- Vientos que soplan desde el Este:  $90^\circ$
- Vientos que soplan desde el Sur:  $180^\circ$
- Vientos que soplan desde el Oeste:  $270^\circ$



FIG. 21. Veleta de estación meteorológica Wh1081.

#### IV.7.c Sensor de Corriente

Los sensores de corriente utilizados fueron HASS 50-S de marca LEM de 50 ampere, que funcionan mediante el Efecto Hall <sup>13</sup>, (Fig. 22). La razón por la cual se utilizan sensores de 50 ampere se debe a que

<sup>13</sup>Efecto Hall es la aparición de un campo eléctrico por separación de cargas, en el interior de un conductor por el que circula una corriente en presencia de un campo magnético con un componente perpendicular al movimiento de las cargas.

en este proyecto el aerogenerador en estudio es de 700W de potencia nominal y la tensión del sistema es de 24V.



**FIG. 22.** Sensor de corriente HASS 50-S

Suponiendo que el aerogenerador, en teoría, pudiese llegar a 1000W de potencia nominal debido a la presencia de vientos extremos, se debería calcular la corriente máxima del sistema la cual se obtiene aplicando la siguiente ecuación utilizando 1000W como potencia máxima.

$$P(W) = V.I \quad (2)$$

Siendo,

P: potencia máxima (W).

I: Corriente (A).

V: Voltaje del sistema eólico (V).

De la ecuación (2), obtenemos que la corriente máxima del sistema llega a 42A, debido a esto la dimensión del tipo de sensores que se utilizarán para el proyecto y por disponibilidad en el mercado serán de 50A.

#### **IV.7.d Sensor de Voltaje**

El sensor de voltaje del banco de baterías está incorporado dentro de la placa o *shield* de corrientes. Este se conecta al banco de baterías del sistema y detecta la diferencia de potencial de la misma, mediante la programación del *Data-Duino* toma el dato de voltaje actual del banco de baterías y la almacena en la tarjeta SD de la placa principal del *Data-Duino*.

#### **IV.7.e Variables Auxiliares**

Variables de potencia:

- Generación de energía total del aerogenerador (W).
- Almacenamiento de energía en banco de baterías (W).
- Energía disipada por resistencia térmica (W).

Se obtuvieron mediante el producto de sus respectivas corrientes y sus respectivos voltajes.

## IV.7.f Procesamiento de Datos

### IV.7.f.1. Filtro de Datos

Para la confección de la curva potencia, se aplicaron tres filtros teniendo en cuenta previamente factores externos como la parada de la turbina para mantenimiento. Primero, se eliminaron los datos con una velocidad del viento inferior a  $0\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , segundo, se eliminaron los datos con una corriente inferior a  $0\text{A}$  y por último se eliminaron los datos con tensión de batería inferior a  $21,66\text{V}$  ( $22,8\text{V} - 5\%$ ) o superior a  $30,24\text{V}$  ( $28,8\text{V} + 5\%$ ).

### IV.7.f.2. Factor de Corrección

El brazo del anemómetro se encuentra  $3\text{m}$  abajo del eje del rotor. Para estimar la diferencia de velocidad de viento por la diferencia altura se utilizó un modelo de rugosidad de la ley de la potencia (Ray *et al.*, 2006)

$$\frac{v_{h(\text{rot})}}{v_{h(\text{ane})}} = \left( \frac{h_{(\text{rot})}}{h_{(\text{ane})}} \right)^\alpha \quad (3)$$

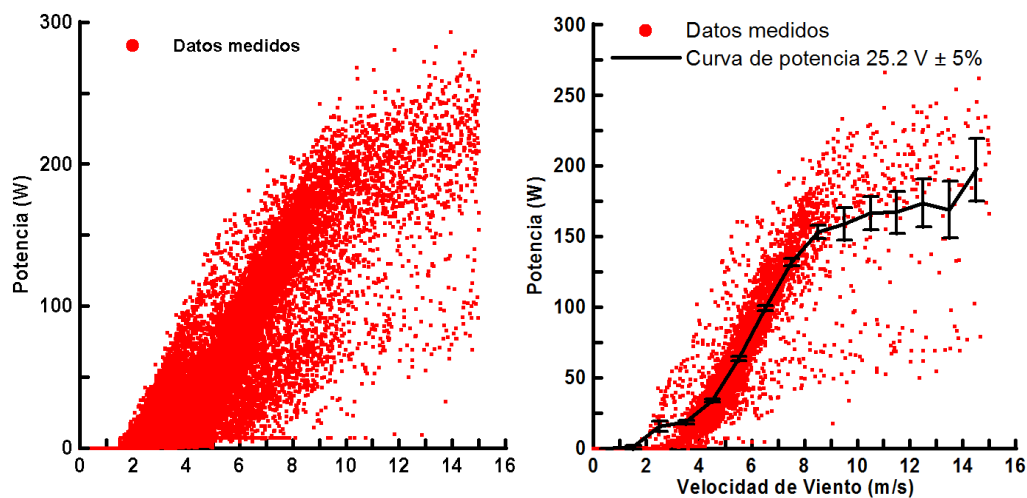
Donde  $v$  es la velocidad de viento,  $h_{\text{rot}}$  en la altura del eje,  $h_{\text{ane}}$  es la altura del anemómetro y  $\alpha$  es el factor de rugosidad.

### IV.7.f.3. Caracterización de la Curva de Potencia

Como se recomienda por el estándar (IEC, 2005), se seleccionó los datos en los cuales el banco de baterías estuvo en un voltaje de  $25,2\text{V} \pm 5\%$ , (Fig. 23 panel derecho).

La curva de potencia, (Fig. 23 panel derecho) se obtiene aplicando el método de compartimientos (*bins*). Este método consiste en agrupar las mediciones de la potencia de salida con las mediciones de viento en forma de una distribución de frecuencias, por lo que se obtiene un promedio de la potencia de salida por cada frecuencia de viento. El estándar exige divisiones de  $0,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y los promedios centrados en múltiplos de  $0,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . A mayor número de datos, mayor será el grado de certeza para el valor promediado en la curva de potencia.

El panel izquierdo, a partir del cual se confecciona la curva de potencia, representa el conjunto de datos medidos luego de pasar por el proceso de filtrado de datos y aplicar los factores de corrección.



**FIG. 23. Panel izquierdo:** Set de datos medidos. **Panel derecho:** El conjunto de datos medidos a  $25,2\text{V} \pm 5\%$  y su curva de potencia. La barra de error representa la desviación estándar de la potencia de salida en cada *bin*.

Según el anexo H de la norma IEC 61400-12-1, el conjunto de datos se considerará completo cuando haya cumplido los siguientes criterios:

1. Cada conjunto de velocidades del viento entre  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  por debajo del punto de corte y  $14\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , además debe contener un mínimo de 1 min de datos registrados (es decir, 60 puntos por conjunto).
2. La base de datos total debe contener al menos 60 horas de datos (es decir, 3600 puntos) con la turbina eólica dentro del rango de velocidad y la tensión de la batería dentro de  $25,2\text{V} \pm 5\%$ .
3. En el caso de las turbinas con sistemas de frenado mecánico (*furling*), la base de datos debe incluir conjuntos de datos de velocidad del viento completos que caracterizan el rendimiento de la turbina cuando está siendo frenada por el sistema *furling*

La base de datos de esta tesis cumple con el punto (1) y (2) por debajo  $11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  pero el punto (3) no se puede satisfacer a causa del que el régimen de vientos de la zona es bajo.

## V. DESARROLLO

### V.1. Caso de Estudio

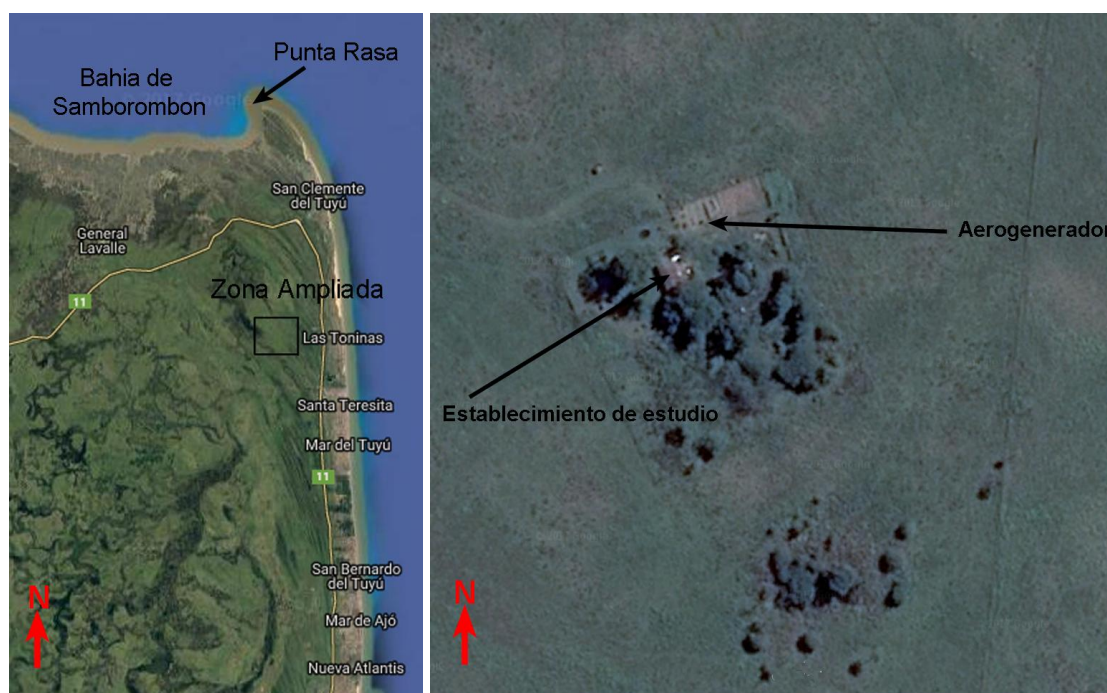
La propiedad pertenece al Distrito Pampeano Oriental (Cabrera, 1971) los campos son bajos, húmedos y son frecuentes los pajonales. Los suelos son salinos, arenosos e inundables durante gran parte del año, en los cuales se encuentran pajonales de carda (*Eryngium eburneum*), cortadera o (*Scirpus giganteus*) y carrizo (*Phragmites australis*) (Cabrera, 1971).

El establecimiento se encuentra sobre un camino troncal a 5km al oeste de la ruta provincial 11 en el Km 314 a la altura de la localidad de las Toninas, y a 362Km de la ciudad autónoma de Buenos Aires. Las coordenadas geográficas del sistema instalado son 36°29'47.7" de latitud sur y 56°45'24.4" de longitud oeste (Fig. 24).

El proyecto se desarrolla en el establecimiento "El Carrizal" que pertenece a la Red de Refugios de Vida Silvestre <sup>14</sup> entre el partido de General Lavalle y el Partido de la Costa.

La actividad principal que se desarrolla en el establecimiento es la cría de ganado bovino, el cual requiere zonas de pastoreo y grandes cantidades de agua. Para esto se utilizan molinos de bombeo de agua y tanques australianos para acopiar el agua que abastecen los bebederos. Además, de poseer actividades como de excursiones de avistamiento de aves y cabalgatas.

En el establecimiento se cosechan verduras, hortalizas y frutas que se utiliza para consumo interno. Una actividad que requiere de energía eléctrica en el establecimiento es la huerta para el riego periódico, mediante bombeo de la napa subterránea.



**FIG. 24. Panel izquierdo:** Zona de la provincia de Buenos Aires donde se encuentra el establecimiento en estudio. **Panel derecho:** Zona ampliada.

En la vivienda los requerimientos eléctricos son suministrados por un sistema híbrido, (ver glosario), en el cual el generador eólico carga el sistema de baterías para satisfacer las necesidades básicas y en caso de emergencias el propietario utiliza un sistema alternativo conectado a un generador Diesel.

El establecimiento está aislado de la red eléctrica y durante el primer año de su funcionamiento se

<sup>14</sup>Entidad representante para Argentina de la Organización Mundial de Conservación (WWF), [www.vidasilvestre.org.ar](http://www.vidasilvestre.org.ar)

utilizó un generador eléctrico Diesel, que consumía 40 litros diarios de combustible. En el 2011 se instaló un molino eólico debido al aumento del costo del combustible y el constante ruido producido que resultaba perjudicial para las actividades a desarrollar.

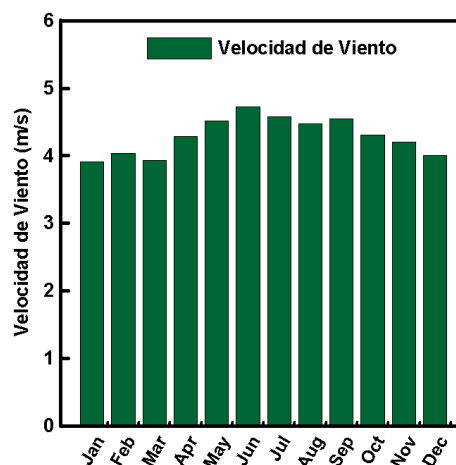
La siguiente figura, en su panel izquierdo, representa una foto aérea de la propiedad estudiada, en la cual se aprecia la ubicación del aerogenerador, ubicado a 20m de la propiedad sobre la huerta. También en esta figura se muestra el grupo de árboles situado al sudoeste de la propiedad que forma una barrera natural al viento para la producción energética del aerogenerador, no siendo la situación ideal para este tipo de energías. En el panel derecho se detalla el frente de la vivienda estudiada.



**FIG. 25. Panel izquierdo:** Foto aérea del establecimiento tomada desde un dron. **Panel derecho:** Foto de la propiedad estudiada en esta tesis

El propietario permitió trabajar con su aerogenerador Piggott de 700W, para instalar el registrador de datos Data-Duino, analizar sus hábitos de consumo, el recurso eólico y funcionamiento de su sistema eólico.

Para tener un idea aproximada de la magnitud de los vientos de la zona, se utilizó la base de datos de vientos (NASA, 2016) (obtenida con el programa HOMER pro). Esto arrojó un promedio anual de  $4.3\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , con un distribución anual, (Fig. 26), mostrando máximos en invierno y mínimos en verano.



**FIG. 26.** Recurso eólico del establecimiento. Base de datos de (NASA, 2016) obtenido con el programa HOMER pro.

En la casa de la estancia, los consumos energéticos eléctricos diarios abarcan también aquellos destinadas a las necesidades de los habitantes. Una vez funcionando el aerogenerador, el generador Diesel solo se utiliza en caso de mantenimiento y reparación del sistema eólico, (Fig 27).

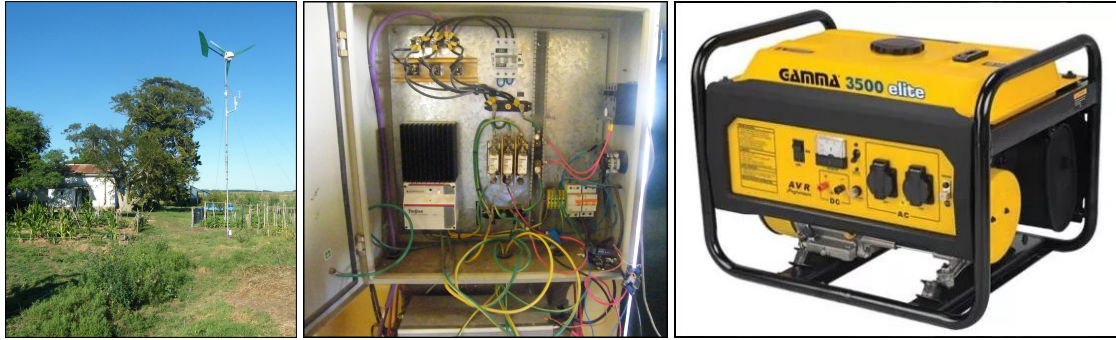


FIG. 27. El equipo de generación de energía actualmente instalado en el establecimiento

### V.1.a Hábitos del Consumo Eléctrico

Se realizó un inventario de consumos según los artefactos eléctricos y los hábitos de consumo de los habitantes. La demanda eléctrica que se genera en la casa proviene principalmente en la bomba de agua para el riego de la huerta, el entretenimiento, la iluminación y el aseo personal.

La frecuencia de consumo se obtuvo a través de una serie de cuestionarios que fueron completados por el dueño del establecimiento, que habita la propiedad, ver apéndice II., también se instaló un sensor de corriente conectado al *Data-Duino* para analizar el consumo total de vivienda y de esta manera compararlo con lo que los habitantes declararon en la encuesta realizada previamente.

El propietario reportó un carga horaria de utilización promedio de los artefactos durante durante las 24hs, en base a lo cual se determinó un consumo diario de 206.9Wh/día. La tabla (1) nos reporta el uso en horas de cada dispositivo eléctrico según los hábitos de consumo del propietario.

TABLA 1. Consumo eléctrico de la vivienda según lo declarado por sus habitantes

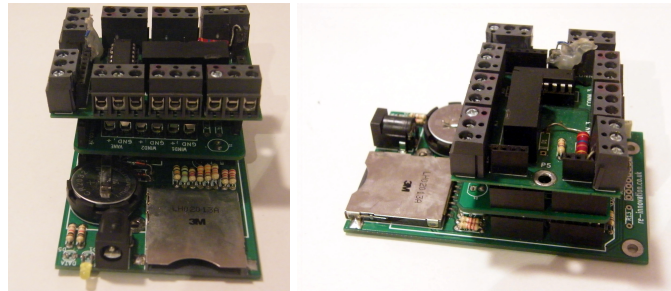
Lugar	Items	Pot(W)	Tiempo(h)	Total(Wh)
Cocina	Luces, laptops y celulares	14Wx2 - 90w - 7w	2h - 1h - 3h	139Wh
Hab. Principal	Iluminación	14W	0,5h	7Wh
2 Habitación	Iluminación	7W	0,15h	1,05Wh
3 Habitación	Iluminación	7W	0,15h	1,05Wh
Sala de estar	Iluminación	14W	0,15h	2,1Wh
Baño	Iluminacion	14W	0,15h	2,1Wh
Exterior	Iluminación - Bomba de Agua	14W - 350W	0,15h - 0,15h	54,6Wh
Total	-	-	-	206,9Wh

En base a los datos meteorológicos obtenidos por el HOMER pro y los datos de consumo eléctricos que reporta el propietario mediante la encuesta realizada, se procedió a instalar el *Data-Duino* eólico para contrastar los datos meteorológicos del área de estudio, analizar el consumo eléctrico real del dueño de la propiedad, estudiar el comportamiento, el funcionamiento y el rendimiento del aerogenerador.

### V.2. *Data-Duino* Eólico

El registrador de datos *Data-Duino* eólico está conformado por la placa principal y sus dos *shields*, la de corrientes y la de vientos, (Fig. 28). Mediante esta configuración se logra medir el número de parámetros

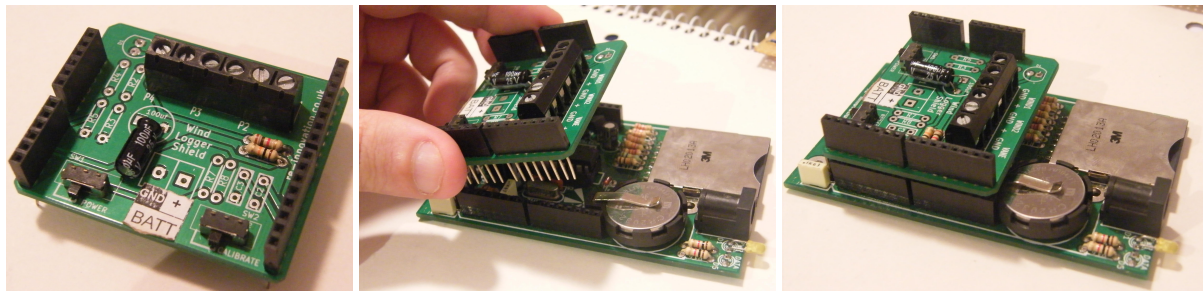
que se propuso como objetivo para esta tesis, sección II.



**FIG. 28.** *Data-Duino* eólico completo

### V.2.a *Shield* de Vientos

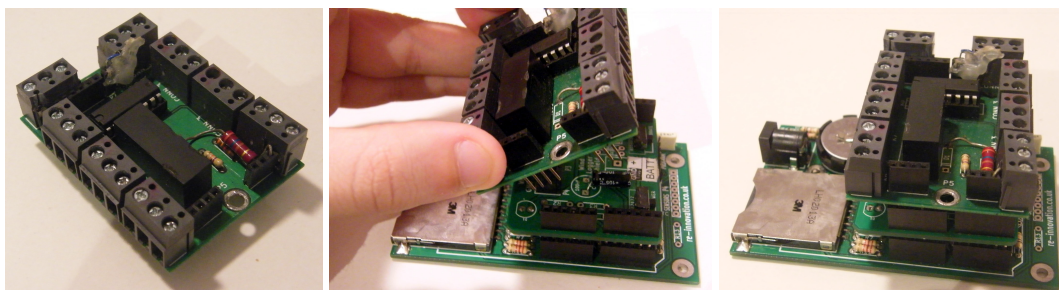
La *shield* de vientos es una placa que se coloca en la parte superior de la placa principal del *Data-Duino* y permite conectar dos anemómetros y un sensor de dirección de vientos. Los datos registrados por los sensores se almacenan en la tarjeta SD que posee la placa principal *Data-Duino*



**FIG. 29.** **Panel Izquierdo:** *Shield* de vientos. **Panel Central:** Colocación del *shield* de vientos sobre el *Data-Duino*. **Panel Derecho:** *Shield* de vientos montado sobre el *Data-Duino*.

### V.2.b *Shield* de Corrientes

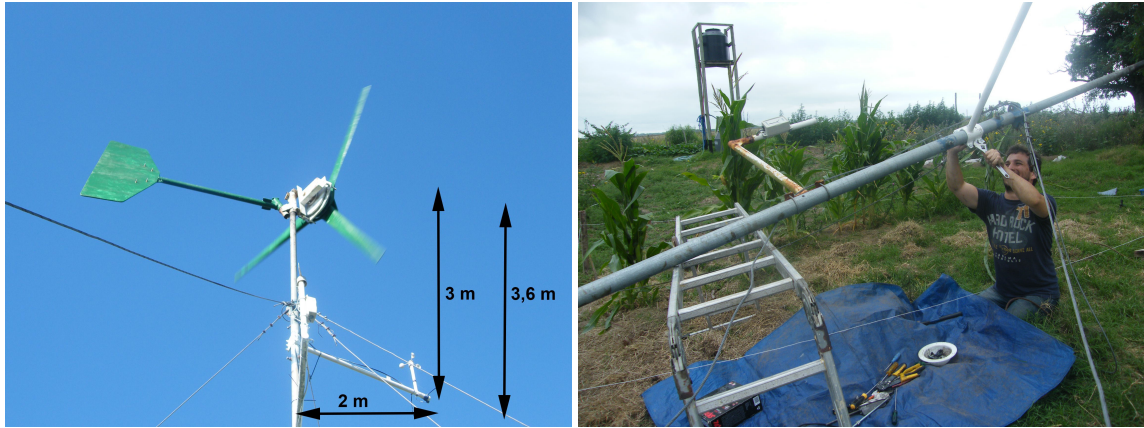
La *shield* de corrientes es una placa que se coloca en la parte superior del *shield* de vientos que permite conectar ocho sensores de corrientes y además esta placa permite registrar los ciclos de carga y descarga del banco de baterías del sistema eólico. Los datos registrados por los sensores son almacenados en la tarjeta SD que posee la placa principal *Data-Duino*.



**FIG. 30.** **Panel Izquierdo:** *Shield* de corrientes. **Panel Central:** Colocación del *shield* de corrientes sobre la *shield* de vientos. **Panel Derecho:** *Shield* de corrientes montado sobre el *shield* de vientos y está montada sobre el *Data-Duino*.

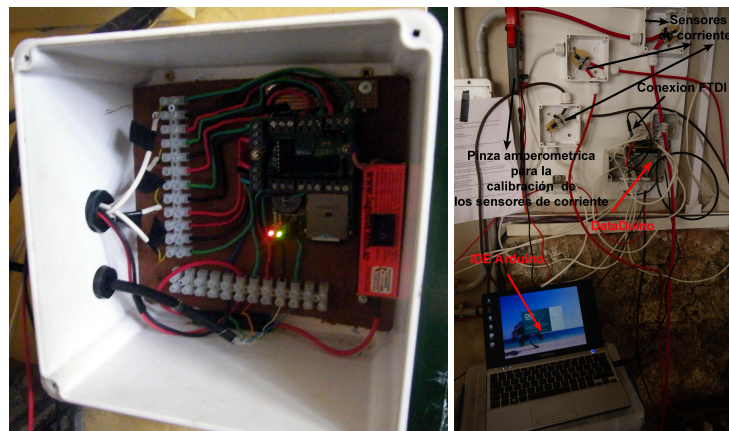
### V.3. Instalación del *Data-Duino*

Los instrumentos de medición se instalaron sobre el mástil del aerogenerador, el cual es de acero tubular de 10m de altura, el anemómetro y la veleta se montaron a 3,6 y 3m de distancia respectivamente del centro del rotor siguiendo la norma (IEC, 2005), (Fig. 31).



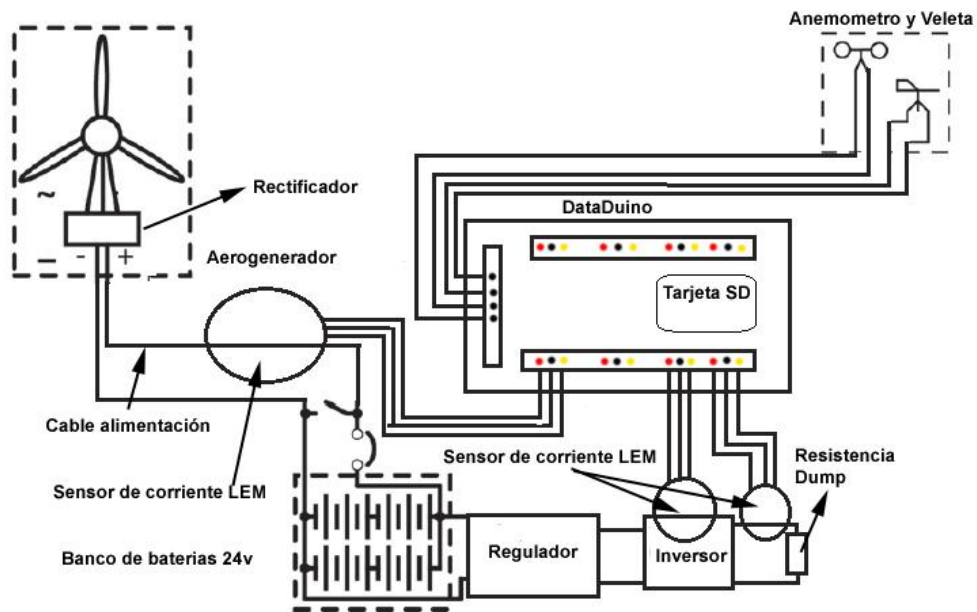
**FIG. 31. Panel Izquierdo:** Fotografía de la distancia de los instrumentos al mástil mostrando su proximidad al aerogenerador. **Panel Derecho:** Instalación del brazo del anemómetro en el mástil del aerogenerador

El equipo *Data-Duino* se instaló debajo del tablero eléctrico existente en el lugar, el cual se colocó dentro de un caja eléctrica sellada, separada del mismo para que las conexiones no interfieran entre sí y con el banco de baterías situado debajo de este, evitando el peligro de posibles cortocircuitos, (Fig. 32).



**FIG. 32. Panel Izquierdo:** Instalando el *Data-Duino* debajo del tablero eléctrico. **Panel derecho:** *Data-Duino* cableado e instalado.

Luego, se procedió a cablear los instrumentos utilizando 30m de cable de red, Cat 5-e, el cual se fijó al mástil llevándolo bajo tierra hasta la posición del *Data-Duino* y conectándolo al banco de baterías de 24V del sistema eólico. La figura 33 muestra el diseño del conexionado de los instrumentos utilizados para recolectar los datos.

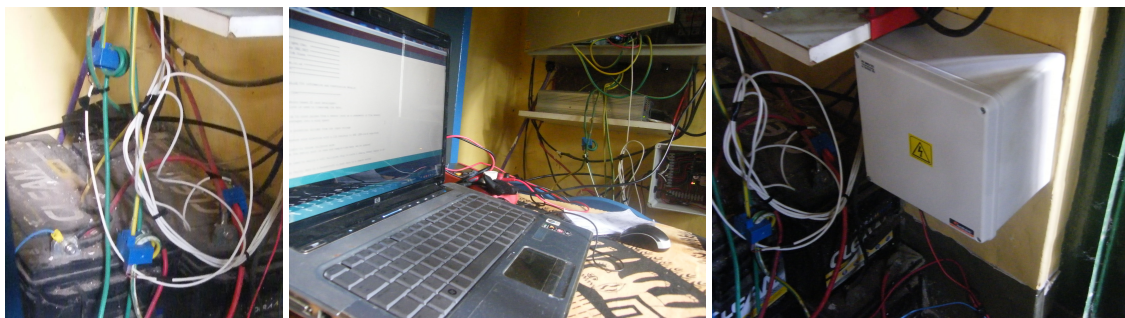


**FIG. 33.** Diagrama de cableado del equipo *Data-Duino* instalado en el aerogenerador de la casa de campo en el Carrizal.

Luego de instalado el *Data-Duino*, se pasó a calibrar la veleta, conectando el *Data-Duino* a la computadora, verificando que el valor que arroja el (IDE) se ajusta a la dirección norte. El procedimiento se describe en la sección V.4. de calibración.

Se instalaron tres sensores de corriente HASS-50s, para medir el consumo del establecimiento, la corriente de carga del aerogenerador y la corriente de disipación térmica. La corriente del banco de baterías se calculó como la suma de la corriente de generación más la corriente de disipación térmica.

A continuación se calibraron dichos sensores de corriente para encontrar el valor de corriente nula, (*offset*), sección V.4., (Fig. 34).



**FIG. 34. Panel Izquierdo:** Sensores de corriente HASS-50s instalados. **Panel Central:** Calibración del sistema de sensores de corriente utilizando una computadora portátil. **Panel Derecho:** *DataDuino* instalado tomando datos debajo del tablero eléctrico.

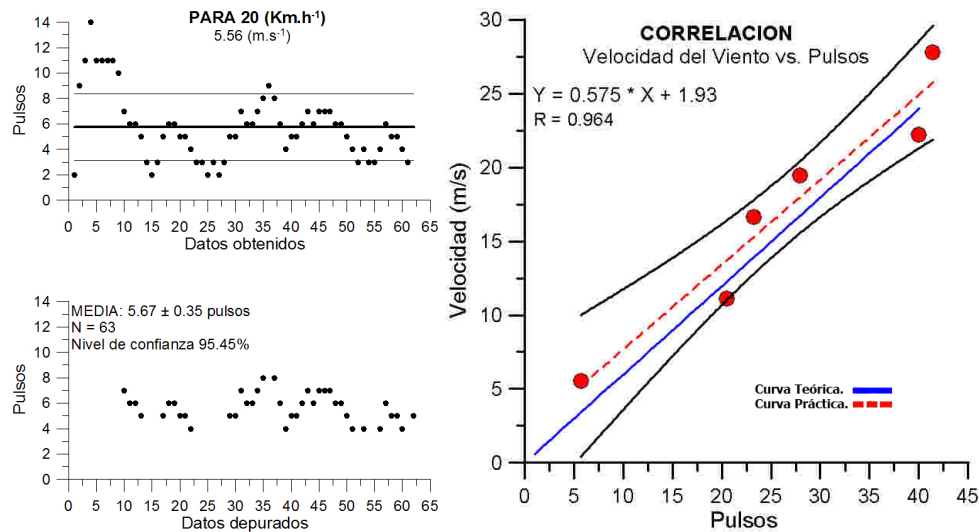
## V.4. Calibraciones

### V.4.a Anemómetro

Su calibración se realizó mediante dos técnicas una teórica y otra práctica.

En la calibración teórica se sabe que el anemómetro genera un pulso por cada vuelta, lo que representa

$2 \cdot \Pi \cdot r$  e informa cuantos pulsos por segundo registra, este valor es multiplicado por  $2 \cdot \Pi \cdot r$  ( $r = 0.095\text{m}$ ). Por lo tanto sabemos que un pulso por segundo equivale a  $0,5966\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  Fig. 35).



**FIG. 35. Panel izquierdo:** Datos totales y depurados para la velocidad de  $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  el mismo procedimiento se realizó para  $40\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $70\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $80\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  y  $100\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ . **Panel derecho:** Cada punto rojo representa el promedio de los datos depurados a cada una de las velocidades utilizadas para la calibración. La recta roja en trazos es la de correlación de velocidad del viento en función de los pulsos del anemómetro. La recta azul continua es la teórica de calibración.

En la calibración práctica se instaló el anemómetro junto al *Data-Duino* en la parte superior de un automóvil, se tomaron datos de los pulsos generados por el anemómetro, que fueron registrados en el *Data-Duino*, para diferentes velocidades del automóvil:  $20\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $40\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $60\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ ,  $70\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$  y a  $80\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$ . La prueba se llevó a cabo en un día con vientos débiles para que los factores ambientales influyan lo menos posible en la calibración. Lo ideal es calibrar el anemómetro en un túnel de viento, elemento que no estaba disponible, (Fig. 35).

El intervalo de muestreo para cada una de estas velocidades fue de dos minutos de datos a razón de un dato por segundo, estos datos fueron depurados con el criterio de  $\pm 3$  desvíos estándar, los datos fueron promediados para tener un punto de calibración para cada velocidad (Fig. 35 ambos paneles). Se realizó una correlación lineal por cuadrados mínimos entre los pulsos y la velocidad, la cual es la recta de calibración experimental en rojo, línea punteada, (Fig. 35).

La recta azul continua, (Fig. 35), que representa la calibración teórica está situada dentro de los intervalos de confianza de la recta roja punteada de calibración práctica, de aquí se deduce que la calibración práctica es estadísticamente significativa con respecto a la teórica. Pero a pesar de eso, los errores cometidos por el método del automóvil hacen que para velocidades muy bajas existan errores sistemáticos. Como ser que para pulso 0 arroje velocidades de vientos de  $1,93\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  lo cual no tiene sentido físico, esto se explica porque los vientos propios de la zona afectaban las mediciones a bajas velocidades. Por lo tanto, al no disponer un túnel de viento se utilizará la curva teórica a los efectos del cálculo.

#### V.4.b Velea

Su calibración (Fig. 36), se realizó *in situ* una vez colocada en la torre del aerogenerador. Se procedió a retirar la parte superior del instrumento y se la orientó al norte magnético mediante el uso de una brújula y luego se hizo la corrección por la declinación magnética, es decir por la diferencia con el norte geográfico.

La declinación magnética de la carta del año 2002 para la zona de las toninas fue de  $5^\circ$  E. luego se la debe corregir para obtener el dato del año 2016 de la siguiente manera. La leyenda de la carta de la

zona indica que la declinación media anual es de 0 grados 10 minutos 6,12 segundos o lo que es lo mismo redondeando: 10,102 minutos

1. Calcular los años transcurridos 2016 (año actual) menos 2002 (año del mapa) = 12 años.
2. Multiplicar los años transcurridos por el valor anual de la declinación 12 años por 10,102 minutos = 121,224 min.
3. Convertir los minutos en grados enteros  $121,224 / 60 = 2,02$  grados.
4. Redondear al entero más próximo  $2,02 = 2$  grados.
5. Como la declinación es hacia el E se considera positiva por lo que se suma 2 grados al valor que indica el mapa  $5 \text{ grados} + 2 \text{ grados} = 7 \text{ grados}$ .

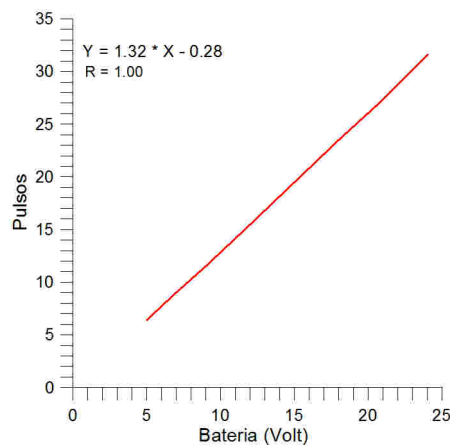
De esta manera se hace coincidir la veleta con el norte geográfico.



**FIG. 36.** Calibrando la veleta al norte geográfico

#### V.4.c Voltaje

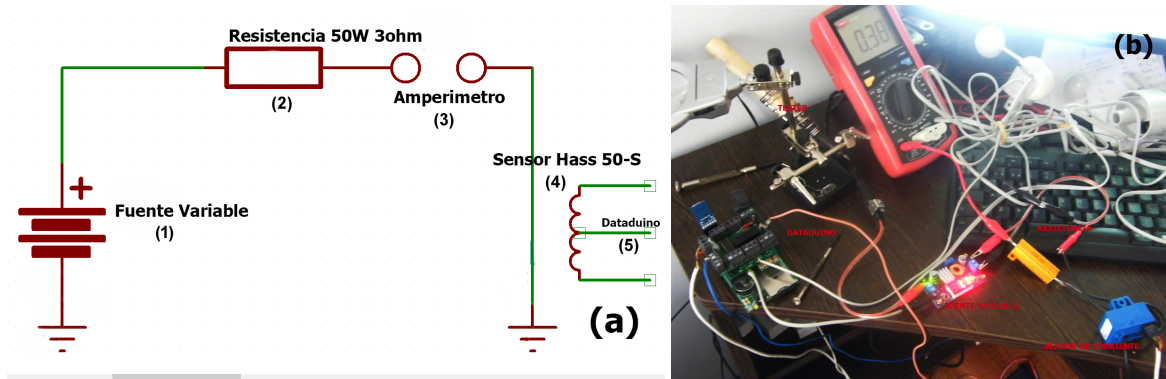
La calibración del sensor de carga y descarga de batería se realizó mediante una fuente de corriente continua regulable de 0V a 60V y utilizando el *Data-Duino* para registrar los datos en un intervalo de 1 minuto por escala de voltaje. De esta manera, se obtuvo una recta de calibración de pulsos en función de voltaje o diferencia de potencial.



**FIG. 37.** Recta de calibración de voltaje en función de los pulsos.

#### V.4.d Corrientes

Para la calibración del sensor de corriente se utilizó el siguiente circuito esquemático (Fig. 38). Con una fuente variable (1) y una resistencia en serie (2), se tomaron diferentes valores de voltaje, construyéndose una tabla de valores en la cual a cada valor de voltaje le corresponde a un valor de corriente medido con un amperímetro Unit-T UT70A conectado en serie, (3). Complementariamente, se utilizó un sensor de corriente HASS-50s (4) conectado al *Data-Duino* (5), para saber a qué valor de corriente corresponde a cada uno de los valores de los pulsos que arroja como salida el registrador de datos *Data-Duino*.

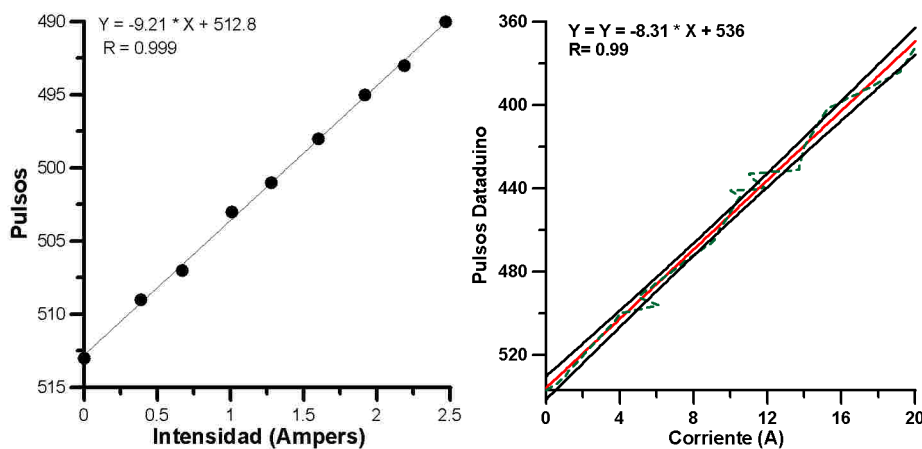


**FIG. 38. a:** Circuito esquemático para la calibración del sensor de corriente. **b:** Conexión de la calibración del sensor de corriente.

Realizando una tabla de valores de pulsos en función de la intensidad, se realizó una recta de calibración por el método de regresión por cuadrados mínimos, obteniéndose la pendiente de la recta de calibración del sensor de corriente HASS-50S, (Fig. 39 panel izquierdo).

Además de la recta de calibración, se realizaron mediciones de corriente con una pinza amperométrica y el *Data-Duino in situ*, a su vez se tomaron diferentes mediciones para realizar un tabla de valores de pulsos en función de la intensidad con la cual se realizó otra recta de calibración por el método de regresión por cuadrados mínimos, mediante lo cual se obtuvo no sólo la pendiente de la recta de calibración si no la medición en tiempo real de la misma, (Fig. 39 panel derecho).

Para el análisis de esta tesis se utilizó ambas rectas para verificar el funcionamiento de los sensores pero para analizar los datos obtenidos en esta tesis se utilizó la recta de calibración *in situ* (Fig. 39 panel derecho).



**FIG. 39. Panel izquierdo:** Recta de calibración del sensor de corriente HASS-50S en el banco de prueba. **Panel derecho:** Recta de calibración del sensor de corriente Hass-50S *in situ*

#### V.4.d.1. Calibración del *offset*

La calibración del *offset* o los valores del sensor de corriente “0” se debe realizar una vez instalado todo el sistema *Data-Duino* con todos los sensores de corriente, sección V.3.

Para realizar la calibración se debe verificar que el aerogenerador esté apagado y que no haya ningún tipo de consumo eléctrico en la vivienda, para que no exista ninguna circulación de corriente. Una vez con todo el consumo eléctrico apagado, se procede a conectar el *Data-Duino* a una computadora utilizando el cable USB-FTDI.

Luego mediante el IDE se verifica los valores de corriente que arroja el programa. Estos valores serán el *offset* o “0” para cada uno de los sensores de corriente. Una vez registrados los valores de *offset* de cada sensor se procede a encender el aerogenerador nuevamente.

Una vez concluida la calibración de los sensores de corriente, se izó el mástil y se puso en marcha el aerogenerador. Finalmente se verificó que los sensores estén registrando datos, a continuación se desconecta el *Data-Duino* de la computadora y se lo enciende para que se alimente desde el banco de baterías, de esta manera equipo comienza a registrar datos en la tarjeta (SD) de manera independiente.

#### V.5. Análisis de Costos del *Data-Duino*

El costo de producción del equipo registrador de datos *Data-Duino* es de un total de US \$55,86, que incluye el cableado y caja eléctrica el cual fue de US \$ 29. En la siguiente tabla se presenta el costo de producción de las diferentes partes del equipo y en el anexo I.3.a se encuentra en detalle del costo de cada uno de los elementos necesarios para la producción del equipo y de su instalación.

TABLA 2. Valor Total del *Data-Duino*

DESCRIPCIÓN	PRECIO
Placa principal <i>DataDuino</i>	US \$ 27,49
Placa de <i>shield</i> de vientos	US \$ 4,09
Placa <i>shield</i> de corriente	US \$ 24,28
Materiales usados para la instalación	US \$ 29,00
Total	US \$ 84,86

#### V.5.a Equipos de Similares Prestaciones



FIG. 40. Panel izq.: Registrador de datos *Logic Energy*. Panel der.: Registrador de datos *Symphonieplus3*. Figuras tomadas de <https://www.windlogger.eu/> y <https://www.nrgsystems.com> respectivamente.

El equipo registrador de datos de *Logic Energy*, (Fig. 40 panel izquierdo), se comercializa a un precio de US \$ 367,34 puede utilizar hasta 2 anemómetros y una veleta simultáneamente. Posee una entrada para una sonda externa de temperatura y registra los datos en intervalos de 1 minuto o 10 minutos, su almacenamiento queda registrado en tarjeta micro SD en formato .csv estándar para importar a Excel o a un software de análisis de viento. Los datos de los valores surgen de las especificaciones técnicas que se encuentran en la página web: <https://www.windlogger.eu/collections/small-wind-turbine-data-loggers/products/lewl-wind-logger-1>

El *Symphonie Plus-3*, (Fig. 40 panel derecho), es un registrador de datos que posee quince entradas para quince sensores con estándares industriales que permite recopilar y almacenar datos con fecha y hora. Admite conectar anemómetros, veletas de dirección de viento, y canales adicionales para agregar sensores a elección. Posee numerosas opciones de configuración de sensores, dependiendo de los requerimientos de su estudio particular de mediciones del viento a un costo de US \$ 1.104,48. Las especificaciones surgen del manual que se encuentran en la página web: <https://www.nrgsystems.com/products/data-loggers/detail/symphonieplus3-data-logger>



**FIG. 41. Panel izq.:** Registrador de datos *Vortex*. **Panel der.:** Registrador de datos *Power Predictor* Figuras tomadas de <http://www.inspeed.com> y <http://www.reuk.co.uk/wordpress/wind/power-predictor-from-better-generation/> respectivamente.

Con un costo de US \$ 399,00 el *power predictor*, (Fig. 41 panel derecho), es un registrador de datos que mide la energía solar y eólica (velocidad de viento y dirección) viene con un año de acceso gratuito en línea donde los datos serán analizados. El informe en línea que este proporciona compara las principales turbinas eólicas y paneles solares en el mercado, en términos de retorno de la inversión, generación de energía anual, ahorro de costos y el efecto en su huella de carbono. Las especificaciones técnicas se encuentran en la web: [http://site.earthtechproducts.com/PDFs/manual\\_for\\_power\\_predictor.pdf](http://site.earthtechproducts.com/PDFs/manual_for_power_predictor.pdf)

El equipo registrador de datos *Vortex*, (Fig. 41 panel izquierdo), está diseñado para el monitoreo y almacenamiento de la velocidad de viento, el cual no incluye la dirección del viento, el registrador de datos incluye el anemómetro y el costo total del equipo es de US \$ 289,00. Las especificaciones técnicas se encuentran en la web: [http://www.inspeed.com/wind\\_data\\_logging/windware\\_wind\\_speed\\_data\\_kit.asp](http://www.inspeed.com/wind_data_logging/windware_wind_speed_data_kit.asp)

De aquí se deduce que las diferentes prestaciones de los equipos comerciales no siempre se ajustan a las necesidades de los usuarios, diseñadores e instaladores de aerogeneradores. Los equipos que si se adaptan a los requerimientos de los actores ya mencionados no siempre son accesibles en términos económicos a los usuarios de SWT, esto refuerza las ventajas del registrador de datos *Data-Duino* que es un dispositivo desarrollado específicamente para ser económico en la implementación de los sistemas eólicos.

**TABLA 3.** Tabla comparativa de los equipos. Confeccionada con las especificaciones técnicas proporcionadas por las páginas web mencionadas en esta sección V.5.a

<b>Parametros</b>	<b>Logic</b>	<b>Sympohnie</b>	<b>Vortex</b>	<b>Predictor</b>	<b>Data-Duino</b>
Velocidad de viento	Si	Si	Si	Si	Si
Dirección de vientos	Si	Si	No	Si	Si
Temperatura y Humedad	Si	Si	No	No	Si
Medición de Corriente	No	Si	No	No	Si
Cantidad Sensores	2	15	1	2	13
Almacenamiento	Si	Si	No	Si	Si
Software	Si	Si	No	Si	No
Código abierto	No	Ni	No	No	Si
Precio	US \$ 367,34	US \$ 1.104,48	US \$ 289,00	US \$ 399,00	US \$ 55,86

## VI. RESULTADOS DE LAS MEDICIONES

### VI.1. Dirección y Velocidad del Viento

Los vientos predominantes del sitio estudiado son del norte, aunque son vientos de baja velocidad  $4\text{m.s}^{-1}$ , los vientos del oeste, sudoeste y sur son los que tienen mayor velocidad  $> 10\text{m.s}^{-1}$  que son los que producen la mayor cantidad de energía, (Fig. 42 panel izquierdo). En el panel derecho, se muestra la frecuencia de distribución de la velocidad de los vientos durante el periodo de muestreo, el cual tuvo un promedio de  $5,03 \pm 0,05\text{m.s}^{-1}$  y los vientos con mayor probabilidad de frecuencia centrada en  $1.75\text{m.s}^{-1}$ .

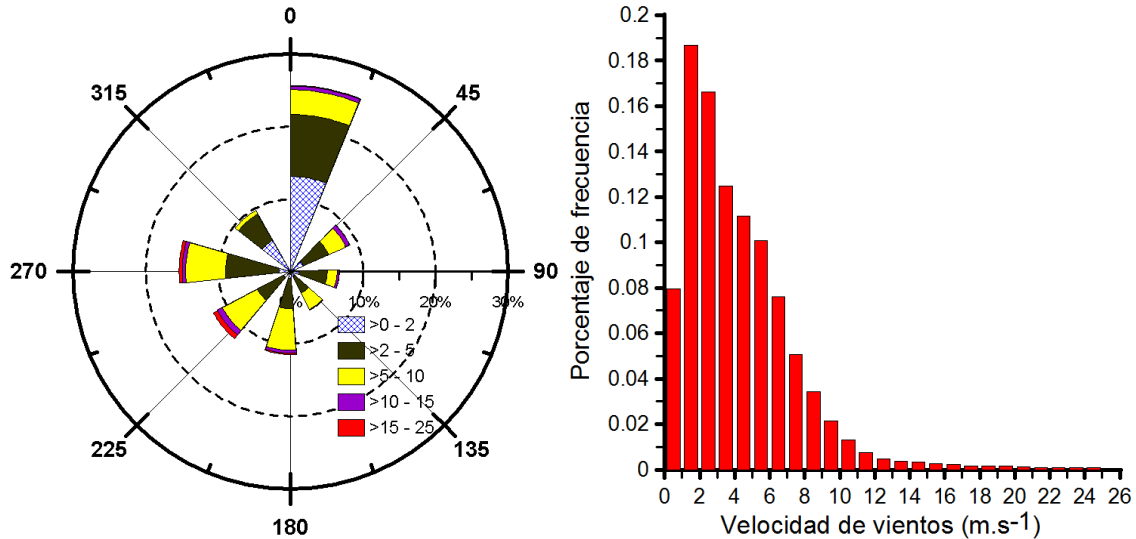


FIG. 42. Panel Izquierdo: Rosa de velocidades, velocidades en  $\text{m.s}^{-1}$ . Panel derecho: Frecuencia de distribución de vientos del sitio, durante el periodo de muestreo.

### VI.2. Datos del Generador Eólico

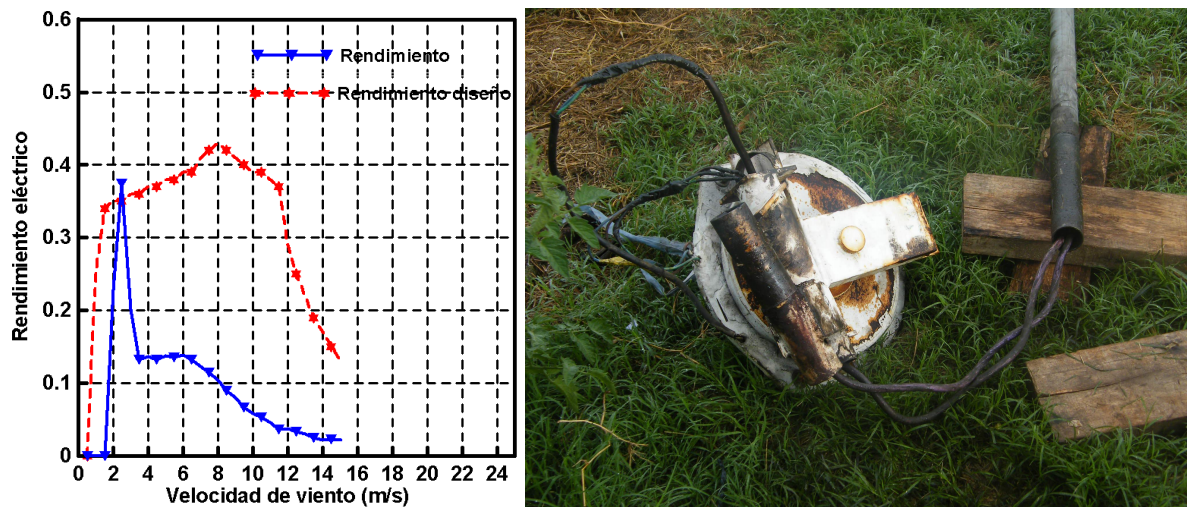
#### VI.2.a Rendimiento Eléctrico

Existen diferentes maneras de definir el rendimiento en un sistema de energía eólica (rendimiento de las aspas, rendimiento mecánico, rendimiento de conversión CA / CC, etc.), sin embargo, a menos que se indique lo contrario, el término rendimiento que se utiliza en esta tesis es el siguiente:

$$\eta = \frac{P_{CC}}{P_{viento}} = \frac{IV}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3} \quad (4)$$

- $P_{CC}$ : potencia eléctrica de las baterías (W)
- $P_{viento}$ : potencia ideal disponible en el viento (W)
- $I$  = corriente (A)
- $V$  = voltaje (V)
- $\rho$  = densidad del aire ( $\text{kg.m}^{-3}$ )
- $A$  = área de barrido del rotor ( $\text{m}^2$ )
- $v$  = velocidad del viento ( $\text{m.s}^{-1}$ )

Los datos muestran que a velocidades de viento de hasta  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  el rendimiento es de 0,3 a medida que aumenta la velocidad de viento el rendimiento disminuye considerablemente a partir de  $2,5\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , de aquí en más el rendimiento está por debajo de lo esperado en el diseño (Piggott, 2013), (Fig. 43 panel izquierdo).



**FIG. 43. Panel izquierdo:** Rendimiento eléctrico total de la turbina eólica. **Panel derecho:** Imagen del alternador dañado.

Para ello existen dos razones, la primera es que por el principio de funcionamiento aerodinámico de las máquinas eólicas, éstas intentan mantener una relación óptima entre la fuerza de sustentación y arrastre siendo predominantemente la de sustentación y a medida que las aspas giran a mayor velocidad las mismas generan un viento propio que a su vez se frenan a sí mismas dificultando mantener esta relación lo cual disminuye su rendimiento.

La segunda razón es una falla eléctrica en el alternador la cual produciría una baja abrupta en el rendimiento como se puede observar en la (Fig 40 panel izquierdo).

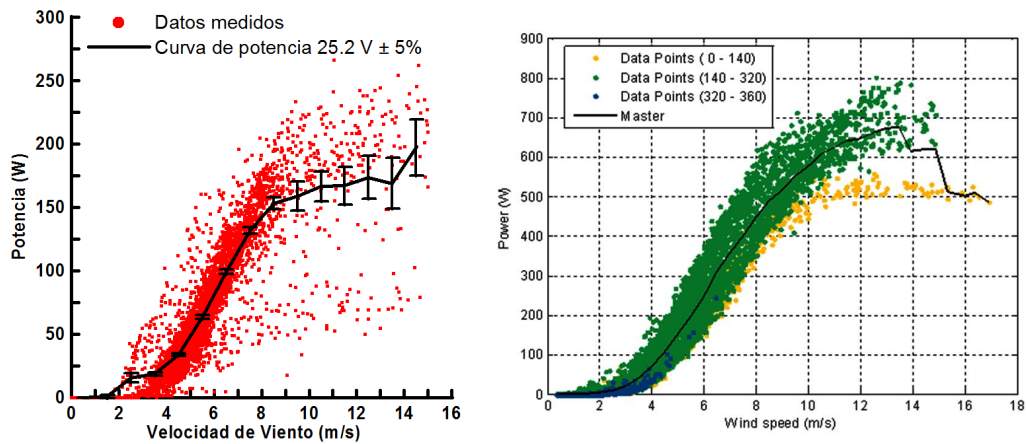
Se sospechó que la pérdida de rendimiento fue causada por la segunda razón o sea un problema eléctrico. Por lo cual, se midió el funcionamiento de las bobinas del generador eólico y se pudo determinar que unas de las ramas del circuito de las bobinas estaba dañado, (Fig.43 panel izquierdo), disminuyendo el funcionamiento a la mitad de su capacidad de generación eléctrica, (Fig. 44 panel izquierdo). Esta falla en el generador se descubrió a razón de los datos tomados por el *Data-Duino*, expresados en los gráficos de la curva de potencia, (Fig. 44 panel izquierdo), y la curva de rendimiento eléctrico, (Fig.43 panel izquierdo).

## VI.2.b Curva de Potencia

La curva de potencia se calcula a partir del conjunto de datos de viento separados en intervalos de  $1\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  con sus respectivas potencia de salida del aerogenerador para tres distintos rangos de voltaje de batería ( $22,8\text{V} \pm 5\%$ ,  $25,2\text{V} \pm 5\%$  y  $28,8\text{V} \pm 5\%$ ), cuyos datos se presentan en la tabla 4 como *subset* (A), (B) y (C) respectivamente.

La velocidad de arranque del aerogenerador es de  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  lo cual hace ideal para el sitio, dado que la velocidad media en ese lugar es de  $5,03\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , estos valores son suficientes para cubrir las necesidades energéticas del establecimiento estudiado.

La curva de potencia producida por los datos depurados, según se explicó en la sección IV.7.f.3, muestra un pico de potencia  $270\text{W}$  con  $11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Este valor de potencia es significativamente menor que la de diseño, la cual es de  $700\text{W}$  (Piggott, 2013). Este valor se corresponde al de un aerogenerador de las mismas características instalado en la península de Scoraig en Escocia, (Fig. 44 panel derecho).



**FIG. 44. Panel izquierdo:** Curva de potencia estudiada en General Lavalle. **Panel Derecho:** Curva de potencia de un aerogenerador de 700W de las mismas características, instalado en la península de Scoraig Escocia, gráfico cedido por gentileza de Jon Sumanik Leroy.

**TABLA 4.** Curva de potencia medida para el conjunto de datos y sus subconjuntos.

Vientos ( $m.s^{-1}$ )	Datos	Subset A	Pot (W)	Subset B	Pot (W)	Subset C	Pot (W)
0,5	2235	2175	0	60	0	0	0
1,5	7767	7706	1,19	61	0,6	0	0
2,5	8767	8695	5,09	72	15,3	0	0
3,5	8816	8324	10,8	423	18,4	69	50
4,5	8985	7986	19,3	921	33,8	78	61,6
5,5	5271	3815	56	844	63,5	252	68,8
6,5	3514	2241	83,7	661	99,2	612	84,2
7,5	1777	800	109,1	410	131,8	567	119
8,5	1092	401	120,5	196	153,2	495	146
9,5	677	199	135,2	84	158,8	394	163,8
10,5	449	96	142,5	59	166,4	294	183,5
11,5	371	51	152,9	52	166,9	268	188,8
12,5	301	26	162,9	48	173,7	227	194,2
13,5	276	24	161,3	32	169	220	204,1
14,5	257	16	127,6	21	197,2	220	210,3
Total	50555	42555	-	3944	-	3696	-

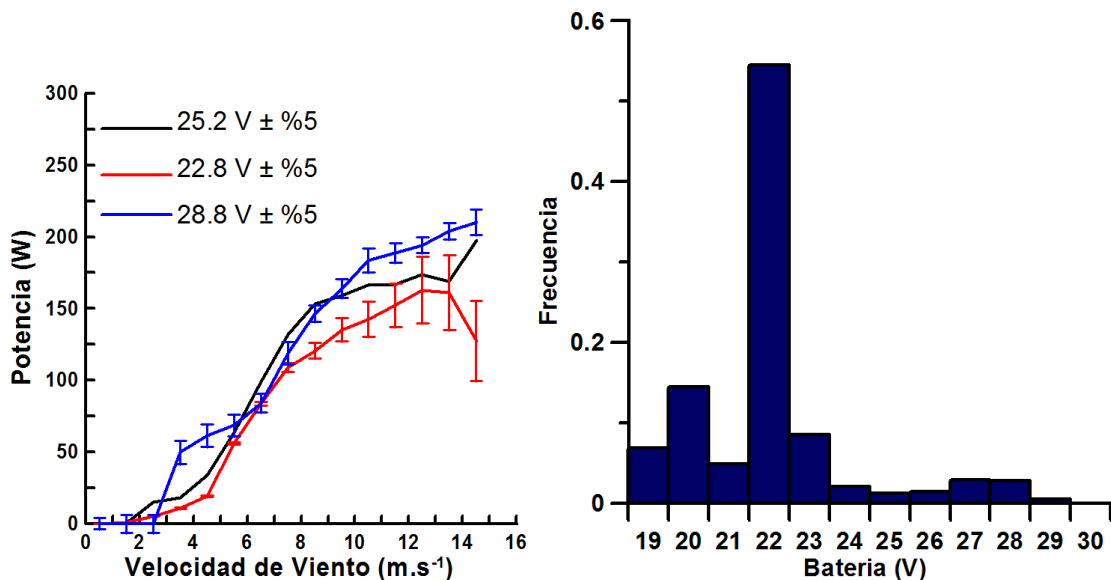
### VI.2.c Influencia del Banco de Baterías

A una velocidad dada de viento, la potencia de salida de una turbina eólica conectada a un banco de baterías depende del voltaje de las baterías (De Broe *et al.*, 1999). La curva de potencia debe ser independiente de la configuración de la batería en particular. Para ello, la norma IEC exige que se establezca el voltaje de la batería a 25,2V (para sistemas de tensión nominal de 24V). Además se deben obtener curvas de potencia adicionales, para una configuración de voltajes de batería de (22,8V) y de (28,8V).

Si el banco de baterías estuviese en óptimas condiciones la curva de 28.8V  $\pm$  5 % tendría una menor potencia de salida que la curva de 22.8V  $\pm$  5 %, dado que a altas ráfagas de viento  $>$  que  $7\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  el banco de baterías se cargaría rápidamente y se elevaría a valores de 28.8V. Cuando la velocidad de viento llegase a ser  $>$  que  $11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  el sistema *furling* comenzaría a regular la potencia de salida, en ese punto se podría observar velocidades de viento y voltajes de batería altos, pero baja potencia de salida, ya que la misma estaría siendo regulada por el sistema *furling*.

En el caso de estudio se puede observar que la influencia del banco de baterías es predominante sobre el sistema de regulación de potencia ya que dicho banco está desgastado por el tiempo de uso, no pudiendo elevar su voltaje fácilmente como un banco de baterías nuevo, dado que la mayor frecuencia de datos se encuentra en el rango de 22V, (Fig 45, panel derecho). En un banco en buen estado la mayor frecuencia de datos se encuentra a los 24V.

Aunque existan ráfagas de viento altas, el banco de baterías estudiado le cuesta superar la tensión nominal del sistema (24V). Sin embargo, cuando existen vientos  $>$  que  $11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y el banco de baterías está en 28.8V  $\pm$  5 %, esto quiere decir que previamente hubo un tiempo relativamente considerable, con esos vientos, para que el banco de baterías llegase a ese nivel de voltaje, antes de que el sistema *furling* regule la potencia de salida, es por eso que la curva de 28.8V  $\pm$  5 % tiene una mayor potencia de salida que la de 22.8V  $\pm$  5 %, (Fig. 45 panel izquierdo).



**FIG. 45. Panel izquierdo:** Influencia del banco de baterías en la curva de potencia.**Panel derecho:** Frecuencia de carga de las baterías en el periodo de muestreo, se observa el periodo de mayor frecuencia en 22V.

### VI.2.d Producción Anual de Energía (AEP)

El cálculo de AEP se estima aplicando la medición de la curva de potencia a diferentes velocidades de viento, tal como lo especifica la norma (IEC, 2005).

Para este caso se utiliza la distribución de Weibull. La estimación de AEP se realiza a la altura del rotor

del aerogenerador con las mediciones de velocidad de viento promedio de 0 a 15m.s<sup>-1</sup> según la siguiente ecuación.

$$AEP = T \cdot \sum_{i=1}^N [F(V_i) - F(V_{i-1})] \left( \frac{P_{i-1} + P_i}{2} \right) \quad (5)$$

Donde:

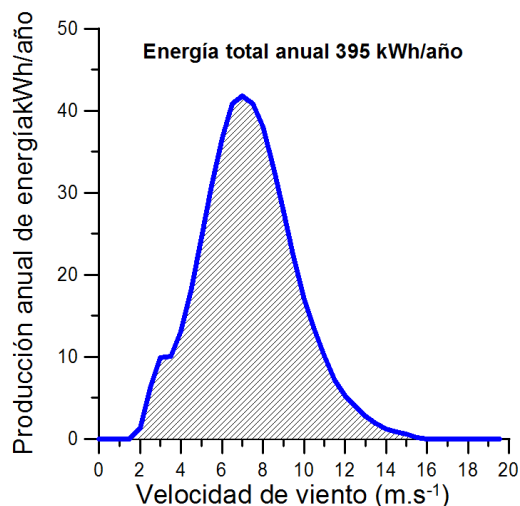
- AEP = Es la producción de energía anual.
- T = Periodo de tiempo considerado.
- N = El número de bin.
- V<sub>i</sub> = Es la velocidad de viento promedio en el bin i.
- P<sub>i</sub> = Es la potencia promedio de salida en el bin i.

Para el cálculo de la función de probabilidad de la distribución de velocidad de viento de Reyleigh.

$$F(V) = 1 - \exp \left( -\frac{\pi}{4} \left( \frac{V}{V_{pro}} \right)^2 \right) \quad (6)$$

Dónde:

- F(V) = Es la de función de probabilidad acumulativa de Rayleigh para la velocidad de vientos .
- V<sub>pro</sub> = Es la velocidad de viento promedio a la altura del rotor.
- V = Es la velocidad de viento.



**FIG. 46.** Cálculo de la producción anual de energía.

Aplicando el cálculo correspondiente a las ecuaciones (5) y (6) se obtiene para un periodo de tiempo de 720 horas, una producción bruta de energía de 33kWh/mes del generador, la cual equivale a una AEP de 395kWh/año. La energía que se almacena y se utiliza es 48,5 % (16,1kWh/mes), mientras que el 51,5 % (19.9kWh/mes) se disipa como energía térmica.

### VI.2.d.1. Cálculo de Energía: Método de la Curva de Potencia

Como alternativa para verificar el cálculo anterior se utiliza la ecuación teórica (González *et al.*, 2013).

$$E = T \cdot \int_0^{\infty} P_v \cdot f_v dv \quad (7)$$

Dónde:  $f(v)$  es la curva o función densidad de probabilidad de Weibull,  $P(v)$ , curva de potencia del aerogenerador, y  $T$ , el período de tiempo considerado.

Dado que no se cuentan con las funciones matemáticas de  $f(v)$  y  $P(v)$  el cálculo se realiza por métodos numéricos (Simpson), cuya precisión depende del intervalo de integración. Dado que el intervalo escogido para el cálculo según la norma es de  $1\text{m.s}^{-1}$  centrado en  $0,5\text{m.s}^{-1}$  la precisión, en este caso, es menor que el cálculo sugerido por la norma, sección VI.2.d. Sin embargo los valores obtenidos son del mismo orden de magnitud y muy cercanos entre sí.

En la gráfica siguiente se observa la superposición de las curvas consideradas, en línea continua,  $f(v)$ , la distribución de Weibull y en línea punteada,  $P(v)$ , la curva de potencia del aerogenerador de diseño Piggott.

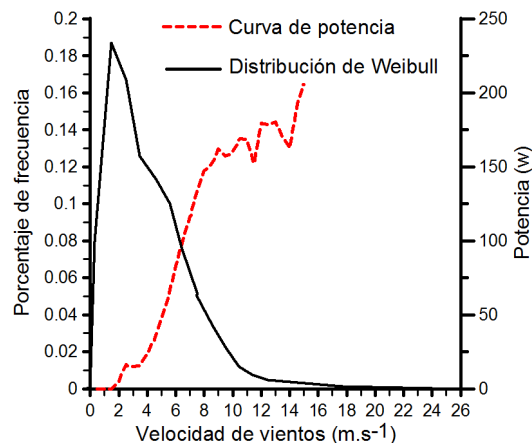


FIG. 47. Curva de potencia y de distribución de Weibull superpuestas.

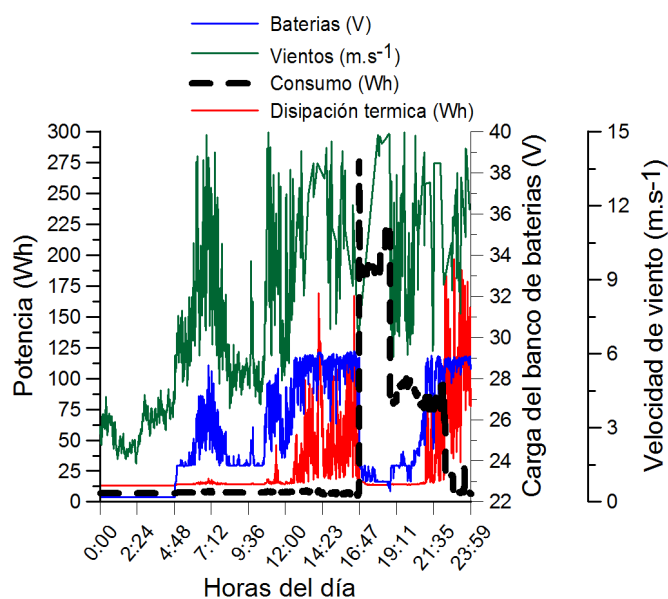
Aplicando el cálculo correspondiente a la ecuación (7) se obtiene para un periodo de tiempo de 720 horas, una producción bruta de energía de 32kWh/mes y una anual de 380kWh/año.

La diferencia con el cálculo anterior, sección VI.2.d, se explica por el intervalo de integración que se utilizó en este cálculo de  $1\text{m.s}^{-1}$ , dado que mientras que más chico es el intervalo mayor es el grado de precisión. Para este caso utilizaremos el resultado obtenido por el método sugerido por la norma, sección VI.2.d.

### VI.3. Datos de Consumo

A  $0,4\text{kWh/día}$ , (Fig. 48), la demanda eléctrica de la vivienda estudiada es relativamente baja comparada con los consumos medios de los hogares de la República Argentina,  $6,8\text{kWh/día}$  (PNUD, 2006), sin embargo la vivienda no está habitada durante los fin de semana y feriados largos. Desafortunadamente este patrón no es muy compatible con este tipo de sistemas de energía, ya que siguen generando energía sin importar si se usa o no, una vez que las baterías están completamente cargadas el excedente de energía es mandado a la resistencia de disipación térmica.

Se puede observar que el usuario generalmente utiliza gran cantidad de energía eléctrica durante los horarios vespertinos, unos 200 a 300Wh, se puede ver además un pico de consumo de aproximadamente 300Wh, aun cuando el voltaje del banco de baterías está cargado completamente sufre un caída considerable del mismo a 22V, esto se debe a que el usuario utiliza una bomba de agua de 0,5Hp durante una a dos



**FIG. 48.** Consumo de un día típico del establecimiento, se observa el pico por el encendido de la bomba de agua en los horarios vespertinos, superpuesto a la velocidad de los vientos, la disipación térmica (*dump load*) y la carga del banco de baterías.

horas aproximadamente, para el riego de la huerta y a menudo para cargar el tanque de agua. El banco de baterías (300Ah) nunca fue cambiado desde su instalación en el año 2011. Este problema de baterías agotadas conjuntamente con los picos de consumo de la bomba de agua causan que las baterías se descarguen más rápidamente y les demande más tiempo en recargarse para mantener su voltaje nominal (24V), que un banco de baterías en buen estado, (Fig. 48).

En dicha figura puede observarse el comportamiento del consumo eléctrico, de las fluctuaciones del voltaje del banco de baterías y la velocidad del viento en función del tiempo. Al principio del día (0:00 AM) no hay consumo, pero mientras los vientos se mantengan por debajo de los  $2\text{m.s}^{-1}$  (que es la velocidad de arranque del aerogenerador) la batería no se carga, a partir de las (4:48 AM) el viento supera los  $2\text{m.s}^{-1}$  de manera constante, allí las baterías comienzan a cargarse con un desfase temporal el cual dependerá de su estado de carga y de su deterioro. A las (7:12 AM) un fuerte pico en la velocidad de viento que va desde  $6\text{m.s}^{-1}$  a  $15\text{m.s}^{-1}$  se ve reflejado en el aumento de carga de las baterías a 28V mientras el sistema continúa con un consumo casi nulo.

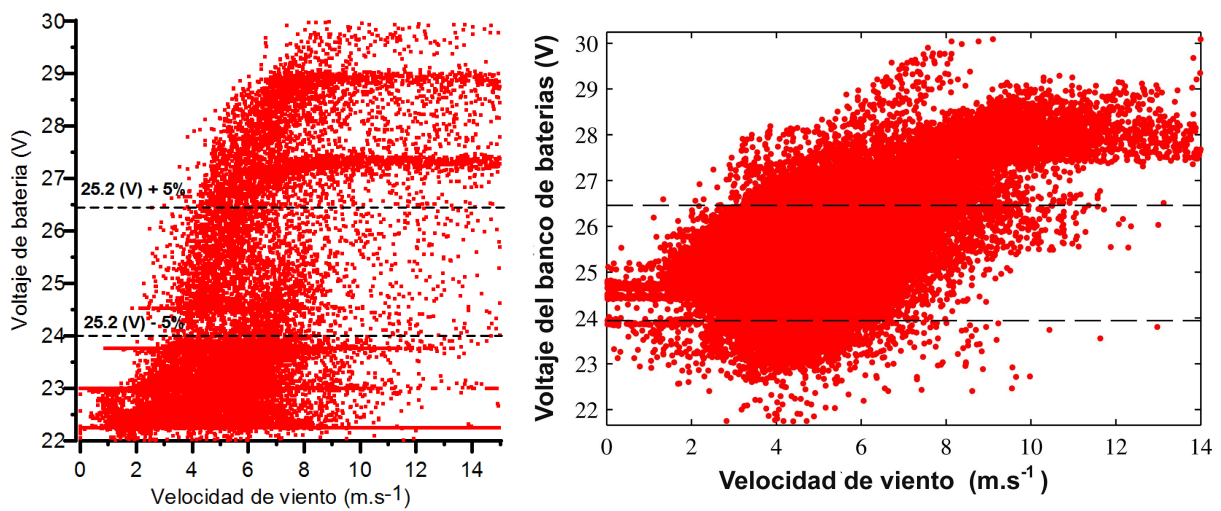
A partir de las (16:47 PM) el encendido de la bomba de agua produce un pico de consumo de arranque y luego se estabiliza por un período de una a dos horas con la consecuencia de que a pesar de que el viento sea considerablemente fuerte, el banco de baterías no puede mantener el voltaje del sistema (29V) y cae abruptamente a 23V, esto se debe que el banco de baterías se encuentra desgastado para soportar ese consumo. Una vez concluido el uso de la bomba de agua (19:11 PM), se mantiene un consumo de aproximadamente 90Wh hasta las 21:35 PM, mientras que los vientos entre  $6\text{m.s}^{-1}$  y  $15\text{m.s}^{-1}$  son capaces de cargar lentamente el banco de baterías (29V) hasta las (23:00 PM) en el cual el consumo vuelve a ser casi nulo.

Además el gráfico muestra como el regulador de carga desvía el exceso de energía que no puede ser enviado al banco de baterías a causa de fuertes vientos, se puede observar la disipación térmica (*dump load*) cuando hay vientos fuertes y el banco de baterías está cargado entre 28 o 29V.

### VI.3.a Regulador de Carga

Según los estándares del (IEC, 2005), los sistemas SWT poseen un regulador de carga y una resistencia de disipación. El regulador de carga está conectado en paralelo a la salida del generador. Esto hace que la energía se desvíe hacia la resistencia de disipación cuando el voltaje de la batería supere el nivel preestablecido por el sistema (26,4V). Esto ocurre cuando la batería está completamente cargada o durante fuertes ráfagas de viento. Se puede observar que el controlador no siempre es capaz de controlar el voltaje de la batería, especialmente durante fuerte vientos, (Fig. 49).

Como resultado, el número de datos en el rango de batería de  $25,2V \pm 5\%$  es menor para la velocidad de viento por arriba de  $8m.s^{-1}$  y esto dificulta obtener la curva de potencia en todos los rangos de viento. Además se suma la problemática que el banco de baterías estudiado está desgastado con más de 5 años de uso continuo sin ningún recambio ni mantenimiento del mismo, como se puede ver comparando el panel izquierdo con el derecho, (Fig 49). En la caso de estudio la mayor frecuencia de datos se encuentra entre 22 y 24 V, (Fig 45 panel izquierdo).



**FIG. 49. Panel izquierdo:** Conjuntos de datos medidos. El área entre líneas punteada representan el rango de voltaje de  $25.2 \pm 5\%$ . **Panel derecho:** El mismo gráfico del panel izquierdo, pero para un banco de baterías en buen estado, figura tomada de (Quéval *et al.*, 2014).

## VII. CONCLUSIONES

### VII.1. Fortalezas y Conclusiones del Caso de Estudio

Los vientos predominantes del sitio de estudio son del norte en cuanto a su frecuencia, sin embargo los más intensos aunque de menor frecuencia, provienen del oeste y sudoeste con velocidades comprendidas entre  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y  $15\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

La media de los vientos es de  $5,03 \pm 0,05\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y la frecuencia de vientos más probable (moda) es de  $1,75\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ . Con lo cual se concluye que el 26,7 % del tiempo el generador no arranca y por lo tanto no produce energía para alimentar las baterías.

El rendimiento del aerogenerador de 2,4m y de 700W localizado en la estancia El Carrizal en General Lavalle es menor que el de diseño, a causa de un problema eléctrico en una de las ramas del arreglo de las bobinas del alternador. Este problema se identificó analizando el rendimiento de la maquina eólica.

El aerogenerador fue estudiado durante tres meses, durante este período se concluyó que su curva de potencia a  $9\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  es su potencia nominal (170W), la velocidad a la que comienza producir energía es a  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  y su velocidad de corte está en  $11\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ , a la cual comienza a funcionar el sistema *furling* de frenado mecánico.

Además la curva de potencia permitió confirmar el problema eléctrico. Observando la potencia máxima generada por el aerogenerador y comparando su curva de potencia con la de un aerogenerador de las mismas características en la península de Scoraig en Escocia, se puede observar como en este último su potencia nominal medida es 600W a  $10\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

A causa de que el generador produce menos de la energía de diseño por una falla en las bobinas del alternador de la máquina eólica. Éste necesita ser cambiado para que la maquina funcione en condiciones normales de diseño, lo cual facilitara la carga de las baterías en un menor tiempo. Además se sugiere reemplazar las cuatro baterías de ciclo profundo.

Cuando las baterías sean reemplazadas, se sugiere realizar una nueva medición analizando el consumo para comprobar si el banco de cuatro baterías de 300Ah es suficiente para soportar los picos de arranque de la bomba de agua de 0.5Hp. En dicho caso evaluar la necesidad de expandir el banco de baterías.

Se sugiere si fuera posible, desplazar el molino unos 30m al norte de su ubicación actual dado que el aerogenerador se encuentra muy próximo a la vivienda y a los arboles ornamentales de la misma, los cuales están afectando la generación de energía, esta medida solo está recomendada si es que se necesitara en un futuro una mayor producción energética.

Se recomienda al usuario utilizar el manual de mantenimiento de Wind Empowerment (Cesa et al., 2016) y seguir sus directivas para el uso y mantenimiento del LMSWT de esta manera evitar futuros gastos e inconvenientes.

Debido a que durante cinco años nunca se realizó un mantenimiento al banco de baterías y tampoco se cambió ninguna de ellas, las baterías se encuentran desgastadas por el uso. Esto produce grandes fluctuaciones en el voltaje del banco de baterías cuando es utilizado, este se descargan muy abruptamente y cuando los vientos están comprendidos en un rango de  $2\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  a  $4\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$  se cargan lentamente dificultando el incremento del voltaje de las mismas. De lo anterior resulta que cuando se consume energía durante los períodos de vientos calmos, las baterías se descargan muy rápidamente y se dispone de menor energía almacenada durante estos intervalos.

Se concluye que el buen estado del banco de baterías es condición fundamental para el óptimo rendimiento del aerogenerador, el cual se pueden observar en los resultados de la curvas de potencias en los rangos de  $22,8\text{V} \pm 5\%$  a  $25,2\text{V} \pm 5\%$  y  $28,8\text{V} \pm 5\%$  y el rendimiento del aerogenerador.

51 % de la energía es desviada a la resistencia de disipación, la cual podría ser utilizada para otros usos,

por ejemplo calentamiento de agua. A pesar de ello la energía producida y utilizada satisface las necesidades del establecimiento.

Se demostró que el consumo de 234,9Wh/día que reportaba el propietario, ver tabla 1 sección V.1.a, mediante la encuesta realizada, apéndice II., es la mitad de lo registrado por el *Data-Duino* (405,6Wh/día). Esto demuestra lo importante que es la utilización de un registrador de datos económico, como el *Data-Duino*, para analizar y realizar el dimensionamiento de los sistemas de energía renovables ya que las estimaciones de las personas son muy subjetivas por no tener una conciencia clara del gasto energético que se realiza.

La fortaleza del sistema Piggott, como diseño de la LMSWT, quedó evidenciada en este estudio dado que aún con el alternador con una rama del arreglo de bobinas quemadas, siguió suministrando energía suficiente para abastecer las necesidades de establecimiento durante largo tiempo, hasta que debido a esta tesis, se pudo cambiar el alternador para que funcione en condiciones de diseño.

En base a lo dicho anteriormente se concluye que se ha cumplido el objetivo 1, sección II.

Los resultados obtenidos y la experiencia adquirida en el trabajo de campo, permitió confeccionar un manual de construcción, instalación y uso de del registrador de datos *Data-Duino*, el cual se detalla en los anexos I.3., con esto se logra el objetivo 3, sección II.

## **VII.2. Conclusiones Finales**

Se demuestra en esta tesis que la energía alternativa es una buena solución para la electrificación rural a nivel regional y mundial, siempre y cuando exista el recurso disponible.

El caso particular de este estudio, puede servir como ejemplo para otro tipo de establecimientos, escuelas o cualquier tipo de vivienda que esté aislada de la red eléctrica. También es posible encarar adecuadamente proyectos de viviendas que funcionen fuera de la red eléctrica, sin dañar el medio ambiente en amplias áreas como las rurales, elevando el índice de desarrollo humano de las mismas.

Esta tesis concluye que el *Data-Duino* aplicado a la energía eólica desarrollado con WE es una herramienta útil y económica para la prospección de este recurso. Demostrando su utilidad para los usuarios de SWT, los cuales pueden analizar el recurso local y lograr un correcto dimensionamiento de sus sistemas de energía.

Se puede decir que el *Data-Duino* de recolección de datos eólicos mas económico de los que existen en el mercado que satisfacen las necesidades técnicas de los usuarios de LMSWT.

Gracias a este monitoreo se identificaron fallas en el sistema logrando reparar las eventuales fallas como el alternador dañado o el desgaste de las baterías, las cuales necesitaban ser cambiadas como se pudo observar en los resultados del establecimiento en estudio.

Se demostró la utilidad y la economía del *Data-Duino* como una herramienta para instaladores que desean analizar sistemas en tiempo real y tener datos confiables para futuras ampliaciones y diseños de nuevos sistemas de energía.

Con los datos obtenidos se concluye que además que es una herramienta ideal para desarrolladores de energía eólica que quieran analizar diferentes maquinas en diferentes sitios, es factible que a partir de colocar varios dispositivos, se pueda lograr un mapa eólico detallado. Todo esto contribuye a verificar, ajustar y calibrar el funcionamiento y rendimiento de equipos, en pos de ampliar y mejorar el desarrollo de la energía eólica.

### **VII.2.a Recomendaciones**

Se sugiere a los fabricantes de aerogeneradores de baja potencia tener un *Data-Duino* a su disposición en su industria. Es un equipo sencillo y económico para hacer mediciones preliminares y realizar evaluacio-

nes sobre sus máquinas eólicas antes de realizar algún tipo de certificación en la cual se requiere transportar su equipo al ente regulador (INTI de Neuquén), lo cual implica un enorme gasto de transporte.

Es un equipo útil en el laboratorio para analizar el rendimiento eléctrico global y realizar curvas de potencia preliminares a los aerogeneradores, además es un equipo económico en comparación a otros equipos del mercado. Siendo además útil y flexible para el estudio de la energía eólica en la realización de mediciones del recurso eólico en el sitio a estudiar y analizar los hábitos de consumo, para planificar con mayor detalle el sistema energético y la turbina a instalar.

Además es una herramienta a utilizar para el análisis, de manera económica, de las máquinas instaladas o a instalar para lograr un diagnóstico en detalle de las mismas como el realizado en esta tesis.

Se propone a WE crear un diseño de *Data-Duino* de fácil instalación para gente sin conocimiento técnico. Subir a la página web de WE las librerías necesarias para utilizar en *Arduino* para la programación del *Data-Duino*. A pesar de ser *open source* los *software* que se encuentra en *Internet* están desactualizados. También la creación de un *software* para procesar los datos que entrega *Data-Duino* ya que la forma que los entrega requiere cierto conocimiento técnico para entender y procesar los datos en formato Excel (.xlsx) y/o (.scv).

Mejorar el *hardware* del *Data-Duino*, su método de conexión de los sensores de velocidad y dirección de viento con conexión directa a través de fichas telefónicas Rj11 sin la utilización de borneras que producen que los cables telefónicos se desconecten y se quiebren fácilmente al conectarse a las borneras. Incluir un sistema que se conecte mediante WiFi y logre almacenar datos en la nube.

Además una guía de instalación de los sensores de corriente y la calibración de los mismos, para interpretar de manera sencilla como registrar los datos *Data-Duino*, una guía de como instalar todas las librerías necesarias para utilizar el IDE del *Arduino*, para ver los datos y cargar el *software* en el *Data-Duino* mediante un CPU.

En la siguiente expansión del *Data-Duino* incluir parámetros de medición de rpm, con las cuales se obtiene la velocidad en la punta del aspa a los efectos de calcular las fuerzas electromotrices y tener un análisis más preciso del funcionamiento del aerogenerador, parámetros que son necesarios para los diseñadores y fabricantes de aerogeneradores.

Con estas recomendaciones se cumplen el objetivo 2 sección II., el cual propone modificaciones en el *software* y *hardware* del *Data-Duino*.

## BIBLIOGRAFÍA

- 3TIER (2011). “*Global Wind, Solar and Hydro Resource Maps*”.  
URL [http://www.maproomblog.com/2010/07/renewable\\_resource\\_maps.php](http://www.maproomblog.com/2010/07/renewable_resource_maps.php)
- AGECC (2010). “*Energy for a Sustainable Future*”. , Advisory Group on Energy and Climate Change.
- Batchelor, S., Scott, N., Daoqi, L., y Bagen (1999). “*Evaluating the Impact of Wind Generators in Inner Mongolia - Project Technical Report. Reading, UK, DfID,*”. INF. TEC. R7106, Gamos Ltd.
- Campbell, C. J., Staball, H., Ballydehob, y Cork, C. (2008). “*Asociación para el Estudio del Cenit del Petróleo y el Gas.*”. *BOLETÍN ASPO*, (92).
- Casillas, C. E. (2012). “*Rural electrification, climate change, and local economies: Facilitating communication in development policy and practice on Nicaragua’s Atlantic Coast.*”. *University of California, Berkeley Electronic Theses and Dissertations*.
- De Broe, A., Drouilhet, S., y Gevorgian, V. (1999). “*A peak power tracker for small wind turbines in battery charging applications*”. *IEEE Xplore*, 14(4), 1630–1635.
- ESMAP (2007). “*Technical and Economic Assessment of Off-grid, Mini-grid and Grid Electrification Technologies*”. INF. TEC. 121/07, ESMAP.
- Foster, V., Tre, J. P., y Wodon, Q. (2000). “*Energy prices, energy efficiency and fuel poverty.*”. *Word Bank*.
- Gipe, P. (2009). “*Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business 2nd Edition.*”. Chelsea Green Publishing.
- GNESD (2006). “*Can Renewable Energy Make a Real Contribution?* ”. Tech. rep., Global Network On Energy for Sustainable Development.
- González, J. A. C., Pérez, R. C., Santos, A. C., Gil, M.-A. C., y Fernández, E. C. (2013). “*Centrales de energías renovables*”. PERSON EDUCACIÓN S.A, Madrid.
- Hiester, T. R., y Pennell, W. T. (1981). “*The Meteorological Aspects of Siting Large Wind Turbines*”. *Prepared for the U.S. Department of Energy*, (pp. 1–517).
- Hubbert, M. K. (1956). “*Nuclear Energy and the Fossil Fuels Drilling and Production Practice*”. Shell Development Company, Publication No, 95.
- IEA (2010). “*World Energy Outlook*”. ISBN: 978 92 64 08624 1, International Energy Agency.
- IEC (2005). “*International Standard IEC 61400-12-1 first edition - Wind turbines Power performance measurements of electricity producing wind turbines*”. Commission Electrotechnique Internationale.
- Khennas, S., Dunnett, S., y Piggott., H. (2008). “*Small Wind Systems for Rural Energy Services*”. Rugby, UK, Practical Action Publishing.
- Léna, G. (2013). “*Rural Electrification with PV Hybrid Systems: Overview and Recommendations for Further Deployment*”. REPORT IEA-PVPS T9-13:2013, IEA.
- Mattio, H. F. (2013). “*Programa de electrificación para la población rural dispersa de la provincia del Chubut, por medio de sistemas eólicas domiciliarios.*”. CREE.
- Mattio, H. F., y Tilca, F. (2009). “*Recomendaciones para mediciones de velocidad y dirección de viento con fines de generación eléctrica, y medición de potencia eléctrica generada por aerogeneradores.*”. CREE, INENCO.

- MinEM (2008). “Energía Eólica: Energías Renovables”. Ministerio de Energía y Minería.
- MinEM (2017). “Ministerio de Energía y Minería, Presidencia de la Nación”.  
URL <https://www.minem.gob.ar/www/833/25417/centrales-y-plantas.html>
- NASA (2016). “Surface meteorology and Solar Energy”.  
URL <https://eosweb.larc.nasa.gov/sse/>
- Ángel Casabona, ., Coppis, L., Duzdevich, J. P., y Martín, G. (2010). “Estudio metódico del grupo de proveedores de aerogeneradores de fabricación nacional: 1er Informe de Avance”. Instituto Nacional de Tecnología Industrial, INTI.
- Peck, M. D., Kruger, G. E., van der Merwe, A. E., Godakumbura, W., y Ahuja, R. B. (2008). “Burns and fires from non-electric domestic appliances in low and middle income countries”. *Elsevier*, 03(34), 303–311.
- Piggott, H. (2013). “A Wind Turbine Recipe Book. Scoraig, Scotland, Scoraig Wind Electric.”.
- PNUD (2006). “Informe Sobre el Desarrollo Humano: Más allá de la escasez: Poder, pobreza y la crisis mundial del agua”. , Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo.
- Practical-Action (2010). “Poor People’s Energy Outlook. Rugby, UK.”.
- Quéval, L., Joulain, C., y Casillas, C. E. (2014). “Measuring the Power Curve of a Small-scale Wind Turbine: A Practical Example”. *1st International e-Conference on Energies*.
- Ray, M. L., L., R. A., y G., M. J. (2006). “Analysis of wind shear models and trends in different terrains”. Department of mechanical and industrial engineering renewable energy research laboratory, University of Massachusetts.
- Robertson, A. (1987). “The use of trees to study wind”. *Arboricultural Journal*, 11(2), 127–143.
- Russo., V. S. (2009). “El Proyecto de Energías Renovables en Mercados Rurales”. *Petrotecnica*, (pp. 1–49).
- Spinadel, E. (2015). “Energía Eólica: Un enfoque sistemático multidisciplinario destinado a países en vía de desarrollo 2da Edición”. Nueva Librería, Buenos Aires, Argentina.
- Sumanik-Leary, J., Piggott, H., Howell, R., y While, A. (2013). “Locally Manufactured Small Wind Turbines.”. *Proceedings of 9th PhD Seminar on Wind Energy in Europe, Uppsala University Campus Gotland, Sweden*, (pp. 1–5).
- Villalonga, J. C. (2013). “Energías Renovables: Por que debería ser prioritario cumplir el objetivo del 8 % al 2016,”. ISBN 978-987-25230-3-9, AVINA.
- Wilkins, G. (2002). “Technology Transfer for Renewable Energy, Overcoming Barriers in Developing Countries”. London, UK, The Royal Institute of International Affairs.
- World-Bank (2008). “REToolkit: A Resource for Renewable Energy Development.”.  
URL <http://www.olade.org/realc/documento.php?doc=46331>

# APÉNDICES

## I. MANUAL DEL DATA-DUINO

### I.1. MANUAL DE MONTAJE Y INSTALACIÓN

Los materiales necesarios para el montaje del *DataDuino* son los que se muestran en la figura 50

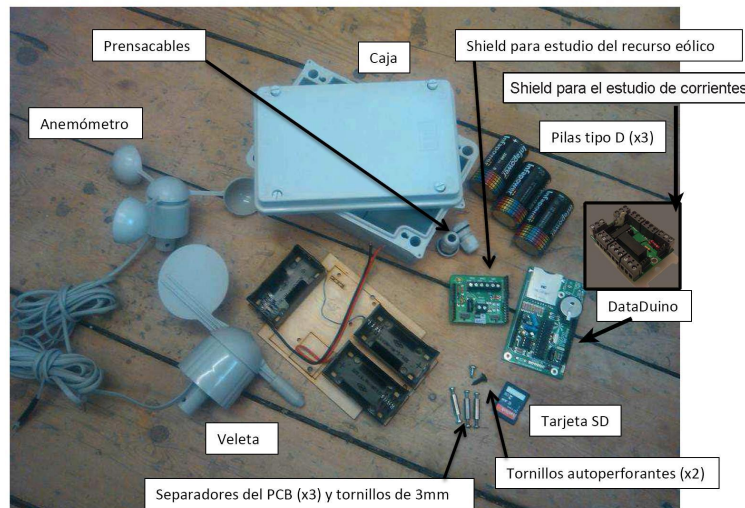


FIG. 50. Materiales necesarios para el montaje del *DataDuino*

#### I.1.a Montaje del PCB

**Paso: 1:** Montar los separadores de la Placa del Circuito Impreso (PCB)

Los tres porta pila (los porta pilas son opcionales porque si se utiliza el *shield* de corrientes no necesario utilizar el porta pila, ya que el mismo va conectado al banco de baterías) para las pilas tipo D van montados en una placa base de madera. Montar los tres separadores en la placa base con los tornillos de 3mm.

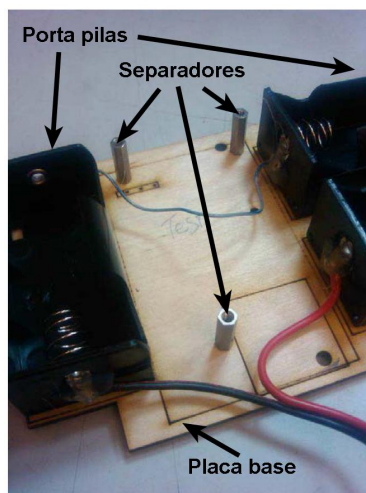
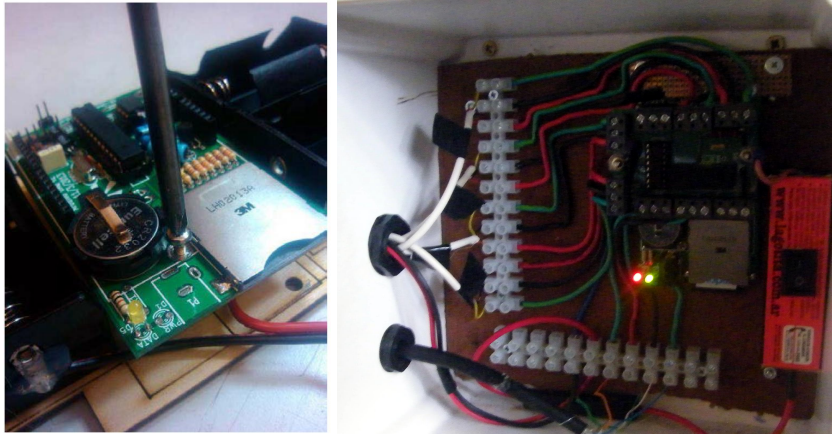


FIG. 51. Placa base de madera donde se fija el *Data-Duino*

**Paso: 2:** Montar la PCB del *Data-duino* a los separadores

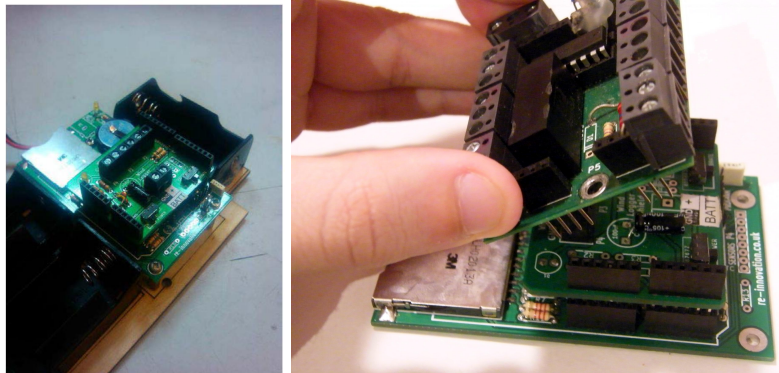
Montar la PCB del *Data-Duino* a la placa base por los separadores con los tornillos de 3mm. No es necesaria la utilización de la madera, (Fig. 52 panel izquierdo). La misma puede realizarse con otro material dieléctrico, (Fig. 52 panel derecho).



**FIG. 52. Panel izquierdo:** Placa base de madera con los separadores con los tornillos de 3mm. **Panel derecho:** Montaje utilizado en esta tesis.

**Paso: 3:** Montar el PCB del *shield* para estudio del recurso eólico.

El *shield* para estudio del recurso eólico se debe montar encima del *Data-Duino* dentro de los los conectores hembra del mismo, asegurando que están bien alineados todos los conectados. Si se desea utilizar el *shield* de corrientes este debe montarse por encima del *shields* eólico, también asegurándose que este bien alineado con todos los conectores.

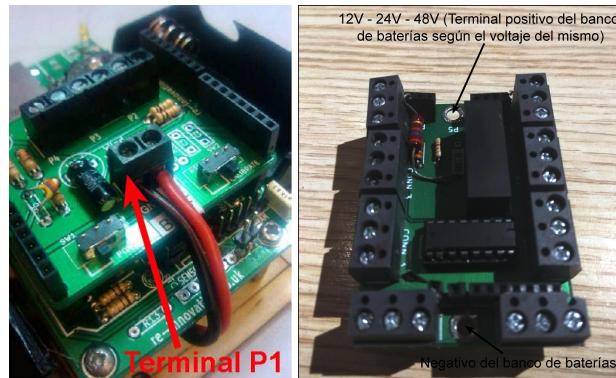


**FIG. 53. Panel izquierdo:** *Shield* eólico montado sobre la placa base *Data-Duino*. **Panel derecho:** *Shield* de corrientes montado sobre la *shield* eólica.

### I.1.b Pilas externas o Banco de Baterías

**Paso: 1:** Conectar el cable *power*

Los cables de alimentación rojo y negro conectan los tres porta pilas tipo D, (Fig. 51, con la terminal de potencia (P1), (Fig. 54 panel izquierdo). Si se utiliza el *shield* de corrientes del *Data-Duino*, la alimentación se realiza conectando el positivo del banco de batería al terminal (P5) y el terminal negativo del banco de baterías en el terminal apuesto, (Fig. 54 panel derecho).

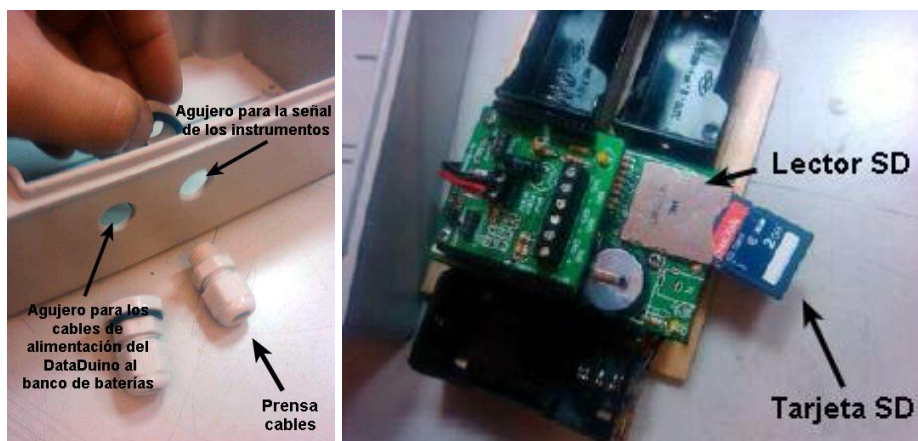


**FIG. 54. Panel izquierdo:** *Data-Duino* alimentado con baterías externas tipo D. **Panel derecho:** Alimentación utilizada en esta tesis.

### I.1.c Mecanizado de la Caja Eléctrica

**Paso: 1:** Montar los prensacables

Montar los prensa cables en los agujeros en la caja. Por los mismos pasan los cables cat5-e del anemómetro y la veleta, los cables de alimentación del *Data-Duino*. Los cables de los sensores de corriente pasan por el otro agujero, (Fig. 55 panel izquierdo). Asegurar que están bien apretados y luego introducir la tarjeta SD, (Fig. 55 panel derecho).



**FIG. 55. Panel izquierdo:** Caja eléctrica donde se monta el *Data-Duino* con las perforaciones para pasar el cableado. **Panel derecho:** Introduciendo tarjeta SD en el *Data-Duino*

**Paso: 2:** Montar la placa base en la caja eléctrica.

Montar la placa base de madera en la caja, (Fig. 52), con dos tornillos auto perforantes, (Fig. 56 panel izquierdo). Uno que tiene cabeza ancha entra por uno de los porta pilas tipo D, (Fig. 56 panel central). El otro que tiene cabeza más delgada y va entre los dos otros porta pilas, (Fig. 56 panel derecho). En caso de no usar los porta pilas por que se utiliza el *shield* de corrientes perforar la placa de madera base a la caja eléctrica.

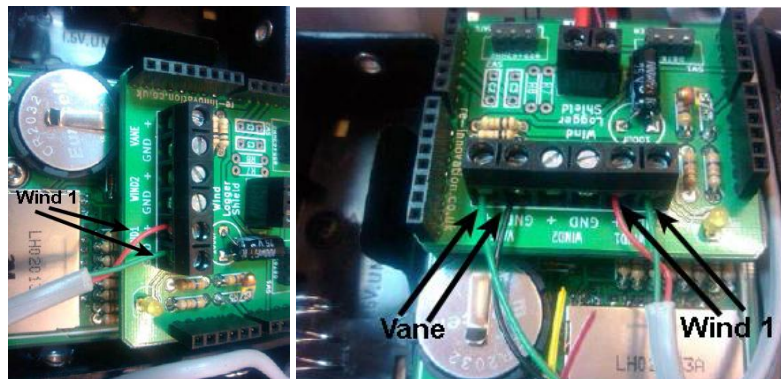


**FIG. 56. Panel izquierdo:** Caja eléctrica donde se monta el *Data-Duino*. **Panel central:** Ajustando el *Data-Duino* a la caja eléctrica con el tornillo de cabeza gruesa. **Panel derecho:** Ajustando el tornillo de cabeza delgada entre los dos porta pila

#### I.1.d Cableado del Anemómetro y la Veleta

**Paso: 1:** Conectar el anemómetro y veleta.

Cortar los enchufes del anemómetro y la veleta, ver sección VII.2.a. Asegurarse que los cables entren por los prensacables. El anemómetro tiene cables rojo y negro, conectarlos al terminal *Wind 1*. La polaridad no importa. La veleta tiene cuatro cables, pero solo el negro y el verde son necesarios, conectarlos a la terminal *Vane*. La polaridad no importa.



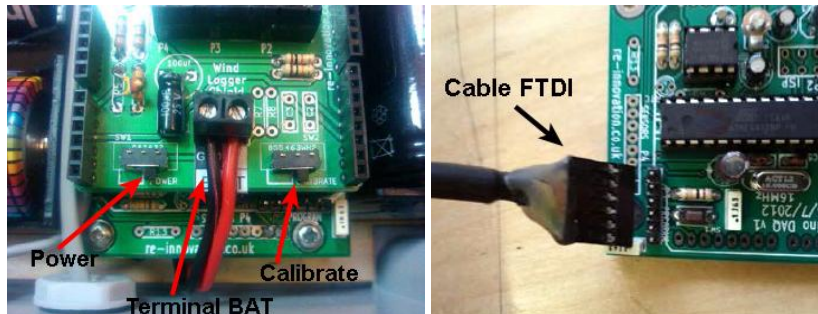
**FIG. 57. Panel izquierdo:** Conectando el anemómetro en el *shield* eólico. **Panel derecho:** Conectando la veleta *shield* eólico.

**Paso: 2:** Configuración con el cable FTDI.

A los efectos de la configuración del *Data-duino*, antes de conectar el cable FTDI, retirar las pilas del *Dataduino* o desconectarlo del banco de baterías.

Encender el modo *Calibrate* (empujar el *switch calibrate* hacia el terminal BATT) y enchufar el cable FTDI. Con una velocidad de transmisión de 115200 desde el IDE de Arduino, se debería ver la palabra *calibrate* en el terminal serial del IDE Arduino. Para más detalle. Ver sección I.2., Corregir la fecha, hora, numero de referencia y tiempo de medición. Apagar modo *Calibrate* con el mismo cambio (empujar el *switch* hacia los conectores rectos hembra), el LED debería luminar una vez cada medición.

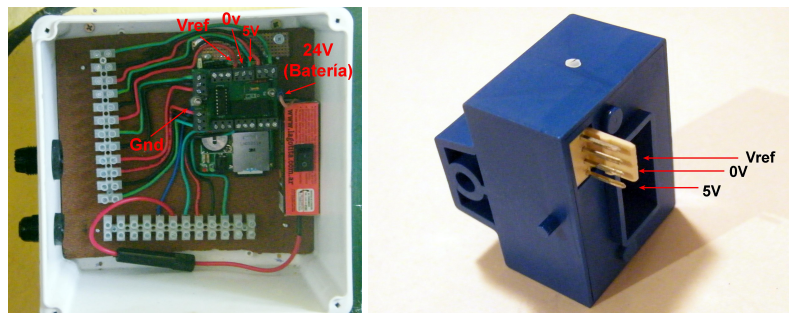
Instalar el anemómetro y la veleta asegurarse que la veleta y anemómetro están instalados en a la altura deseada o según la norma utilizada. En esta tesis se utilizó(IEC, 2005) anexo h. Nivelar el anemómetro y la veleta con un nivel, orientar la veleta hacia el norte geográfico, para más detalles ver sección V.4.b. Los anemómetros tienen factores de conversión de velocidad del viento a pulsos por segundo, verificar los manuales de los anemómetros o calibrarlo con un túnel de viento, si no se dispone de un túnel de viento, calibrarlo con un anemómetro digital y realizar un curva de calibración.



**FIG. 58. Panel izquierdo:** *Switch* modo calibración y el *switch power Data-Duino*. **Panel derecho:** Cable FTDI conectado desde el CPU al *Data-Duino*.

**I.1.e Cableado de los Sensores de Corriente**

**Paso: 1:** Conectar los cables de los sensores de Corriente Conectar los sensores de corrientes a la *shield* de corrientes, (Fig. 59 panel izquierdo). En la misma se observa cuatro sensores de corriente conectados, pudiéndose conectar cuatro sensores de corriente adicionales, si fuese necesario. Las referencias de los sensores, (Fig. 59 panel derecho). Si se utiliza otro sensor de corriente verificar las hojas de datos (*data sheets*) de dicho sensor que se encuentran en *Web* del fabricante.

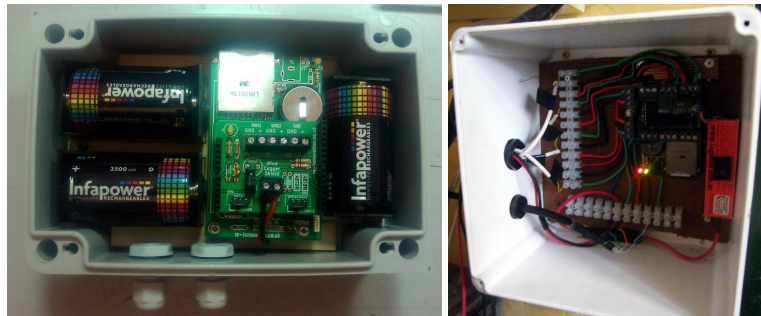


**FIG. 59. Panel izquierdo:** Los cuatro sensores de corrientes conectados a la *shield* de corrientes. **Panel derecho:** Referencias de los pines del sensor de corriente Hass.

**Paso: 2:** Introducir las pilas o conectarlo al banco de baterías

Introducir las pilas tipo D, retirar el cable FDTI y encender el *Data-Duino* con la tecla *Power* (empu-

jarlo hacía los terminales BATT). Asegurarse que las pilas tienen las polaridades correctas. Si no se utiliza las pilas tipo D, conectarlo directamente a al banco de baterías (12V, 24V, 48V). Una vez concluido estos pasos, el Data-Duino comienza a recolectar y almacenar las variables programadas.



**FIG. 60. Panel izquierdo:** Montaje del *Data-Duino* con baterías sin la *shield* de corrientes. **Panel derecho:** Montaje del *Data-Duino* con la *shield* de corrientes directamente conectado al banco de baterías.

## I.2. MANUAL DE CONFIGURACIÓN *DATA-DUINO*

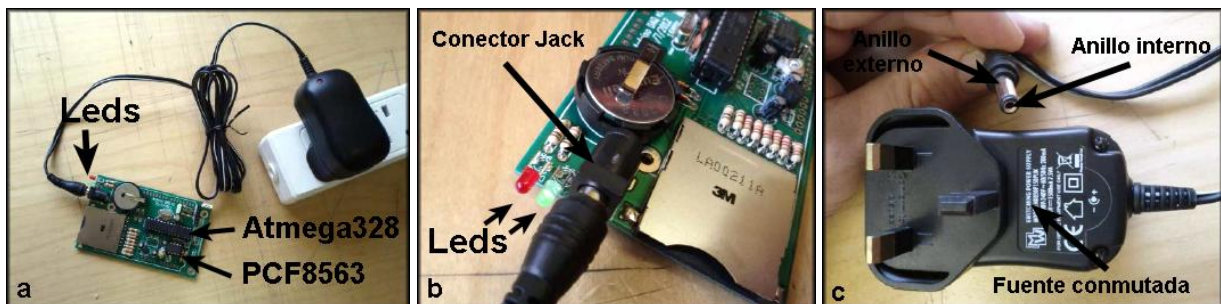
Un vez que el dispositivo está construido, el siguiente paso es comprobar que la placa encienda correctamente y luego programarlo con el código de *Data-Duino*.

Utilizar una fuente de alimentación de 5 V DC (ya sea una fuente de alimentación de trabajo o una fuente de modo conmutado, (Fig. 61 **panel c**), y aplicarla al conector *Jack* de 2.1mm, (Fig. 61 **panel b**).

El anillo interior del la ficha *jack* (pin interior) es positivo y el anillo exterior es negativo. Debe verse el *led* verde de alimentación prendido. El *led* rojo (de datos) también puede parpadear brevemente cuando el dispositivo está encendido, (Fig. 61 **panel a**).

Caso contrario:

- Probar con un multímetro (*tester*) en la función para medir voltaje de la corriente continua (CC).
- ¿Tiene 5V entre los pines 7 y 8 del integrado ATMEGA328?
- ¿Tiene 5V entre los pines 4 y 8 del integrado PCF8563?
- Si no es así, a continuación, vuelva a comprobar las soldaduras en los circuitos.
- Comprobar también que los circuitos integrados se hayan insertado con la orientación correcta.



**FIG. 61. Panel a:** Led rojo (datos) parpadeando. **Panel b:** Conector jack de 2.1mm. **Panel c:** Detalle de la fuente conmutada.

### I.2.a Compilación del Código Arduino al *Data-Duino*

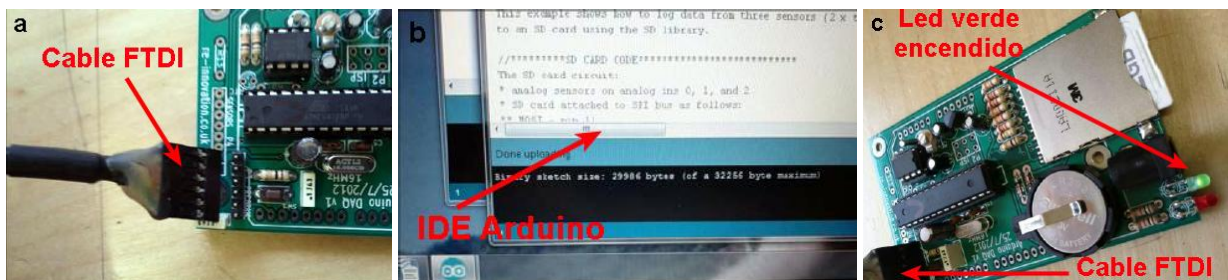
**Paso: 1:** Compilar y cargar el código para adquisición de datos desde la PC.

Si la unidad se ha encendido correctamente, a continuación, cargar el código para empezar el registro de datos. Para ello es necesario:

- Una computadora que ejecuta el IDE de Arduino.
- Un cable FTDI USB a serial.
- El archivo DallasTemperature.h
- El archivo Rtc\_Pcf8563.h

## Paso: 2:

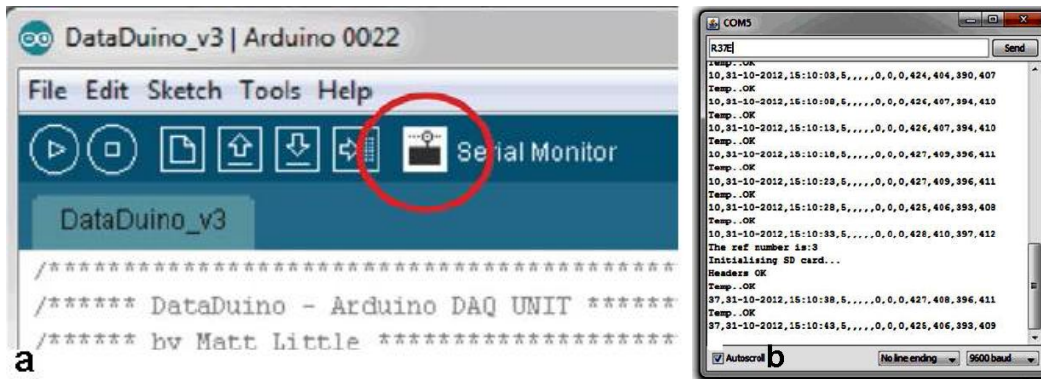
1. Comprobar que el cable FTDI funciona, (Fig. 62 **panel c**)
2. Descargar el código *Data-Duino* y guardar el código en una carpeta dentro de la carpeta de Arduino (Todos los archivos descargables están adjuntos al un CD en este trabajo)
3. Descargar los archivos *DallasTemperature.h*
4. Descargar los archivos *Rtc\_Pcf8563.h* y Guardar este archivo en el sector de librerías dentro de la carpeta de Arduino.
5. Abrir el Arduino IDE, (Fig. 62 **panel b**)
6. Abrir el programa *Data-Duino*.
7. Asegurarse de que el programa compile sin errores, (Fig. 62 **panel b**).
8. No utilizar ninguna fuente externa, la alimentación se suministra a través del cable FTDI.
9. Conectar el cable FTDI a la placa, (Fig. 62 **panel a**)
10. Cargar el código al *DataDuino*, este utiliza el *boot-loader* del UNO, (Fig. 62 **panel b**)
11. Una vez instalado, abrir el monitor serie y comprobar la información que está llegando a través de la comunicación serial, (Fig. 62 **panel b**)



**FIG. 62. Panel a:** Cable FTDI. **Panel b:** IDE del Arduino. **Panel c:** Led verde encendido cuando se conecta el cable FTDI.

### I.2.b Configuración de la Referencia

Dentro del IDE Arduino, se abre el serial monitor (hacer clic en el icono marcado). Se observa que los datos llegan a la frecuencia de medición, (Fig. 63 **Panel b**). Primero, se configura la referencia, escribiendo "RXXE" en la primera línea del terminal, donde XX significa el número de referencia (de 0 a 99) Seguidamente clicar en *Send* y el equipo reiniciará la tarjeta SD. En este ejemplo, se muestra el cambio de la referencia de 10 a 37. (Fig. 63 **Panel b**).

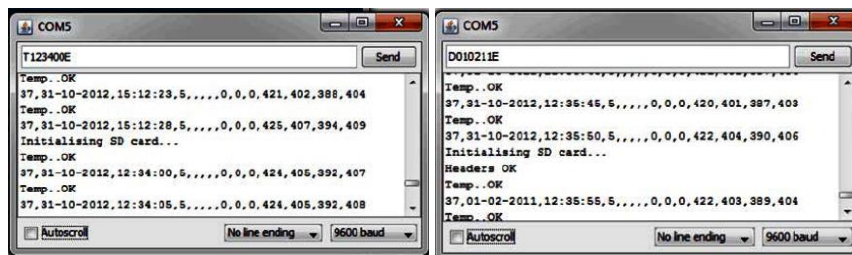


**FIG. 63. Panel a:** Lugar donde se encuentra el serial monitor en el IDE de arduino. **Panel b:** En el serial monitor se ven los datos en tiempo real y el cambio de referencia

### I.2.c Configuración del Tiempo y la Fecha

En la terminal serial monitor se configura la hora, marcando la hora en el formato: "TXXXXXXE", donde XXXXXX significa la hora en el formato HHMMSS. En este ejemplo, se ha cambiado la hora de 15:12:28 a 12:34:00, (Fig. 64 panel izquierdo).

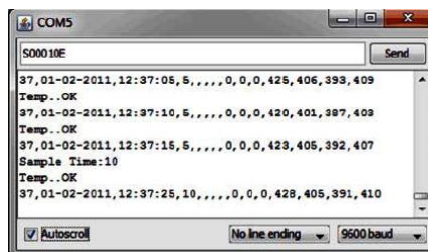
En el terminal serial, se configura la fecha, marcando la en el formato: "DXXXXXXE", donde XXXXXX significa la hora en el formato DDDMMAA. En este ejemplo, se ha cambiado la fecha del 31 del 10 al 12 al 01 del 02 al 11, (Fig. 64 panel derecho).



**FIG. 64. Panel izquierdo:** Configuración del tiempo. **Panel derecho:** Configuración de la fecha.

### I.2.d Configuración de la Frecuencia de Muestreo

La configuración del tiempo de muestro se puede cambiar desde la terminal monitor serial, la cual es la frecuencia de medición, que puede variar entre 1 a 99999 segundos la misma puede ser ajustada con el comando "SXXXXXE", donde XXXXX es la frecuencia de mediciones en segundos. Los datos se guardaran con la frecuencia de medición que establecida. En este ejemplo, utilizamos el comando S00010E para cambiar la frecuencia de mediciones de 5 a 10 segundos, (Fig. 65).



**FIG. 65. Paso 6**

### I.3. MANUAL DE CONSTRUCCIÓN DEL *DATA-DUINO* EÓLICO

#### I.3.a Lista de Componentes Placa *Data-Duino*

Los componentes de la placa *Data-Duino* diseñada a los efectos de esta tesis,(Fig. 66), lo cuales estan listados en la tabla 5

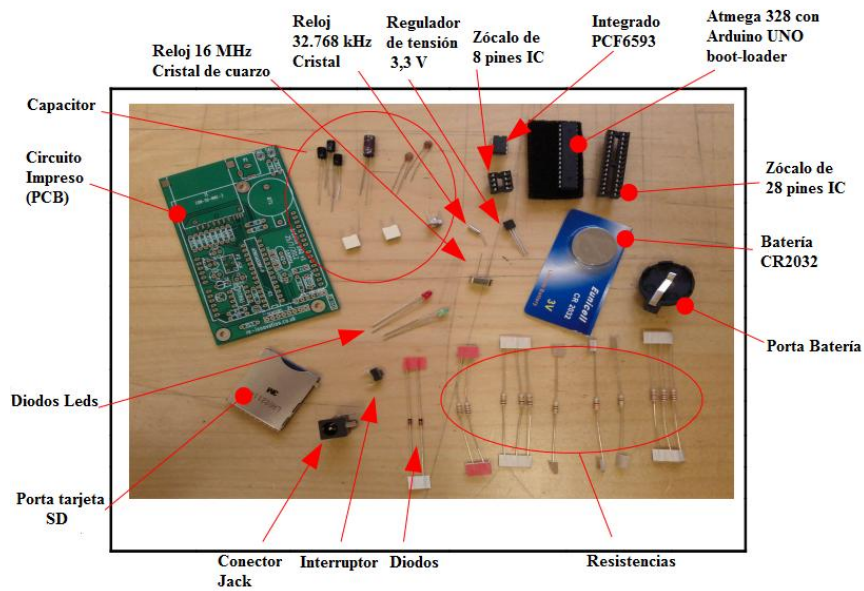


FIG. 66. Componentes para el ensamble de la placa *Data-Duino*

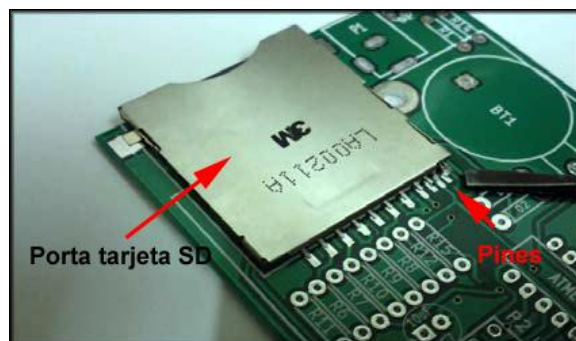
**TABLA 5.** Listado de componentes

REF	DESCRIPCIÓN	REF	DESCRIPCIÓN
BT1	Porta baterías	R1	Resistencias de 1k
	CR2032 3V Batería	R2	10k
C1	Capacitores de 100 $\mu$ F	R3	10k
C2	100 $\mu$ F	R4	10k
C3	10 $\mu$ F	R5	1k (no se usa/incluye)
C4	22 $\mu$ F	R6	2k2
C5	22 $\mu$ F	R7	2k2
C6	10 $\mu$ F	R8	2k2
C7	10 $\mu$ F	R9	3k3
C8	Capacitor Variable 8-30 pF	R10	3k3
C9	100 nF	R11	3k3
D1	LED de Encendido (3mm verde)	R12	100k
D2	Diodos 1N4148	R13	4k7 (no se usa/incluye)
D3	1N4148	R14	1k
D4	LED RTC (no se usa/incluye)	R15	10k
D5	LED datos (3mm rojo)	SW1	Interruptor
IC1	ATMEGA 328P - UNO Boat-loader	U1	PCF8563
	Zócalo DIL de 28 pines		Zócalo DIL de 8 pines
J1	Conector Jack	U2	MC1703 (Regulador 3.3 V)
P1	2.1mm Zócalo CC <i>power</i>	X1	Reloj de cuarzo 32.27 kHz
P2	Conector 3x2 ISP (no incluido)	X2	Reloj de cuarzo 16 MHz
P3	Conector 6 pines-programación		PCB
P4	no se usa/incluye		Porta tarjeta SD

### I.3.a.1. Secuencia de Armado *Data-Duino*

#### **Paso 1:** Ubicar el porta tarjeta SD

Para ubicar el porta tarjeta SD en el PCB colocar los pines de la tarjeta alineados con las marcas en el PCB. Las soldaduras en el PCB para las dos ultimos pines están alejadas del resto, como se muestran cerca del destornillador. Debe doblarse ligeramente el soporte de la tarjeta SD para que los pines se puedan soldar en las marcas del PCB, (Fig. 67).



**FIG. 67.** Porta tarjeta SD, ubicación de la tarjeta SD en el PCB

**Paso: 2:** Soldar la porta Tarjeta

El porta tarjeta SD es el único componente de montaje superficial, por lo que requiere cuidado al momento de soldarlo al PCB.

En primer lugar soldar las marcas de puesta a tierra grandes situadas a cada lado del componente. Es preciso asegurarse que la soldadura no corte ninguna de las marcas, (Fig. 68).



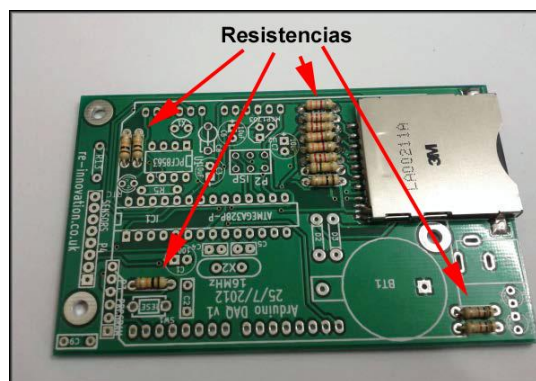
**FIG. 68.** Soldadura de la puesta tierra del porta tarjeta

**Paso: 3:** Soldar las Resistencias

Usar la identificación gráfica del código de colores o un multímetro para encontrar los valores de las resistencias. Soldarlas en los lugares indicados y su orientación no es importante, (Tabla 6) y (Fig. 69).

**TABLA 6.** Identificación de las resistencias

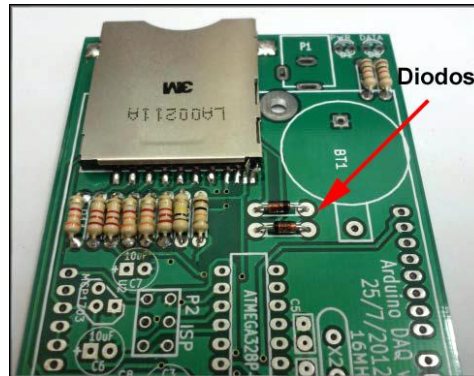
CANTIDAD	VALOR	REFERENCIAS
1	100	R12
2	1	R1, R14
3	3k3	R9, R10, R11
4	2k2	R6, R7, R8
4	10k	R2, R3, R4, R15



**FIG. 69.** Colocación de las resistencias.

**Paso: 4:** Soldar los diodos

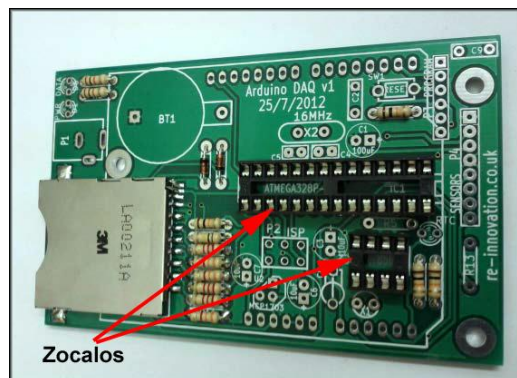
Los dos diodos 1N4148 se deben colocar en la dirección correcta, (Fig. 70).



**FIG. 70.** Colocación correcta de la dirección de los diodos.

**Paso: 5:** Soldar los zócalos de los integrados (IC)

Primero se comprueba la orientación de los zócalos, los mismos debe alinearse con la muesca blanca respectiva, dibujada en el PCB, (Fig. 71).



**FIG. 71.** Orientación correcta de los zócalos.

**Paso: 6:** Soldar los Capacitores

Los capacitores C2, C4, C5 y C9, previamente identificados (Tabla 5), pueden ser orientados en cualquier dirección. Sin embargo la orientación de los capacitores C1, C3, C6 y C7 debe ser comprobada de la siguiente manera: la línea blanca en un costado del capacitor marca el lado del negativo; hay dos puntos de soldadura para C1 en el PCB, uno es un terminal redondo y se debe soldar allí el negativo y en el terminal cuadrado el positivo,(Fig. 73). Otra forma de conocer el positivo de C1 es reconocer la pata más larga, (Fig. 72).

**TABLA 7.** Identificación de los capacitores.

CANTIDAD	VALOR	REFERENCIAS	IMAGEN
1	100 $\mu$ F	C1	FIG. 72a
2	100nF	C2, C9	FIG. 72b
2	22pF	C4, C5	FIG. 72c
3	10 $\mu$ F	C3, C6, C7	FIG. 72d

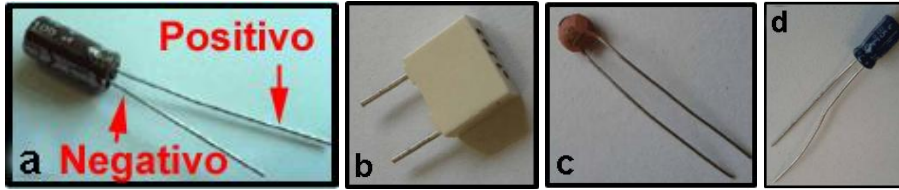


FIG. 72. a: C1 - 100 $\mu$ f. b: C2, C9 - 100nf. c: C4, C5 - 22pf. d: C3, C6, C7 - 10 $\mu$ f.

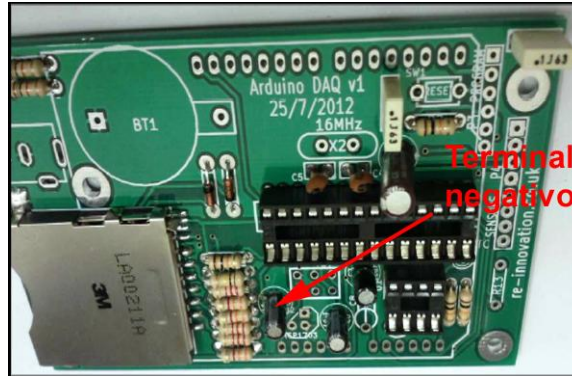


FIG. 73. Polaridad de los capacitores.

**Paso: 7:** Soldar el porta batería, el conector *Jack* y el interruptor de *reset*

Soldar estos componentes, (Fig. 74 panel izquierdo.) y (Fig. 74 panel derecho).

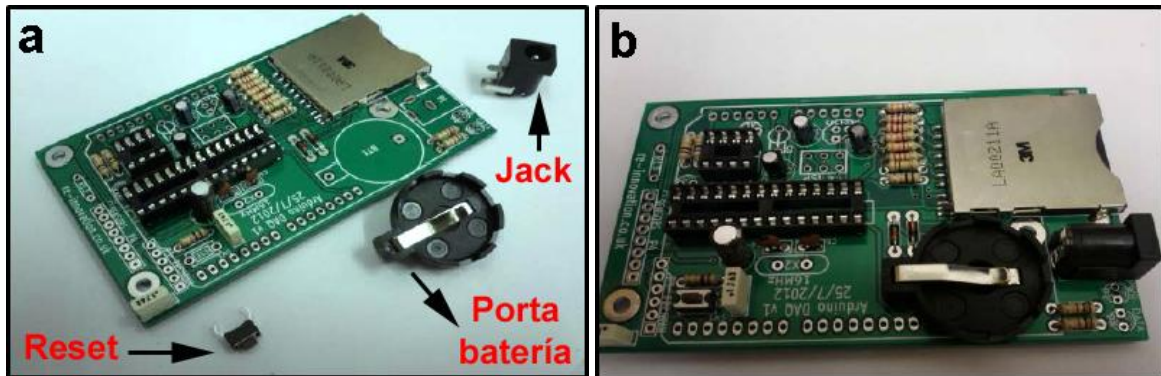
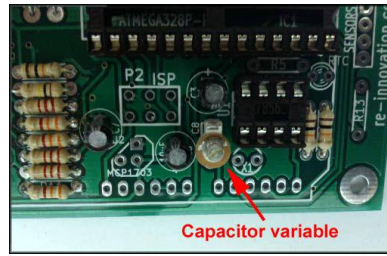


FIG. 74. Panel izquierdo: Porta batería, conector *jack* y *reset*. Panel derecho: Componentes soldados

**Paso: 8:** Soldar el capacitor variable.

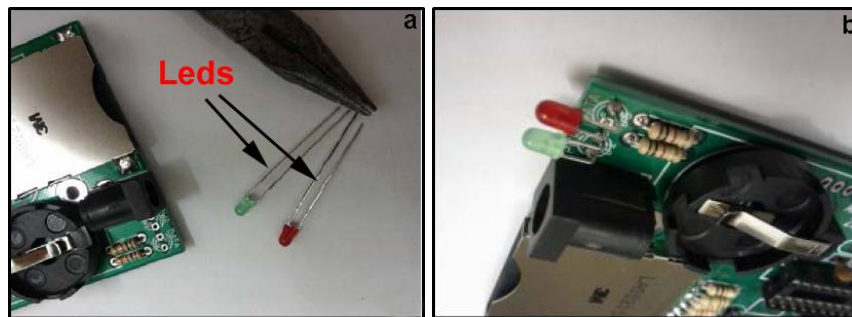
Para soldar el capacitor variable utilizar el diagrama en blanco del PCB para orientar el mismo en la posición correcta, (Fig. 75).



**FIG. 75.** Posicionamiento del capacitor variable

**Paso: 9:** Soldar los diodos *Leds*.

Los *Leds* son de 3 mm, (Fig. 76 panel izquierdo), el *led* verde se utiliza para indicar que el *DataDuino* esta encendido (D1) y el *led* rojo para indicar que está recibiendo datos (D5). Los *leds* se pueden doblar a 90°, (Fig. 76 panel derecho), para ser usados en un gabinete. Se puede efectuar un doble chequeo de la orientación de los diodos: Una forma es observando las patas, la larga es el positivo, (Fig. 76 panel izquierdo).

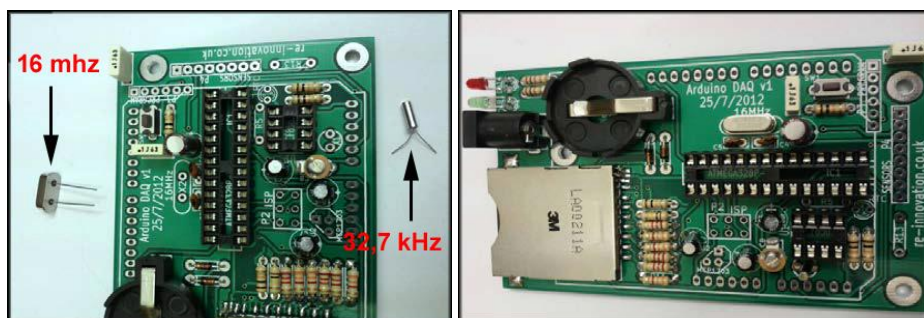


**FIG. 76. Panel izquierdo:** *Leds* de 3 mm y **Panel derecho:** *Leds* soldados y doblados en 90°

**Paso: 10:** Soldar los cristales de cuarzo.

Se utilizan dos cristales de temporalización. Uno de ellos es un pequeño *clock* de cristal utilizado como reloj de tiempo real, el cual tiene una frecuencia de 32,768 kHz. El mismo debe ser soldado con cuidado pudiendo ser montado en cualquier orientación.

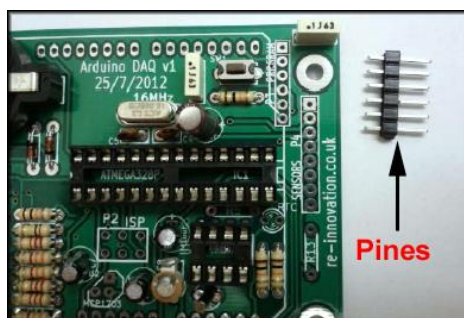
El segundo cristal, el más grande, es de 16 MHz y se utiliza para el *clock* del microcontrolador ATMEGA 328, su orientación no tiene importancia, (Fig. 77).



**FIG. 77. Panel izquierdo:** Cristales de 32,768 kHz y 16 MHz. **Panel derecho:** Cristales colocados en el PCB

**Paso: 11:** Soldar los pines para programación del *Data-Duino*.

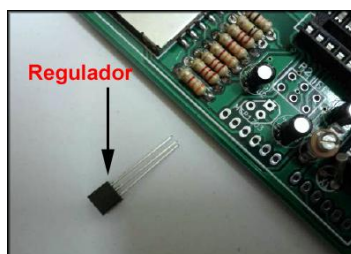
Un terminal de 6 pines machos se utiliza para programar y comunicarse con el microcontrolador, debe soldarse en el puerto P3 PROGRAM, (Fig. 78).



**FIG. 78.** Pines para programar y comunicarse con el microcontrolador

**Paso: 12:** Soldar regulador de tensión 3V3.

El regulador de 3,3V (número de pieza MC1703), se utiliza para suministrar energía a la tarjeta SD. Es un dispositivo de tres terminales, hay que asegurarse que el lado plano del componente coincida con el lado plano del diagrama en blanco que aparece en el PCB, (Fig. 79).



**FIG. 79.** Regulador MC1703 de 3,3V

**Paso: 13:** Montar circuitos integrados.

Insertar los dos circuitos integrados (ICs) en los respectivos zócalos teniendo cuidado al empujar estos en lo zócalos ya que pueden doblarse los terminales e incluso romperse. En primer lugar montar el (PCF8563) en el zócalo de 8 pines, para colocarlo en la posición correcta deben coincidir la muesca del circuito integrado y la marca en el PCB. En segundo lugar se inserta el integrado de 28 pines (ATMEGA328). Este CI tiene el *bootloader*<sup>15</sup> de Arduino instalado, (Fig. 80).



**FIG. 80.** Integrados utilizados: el PCF8563 y el ATMEGA328

**Paso: 14:** Insertar batería de *back-up* del reloj de tiempo real.

Insertar la batería de *back-up* del lado positivo de la misma el cual debe quedar apuntando hacia arriba.

<sup>15</sup>Es programa que ha sido guardado previamente en el microcontrolador de la placa y que nos permite cargar código sin necesidad de *hardware* adicional.

Esta batería alimenta el reloj de tiempo real cuando la placa base no se encuentra conectada al banco de baterías. La misma debe durar más de dos años antes de requerir un reemplazo, (Fig. 81).

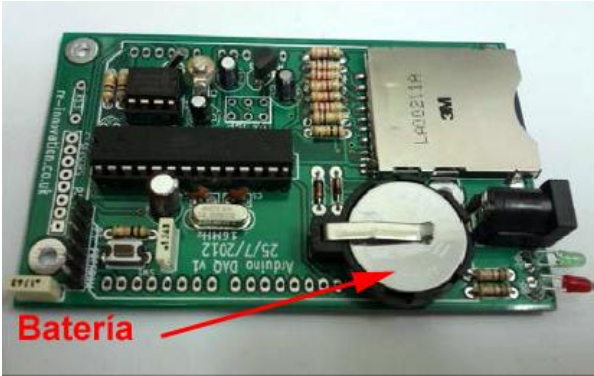


FIG. 81. Batería del reloj de tiempo real insertada en el porta batería

I.3.b Lista de Componentes *Shield* Eólico

Los componentes de la placa *Shield* eólica, (Fig. 82), se listan en la (tabla 8)

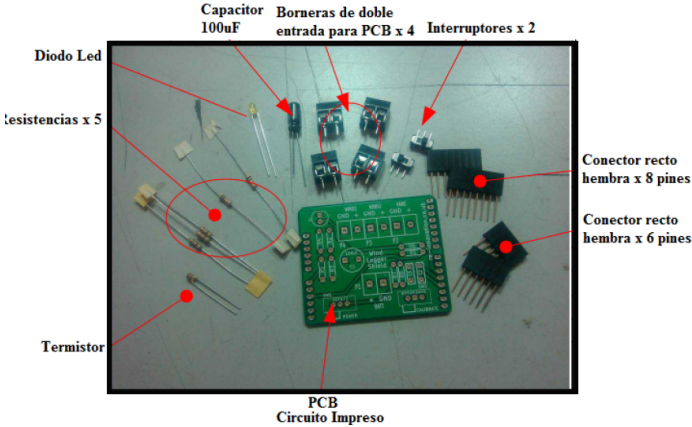


FIG. 82. Componentes del *Shield* eólica

**TABLA 8.** Listado de partes del *shield* eólico

REF	DESCRIPCIÓN	REFERENCIA	DESCRIPCIÓN
C1	Capacitor electrolítico 100 $\mu$ F	R1	Resistencias de 10k
C2	Capacitor filtro (no incluido)	R2	47k
C3	Capacitor filtro (no incluido)	R3	47k
D1	Diodo Led	R4	47k
P1	Bornera de doble entrada	R5	Termistor 47k NTC
P2	Bornera de doble entrada	R6	1k
P3	Bornera de doble entrada	R7	Resistencia Pull up (NI)
P4	Bornera de doble entrada	R8	Resistencia Pull up (NI)
PCB	Circuito impreso	SW1	Interruptor de encendido “ON/OFF”
PINS x2	Conector hembra 8 pines	SW2	Interruptor de modo “Calibración”
PINS x2	Conector hembra 6 pines		

### I.3.b.1. Secuencia de Armado *Shield* Eólico

**Paso: 1:** Soldar resistencias.

Usar una identificación gráfica o un multímetro para encontrar los valores de resistencia las mismas se sueldan en los lugares marcados en el PCB sin importar su orientación, (Fig. 83). La resistencia R5 es un termistor y se soldara después.

La identificación de las resistencias se muestra en la (tabla 9).

**TABLA 9.** Identificación de las resistencias del *shield* eólico

CANTIDAD	VALOR	REFERENCIAS
1	10k	R1
3	47k	R2, R3, R4
1	1k	R6

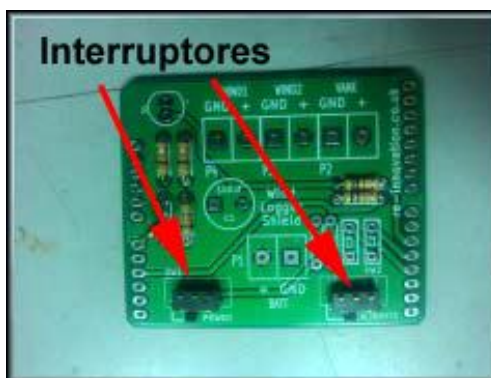


**FIG. 83.** Soldadura de las resistencias

**Paso: 2:** Soldar los dos interruptores.

Colocar el interruptor de encendido donde dice “Power” y el de calibración donde dice “Calibrate”, (Fig. 84).

**Paso: 3:** Soldar el diodo *Led* y el capacitor.



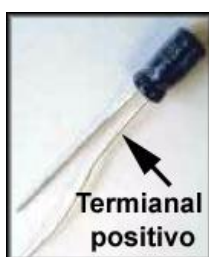
**FIG. 84.** Soldadura de los interruptores

Se puede efectuar un doble chequeo de la orientación del diodo *Led*: Una forma es observando las patas, la larga es el positivo. La otra forma es observar el encapsulado del diodo *Led*, el lado plano es el negativo. Asegurarse de hacer coincidir el lado plano con el diagrama blanco impreso en el PCB, (Fig. 86).

Comprobar la orientación en el capacitor C1, la línea blanca en un costado del capacitor marca el lado del negativo. Hay dos puntos de soldadura para C1 en el PCB, uno es la isla redonda y se debe soldar allí el negativo, el terminal positivo se debe soldar en la isla cuadrada. Otra forma de conocer el positivo de C1 es reconocer la pata más larga. Si es posible, doblar el capacitor para dejarlo apoyando en el circuito impreso, (Fig. 86).

**TABLA 10.** Identificación de los Capacitores del *Shield* Eólico

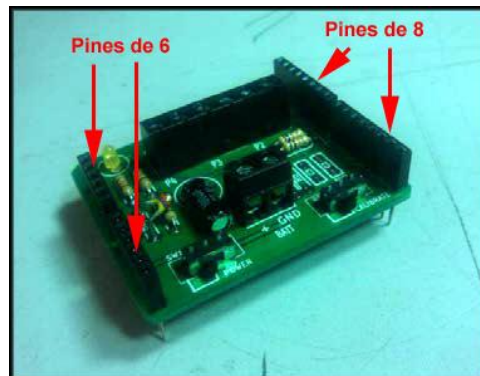
CANTIDAD	VALOR	REFERENCIAS	IMAGEN
1	100 $\mu$ F	C1	FIG. 85



**FIG. 85.** Capacitor C1 100 $\mu$ f.



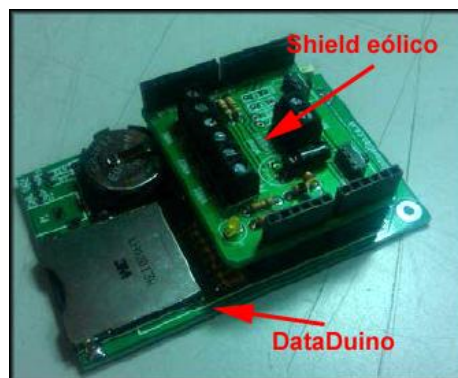
Hay dos conectores hembra de seis pines y dos de ocho pines. Se deben colocar los pines del conector en el *shield* ya construido y luego presionar hasta que pasen por el PCB, para luego soldarlos al mismo. Esto ayuda a mantener todo recto y hace que sea más fácil montarlo en la placa base *Data-Duino*, (Fig. 89).



**FIG. 89.** Soldadura de los pines para los conectores rectos hembras.

**Paso: 7:** Colocar en la placa base *DataDuino*.

El *shield* para estudio del recurso eólico debe encajar fácilmente en la placa base *DataDuino* (y también en otras placas que respetan el formato de Arduino), (Fig. 90).



**FIG. 90.** Paso 8: Colocación en la placa base *DataDuino*.

### I.3.c Lista de Componentes *Shield* Corrientes

Los componentes de la placa *Shield* Corrientes, (Fig. 91), se listan en la tabla 11.

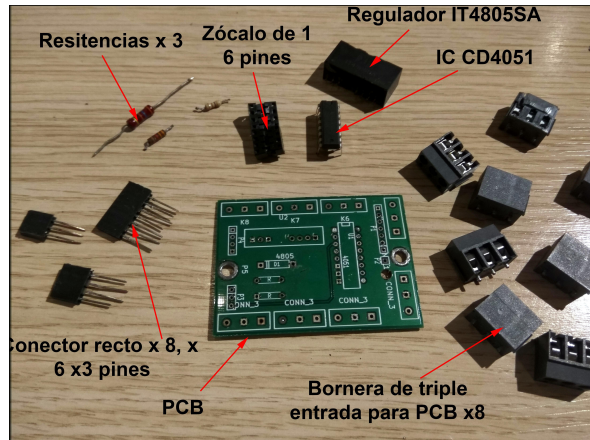


FIG. 91. Componentes del *Shield de Corrientes*

TABLA 11. Listado de las partes del *shield* de corrientes

REF	DESCRIPCIÓN	REF	DESCRIPCIÓN
	Placa PCB	R1	Resistencias de 47K $\Omega$
IC1	CD4051	R2	360 $\Omega$
P4	XXP POWER IT4805SA	R3	3,3k $\Omega$
P1	8 Hembras con terminales de salida x 2	CON	8 borneras 3 pins
P4,3	6 Hembras con terminales de salida x 2		

#### I.3.c.1. Secuencia de Armado del *Shield* de Corrientes

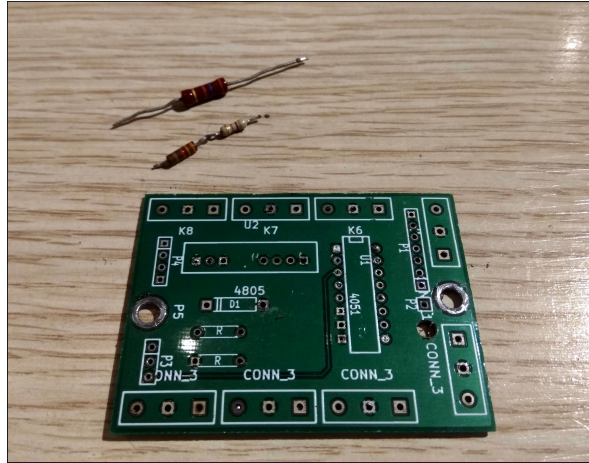
**Paso: 1:** Soldar resistencias.

Utilizar la identificación gráfica (código de resistencias) o un multímetro para encontrar los valores de resistencias. Se sueldan en los lugares indicados sin importar su orientación, (Fig. 92).

La identificación de las resistencias se muestra en la (Tabla 12).

TABLA 12. Identificación de las resistencias del *shield* corrientes

CANTIDAD	VALOR	REFERENCIAS
1	360 $\Omega$	R1
1	47k $\Omega$	R2
1	3,3k $\Omega$	R3

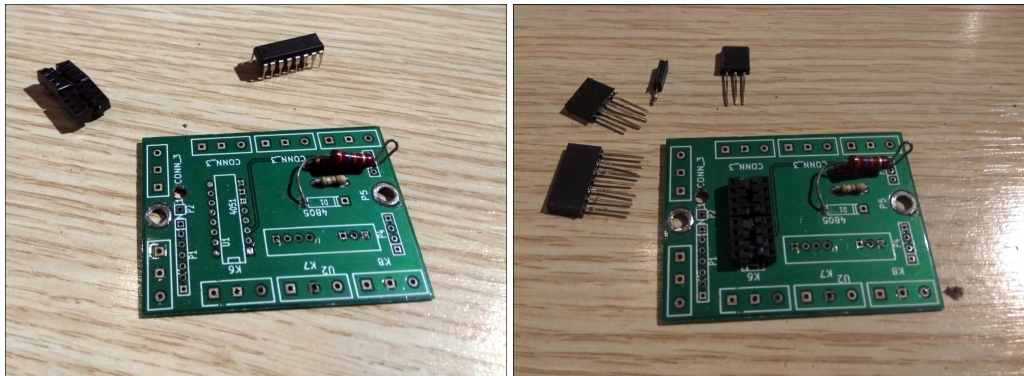


**FIG. 92.** Soldadura de las resistencias

**Paso: 2:** Soldar el zócalo y colocar el IC CD4051 y Soldar los pines macho y hembra para el anclaje en el *Data-Duino*.

Comprobar la orientación del integrado, la muesca de los zócalos de los circuitos integrados debe alinearse con la muesca blanca respectiva dibujada en el PCB. Colocar el 4051 haciendo coincidir las muescas del zócalo y el IC , (Fig. 93).

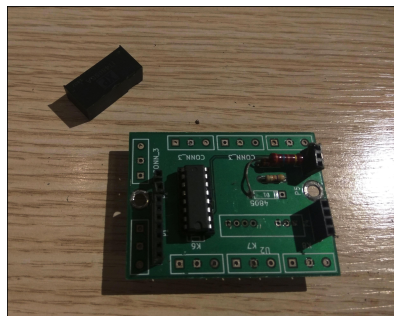
Los pines son de 6, 4 y 3 terminales y sirven para comunicarse con el microcontrolador, deben soldarse en los puertos P1, p4 y p3 respectivamente, (Fig. 93).



**FIG. 93.** Panel izquierdo: Zócalo y IC 4051. Panel derecho: Soldadura de los pines

**Paso: 3:** Soldar la fuente DC/DC IT4805SA *DataDuino*.

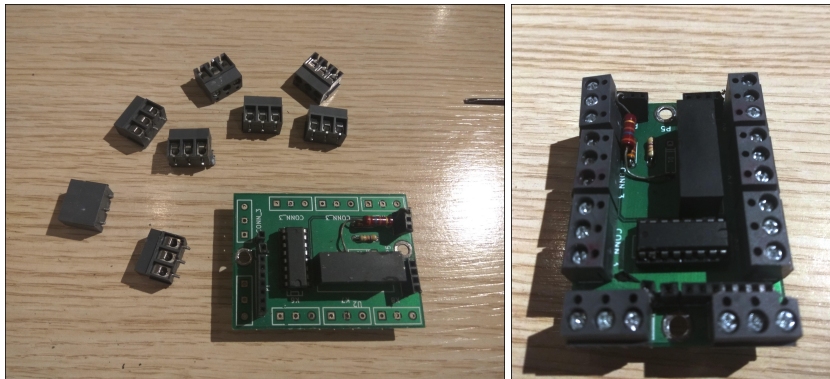
Se debe soldar la fuente DC/DC IT4805SA en los puntos de soldadura U2, (Fig. 94).



**FIG. 94.** Soldadura de la fuente DC/DC

**Paso: 4:** Soldar las borneras.

Las borneras se enlazan y se colocan en CONN3, para obtener 8 borneras. Hay que asegurarse que se coloquen en la dirección correcta deben tener el frente hacia afuera del PCB, (Fig. 95 panel izquierdo). La placa *shield* de corrientes debería quedar de la siguiente manera (Fig. 95 panel derecho).



**FIG. 95. Panel izquierdo:** Soldadura de las borneras **Panel derecho:** *Shield* de corrientes.

### I.3.d Diagrama de los Circuitos del *Data-Duino*

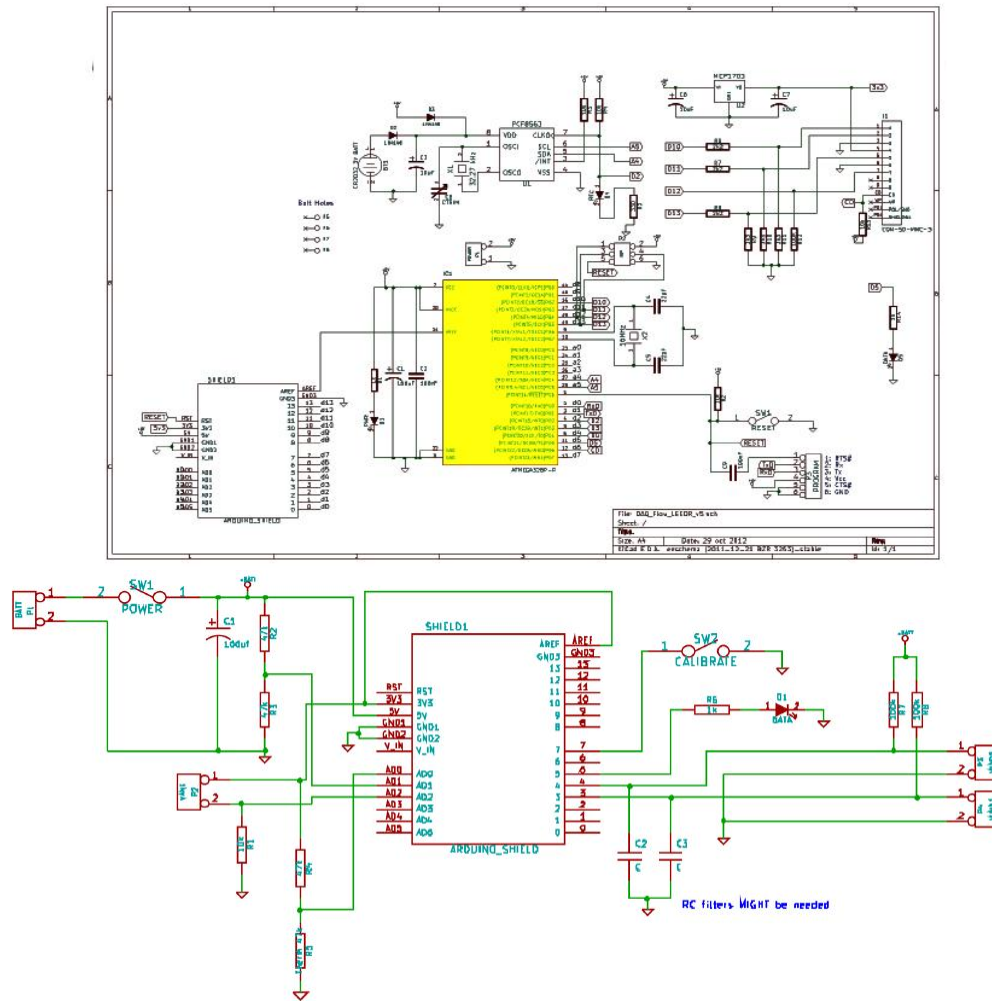


FIG. 96. Panel superior: Circuito *DataDuino*. Panel inferior: Circuito *shield* eólico

## II. CUESTIONARIO DE HÁBITOS DE CONSUMO

El siguiente cuestionario se propone de manera general a los efectos tener un panorama del consumo eléctrico de las viviendas a estudiar y contrastarlo con las mediciones tomadas de consumo total registrado por el sistema *DataDuino*

Iluminación	Cantidad	Potencia (W)	Tiempo (h)	Consumo (Wh)	Arterfactos	Cantidad	Potencia (W)	Tiempo (h)	Consumo (Wh)
					TVs				
Dormitorio					Celulares				
2 Dormitorio					Pc				
3 Dormitorio					Laptop				
Otros					Aire Ac				
					Heladera				
Cocina					Lavarropa				
					Frizer				
Baño					Seca ropas				
Otros					<b>Otros Art Eléctricos</b>				
Sala de estar									
Exterior									
Total									
Otras áreas									
Tipo de calefacción	Leña	Gas	Eléctrica	Otros					

**FIG. 97. Panel izquierdo:** Encuesta modelo propuesta para mejorar la calidad de la información requerida.