

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

## **FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA**

### **DISEÑO Y CONTROL AUTOMÁTICO DE UNA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE QUE UTILICE EL HIDRÓGENO COMO VECTOR ENERGÉTICO, GENERADO A PARTIR DEL APROVECHAMIENTO DE RECURSOS RENOVABLES**

**PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL GRADO DE MAGÍSTER EN  
INGENIERÍA MECÁNICA**

**MENCIÓN EN DISEÑO Y AUTOMATIZACIÓN**

**Ing. MAURICIO DUQUE OROZCO**

**mauricio.duque@epn.edu.ec**

**Ing. FREDY RAFAEL LLULLUNA LLUMIQUINGA**

**fredy.llulluna@epn.edu.ec**

**DIRECTOR: Ing. ÁLVARO AGUINAGA BARRAGÁN, Ph.D.**

**alvaro.aguinaga@epn.edu.ec**

**CO - DIRECTOR: Ing. MARIO GERMAN GRANJA RAMÍREZ, M.Sc.**

**mario.granja@epn.edu.ec**

**Quito, AGOSTO 2016**

## DECLARACIÓN

Nosotros, Mauricio Duque Orozco y Fredy Rafael Llulluna Llumiyinga declaramos que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría y que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional y que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

---

**Ing. Mauricio Duque**

---

**Ing. Fredy Llulluna**

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por los señores Mauricio Duque Orozco y Fredy Rafael Llulluna Llumiyinga bajo mi supervisión.

---

**Ing. Álvaro Aguinaga, Ph.D.**

**DIRECTOR DE PROYECTO**

---

**Ing. Mario Granja, M.Sc.**

**CO-DIRECTOR DE PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, quiero agradecer a mi esposa, por tanta comprensión y apoyo incondicional que me ha dado tanto durante todo este tiempo, el amor que hace que todos los días salga adelante, también a mis padres, por todo lo que me han dado durante toda mi vida, por el sacrificio que tuvieron y tienen para hacerme mejor persona y un profesional. Por último, quiero agradecer a mis compañeros y amigos de trabajo, Mildred, Geovana, Fredy, Manuel y en especial al Doctor Álvaro Aguinaga, por toda la confianza, ayuda, y en especial por creer en mí, a todos ellos les debo poder hacer este trabajo y ver el crecimiento que he tenido al lado de ellos.

**Mauricio**

## **AGRADECIMIENTOS**

Agradezco a Dios por darme salud y fortaleza para seguir adelante, a mi novia de una manera muy especial por su amor y apoyo incondicional en cada etapa de mi vida, a padres y amigos Geovana, Mildred, Manuelito que son mi segunda familia en especial al Dr. Álvaro Aguinaga y al Ing. Mario Granja por la confianza depositada y darme la oportunidad de seguir creciendo.

**Fredy**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, por todo su apoyo durante el tiempo de formación, por abrirme las puertas en tan honorable y prestigiosa institución que ha permitido desenvolverme tanto como profesional y personalmente, es un honor trabajar y ser parte de la institución.

**Mauricio**

## **DEDICATORIA**

Dedico este trabajo a la Escuela Politécnica Nacional, por todo su apoyo durante el tiempo de formación, por abrirme las puertas en tan honorable y prestigiosa institución que ha permitido desenvolverme tanto como profesional y personal, es un honor trabajar y ser parte de la institución. De manera muy especial a mi compañera de vida, mi Kary Elizabeth.

**Fredy**

## CONTENIDO

<b>DECLARACIÓN.....</b>	<b>i</b>
<b>CERTIFICACIÓN.....</b>	<b>ii</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICE DE TABLAS.....</b>	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS.....</b>	<b>xiii</b>
<b>RESUMEN.....</b>	<b>xv</b>
<b>PRESENTACIÓN.....</b>	<b>xvi</b>
<b>CONTENIDO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ÍNDICES DE TABLAS .....</b>	<b>xii</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS .....</b>	<b>xiv</b>
<b>CAPÍTULO 1: GENERALIDADES .....</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción .....	1
1.2 Análisis y planteamiento del problema .....	2
1.2.1 Supuestos teóricos .....	2
1.2.2 Situación real estudiada o definición del problema .....	2
1.3 Objetivos y alcance.....	3
1.3.1 Objetivo general .....	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Metodología .....	4
1.5 Razones por las que se necesita el desarrollo de una vivienda social sostenible .....	4
<b>CAPÍTULO 2: HOGAR INTELIGENTE Y VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE (VSS)</b> .....	<b>6</b>



2.1	Hogar inteligente .....	6
2.1.1	Características de un hogar inteligente y una vivienda social sostenible 8	
2.2	Contexto ecuatoriano.....	9
2.2.1	Importancia de una vivienda inteligente en el ecuador.....	12
2.2.2	Pasos para la implementación de una vivienda social sostenible inteligente.....	13
2.2.3	Logros alcanzados por las viviendas inteligentes.....	13
<b>CAPÍTULO 3: RECURSOS ENERGÉTICOS DISPONIBLES PARA LA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE .....</b>		<b>15</b>
3.1	Recursos energéticos renovables disponibles en Ecuador .....	15
3.2	Sistema de generación fotovoltaico .....	16
3.2.1	Sistema fotovoltaico .....	16
3.2.2	Cálculo de una instalación fotovoltaica aislada .....	18
3.3	Análisis energético requerido para la vivienda .....	21
3.4	Sistema de generación eólico.....	27
3.4.1	Sistema eólico .....	27
3.4.2	Energía del viento.....	28
3.4.3	Perfil vertical del viento.....	29
3.4.4	Potencia del aerogenerador .....	31
3.4.5	Distribución de Weibull .....	31
3.4.6	Cálculo simplificado de potencia .....	32
3.4.7	Cálculo de la potencia de un aerogenerador.....	32
3.4.8	Costos del sistema de generación de energía .....	35
3.5	Diseño del sistema de generación de energía por medio del hidrógeno y pilas de combustible .....	36
3.5.1	Electrolizador.....	36
3.5.2	Selección de materiales para el electrolizador (software CES Edupack).....	39
3.5.3	Almacenamiento de hidrógeno por medio de hidruros metálicos .....	43
3.5.4	Pilas de combustible.....	44

3.6	Selección de baterías para la VSS .....	46
<b>CAPÍTULO 4: DISEÑO DE LA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE .....</b>		<b>47</b>
4.1	Diseño de la estructura para una vivienda tipo de 4 personas .....	47
4.1.1	Distribución de espacios en la vivienda .....	48
4.2	Selección de materiales para la estructura soporte .....	48
4.2.1	Especificaciones del perfil 8 (40x40) .....	49
4.3	Diseño de acoples/soportes para la estructura.....	50
4.4	Modelos matemáticos usados por HOMER Energy para el dimensionamiento de los sistemas energéticos de la vivienda .....	52
4.4.1	Modelo para determinar la posición y potencia del panel fotovoltaico	53
4.4.2	Modelo para el aerogenerador .....	62
4.4.3	Algoritmo .....	64
4.5	Coste normalizado del sistema.....	67
4.5.1	Costo total anual.....	68
4.5.2	Costo total actual neto.....	68
4.6	Simulación de escenarios en HOMER Energy .....	69
4.6.1	Escenario 1 (solar – eólico).....	70
4.6.2	Comparación de los valores obtenidos con HOMER Energy y los calculados	74
4.6.3	Escenario 2 (almacenamiento mediante hidrógeno y pilas de combustible).....	74
4.7	Análisis de generación y almacenamiento de hidrógeno.....	80
<b>CAPÍTULO 5: SISTEMA DE CONTROL Y SEGURIDADES DE LA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE .....</b>		<b>82</b>
5.1	Diseño y fabricación del componente base del sistema de control en la vivienda .....	82
5.1.1	Variables físicas .....	83
5.2	Selección de elementos para la plataforma de monitoreo .....	83
5.2.1	Generalidades del hardware .....	84

5.2.2	Requerimientos técnicos para la adquisición de datos .....	85
5.2.3	Elementos para la adquisición de datos .....	85
5.2.4	Especificaciones de control .....	87
5.2.5	Realización del componente de adquisición de datos .....	89
5.3	Instrumentación virtual para adquisición de datos en tiempo real .....	92
5.3.1	Flujo de la información .....	93
5.4	Transmisión de datos y protocolos de comunicación .....	97
5.4.1	Familia de protocolos .....	98
5.4.2	Direcciones IP y encaminamiento mediante routers.....	99
5.4.3	Protocolo profinet .....	99
5.4.4	Modos de transmisión .....	100
5.4.5	Stack de comunicaciones RT .....	102
5.5	Trama de envío de la información .....	102
5.5.1	Armado de la trama .....	103
5.6	Costo de equipos utilizados en el sistema de control .....	104
<b>CAPÍTULO 6: SOFTWARE DESARROLLADO .....</b>		<b>105</b>
6.1	Arquitectura del sistema propuesto .....	105
6.1.1	Proceso .....	105
6.1.2	Back- end .....	106
6.1.3	Front- end.....	107
6.2	Definición de la arquitectura .....	107
6.2.1	Máquinas virtuales (MV).....	108
6.2.2	Cliente-Servidor.....	108
6.2.3	Vistas de casos de uso.....	109
6.3	Seguridades del sistema .....	109
6.4	Back y front-end en las seguridades del sistema .....	110
6.4.1	Requisitos de seguridad .....	110
6.5	Implementación de sistema de control .....	112
6.5.1	Repositorio .....	112
6.5.2	Aplicación cliente.....	112

6.5.3	Servidor .....	112
6.5.4	Librería para Arduino .....	112
6.6	Smartgrid enfocada al sector residencial (vivienda social sostenible) .....	113
6.6.1	Topología de la vivienda en la smartgrid .....	113
6.6.2	Comportamiento de la vivienda social sostenible .....	114
6.6.3	Diagrama de smartgrid flujo de programa. ....	115
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES y RECOMENDACIONES .....</b>		<b>117</b>
7.1	Conclusiones .....	117
7.2	Recomendaciones .....	118
<b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>		<b>120</b>
<b>ANEXOS .....</b>		<b>125</b>

## ÍNDICES DE TABLAS

Tabla 1. Vivienda tradicional vs. vivienda inteligente .....	9
Tabla 2. Irradiación solar promedio para Quito .....	19
Tabla 3. Factor de corrección.....	20
Tabla 4. Consumos de energía eléctrica en una vivienda regular.....	20
Tabla 5. Datos técnicos THW – 90 (AWG/MCM) .....	26
Tabla 6. Descripción de equipos fotovoltaicos EnerPro Cía. Ltda.....	27
Tabla 7. Variación de la densidad del aire, temperatura y presión con la altitud en una atmósfera estándar .....	29
Tabla 8. Clases y longitudes de rugosidad.....	30
Tabla 9. Velocidad del viento para Quito.....	33
Tabla 10. Parámetros para cálculo de potencia .....	33
Tabla 11. Costo del sistema fotovoltaico.....	35
Tabla 12. Costo de baterías para sistemas fotovoltaicos y eólicos .....	35
Tabla 13. Costo total de sistema .....	36
Tabla 14. Tipos de electrolizadores.....	37
Tabla 15. Potencial galvánico en medio acuoso .....	41
Tabla 16. Resistividad eléctrica en un medio alcalino .....	42
Tabla 17. Tanque de almacenamiento de hidrógeno .....	44
Tabla 18. Tipos de pilas de combustible .....	45
Tabla 19. Selección de baterías .....	46
Tabla 20. Materiales para realizar la estructura .....	49
Tabla 21. Especificaciones del perfil 8 (40X40).....	49
Tabla 22. Acoples de sujeción.....	51
Tabla 23. Parámetros para el cálculo del viento.....	64
Tabla 24. Elementos considerados para la simulación .....	70
Tabla 25. Energía eléctrica del sistema .....	72
Tabla 26. Comparación entre sistemas de almacenamiento de energía.....	73
Tabla 27. Comparación de Resultados .....	74
Tabla 28. Comparación almacenamiento de energía hidrógeno y baterías .....	79
Tabla 29. Generación y consumo de H <sub>2</sub> .....	80

Tabla 30. Comparación almacenamiento baterías vs. almacenamiento hidrógeno .....	81
Tabla 31. Generalidades del hardware .....	84
Tabla 32. Características de selección de adquisición de datos .....	86
Tabla 33. Comparación de costos y soporte .....	86
Tabla 34. Especificaciones de los componentes del sistema de control .....	87
Tabla 35. Costo de componentes del sistema de control .....	104
Tabla 36. Descripción para el ingreso al sistema .....	111

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Flujo de energía en 2012. ....	10
Figura 2. Usos de la energía producida en el Ecuador.. ....	11
Figura 3. Consumo de electricidad por sector. ....	12
Figura 4. Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo.....	16
Figura 5. Irradiación solar para el Ecuador.. ....	18
Figura 6. Arreglo fotovoltaico.....	23
Figura 7. Energía extraíble del viento, según la Ley de Betz. ....	31
Figura 8. Energía extraíble del viento.....	34
Figura 9. Proceso de electrólisis básica. ....	37
Figura 10. Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino.....	39
Figura 11. Potencial galvánico vs. resistencia respecto al agua.. ....	40
Figura 12. Comparación de aleaciones de níquel.. ....	42
Figura 13. Materiales componentes del cátodo.....	43
Figura 14. Esquema del almacenamiento de hidrógeno. ....	43
Figura 15. Esquema pila de combustible.. ....	45
Figura 16. Diseño esquemático de la vivienda social.....	48
Figura 17. Carga de tracción del perfil en la ranura.. ....	50
Figura 18. Esquema de disposición de los acoples de sujeción.....	51
Figura 19. Pletina de sujeción rectangular ....	51
Figura 20. Acoples en sistema de sujeción ....	52
Figura 21. Ventana ingreso de datos del recurso solar ....	59
Figura 22. Localización en latitud y longitud.....	60
Figura 23. Curva de potencia para un generador eólico ....	63
Figura 24. Ingreso del recurso eólico en HOMER Energy.....	66
Figura 25. Recurso eólico ....	66
Figura 26. Resultados del escenario solar-eólico.....	67
Figura 27. Cálculo del costo total actual neto.....	69
Figura 28. Reporte de número de simulaciones.....	71
Figura 29. Simulación de resultados ....	71
Figura 30. Generación de energía del sistema.....	72

Figura 31. Resultados sin considerar el sistema eólico.....	73
Figura 32. Esquema del sistema de almacenamiento.....	75
Figura 33. Salida de energía de la pila de combustible.....	76
Figura 34. Costo de implementación del sistema solar más hidrógeno.....	77
Figura 35. Almacenamiento H2 – baterías.....	77
Figura 36. Costo de Inversión y COE.....	78
Figura 37. Disminución de la energía producida por el sistema de hidrógeno.....	79
Figura 38. Esquemas de posición de componentes.....	91
Figura 39. Primer prototipo de adquisición de datos de la vivienda.....	92
Figura 40. Diagrama de flujo de información.....	94
Figura 41. Direcciones IP y encaminamiento.....	99
Figura 42. Rendimiento de la Comunicación PROFINET.....	101
Figura 43. Tiempos de reacción del protocolo PROFINET.....	101
Figura 44. Stack de comunicaciones en tiempo real (RT).....	102
Figura 45. Diagrama de estructura de la arquitectura.....	105
Figura 46. Proceso de la adquisición de datos.....	106
Figura 47. Seguridades del sistema para ingreso a la plataforma.....	109
Figura 48. Ingreso a la plataforma.....	110
Figura 49. Esquemas registro de usuario.....	111
Figura 50. Esquema de los sistemas de viviendas conectados a la Red.....	113
Figura 51. Esquema de la topología del control.....	114
Figura 52. Diagrama de proceso de la VSS.....	115
Figura 53. Diagrama de control de la vivienda social.....	116



## RESUMEN

En Ecuador, en pleno siglo XXI, aún existen problemas de déficit habitacional y hogares que todavía no tienen acceso al servicio eléctrico. Por otro lado, el Gobierno Nacional ha hecho un gran esfuerzo para poder llevar a cabo el proyecto de diversificación de la matriz energética, debido a la contaminación y a los altos costos fiscales que ésta implica; por lo anterior, se propone el diseño y control automático de una vivienda social sostenible que utilice el hidrógeno como vector energético, generado a partir del aprovechamiento de recursos renovables. Para ello, primero se estableció una ubicación geográfica conveniente de la vivienda, el número de personas a la que debe estar dirigida, el consumo energético promedio y cómo debe estar conformado el sistema de energía renovable (solar o eólico) y el sistema de almacenamiento de energía (pilas de combustible de hidrógeno o baterías para sistemas estacionarios). Con la ayuda del software *HOMER Energy* se determinó que la mejor opción es una vivienda con un sistema de energía solar y con un sistema de almacenamiento de baterías. Una vez definida la configuración energética de la vivienda se realizó el diseño y control de la plataforma para la vivienda social sostenible, con el fin de monitorear y controlar las variables de índole eléctrico como: corriente, voltaje, potencia, entre otros, que son fundamentales para mejorar el rendimiento de la vivienda.

**Palabras clave:** vivienda social, hidrógeno, energía renovable, control, monitoreo.

## PRESENTACIÓN

Este proyecto está orientado a poblaciones marginales con limitaciones económicas ubicadas en zonas de difícil acceso y en donde la infraestructura eléctrica aún no está presente. Por ello, se plantea una solución a partir del uso de recursos renovables, que no sólo contribuiría a aplacar el déficit habitacional y eléctrico, sino que también constituiría una opción para el proceso de diversificación de la matriz energética del país.

A continuación, se describen los capítulos que componen este documento.

En el primer capítulo se presentan la introducción, los objetivos, la metodología y la justificación del proyecto.

El segundo capítulo presenta una descripción de las características de una vivienda social y se las contrasta con las características de una vivienda inteligente. También se hace una revisión de la situación energética en el país.

En el tercer capítulo se describen los sistemas de energía renovable solar y eólica que conformarían la vivienda social sostenible, con el fin de determinar las características geográficas de la ubicación de la vivienda social sostenible (VSS) y su consumo energético promedio. Luego, se hacen cálculos matemáticos para determinar el valor de los componentes propios de cada uno de los sistemas antes mencionados. Finalmente, se realiza el diseño del sistema de generación de energía por medio del hidrógeno y pilas de combustible, y la selección de baterías.

En el cuarto capítulo se definen las características geográficas de la ubicación de la vivienda social sostenible (VSS), el número de personas promedio a la que está dirigida la vivienda, la distribución de espacios y las características de la estructura soporte. En este capítulo también se desarrolla una simulación en el software *HOMER Energy* para definir qué tipo de sistema de energía renovable (solar o eólico) y qué tipo de sistema de almacenamiento de energía (pilas de combustible de hidrógeno o baterías para sistemas estacionarios) es el más idóneo para la VSS. Para esto, se simulan dos escenarios, el primer escenario combina un sistema solar y eólico con dispositivos de almacenamiento de energía (banco de baterías); y el segundo escenario combina el mismo sistema de generación anterior con un

sistema de almacenamiento de energía no convencional (hidrógeno y las pilas de combustible).

En el quinto capítulo se especifica el proceso de selección de elementos que intervienen en el control y monitoreo de la vivienda social sostenible, planteándose una solución de bajo presupuesto para los elementos de adquisición de datos.

En el sexto capítulo se desarrolla el software de monitoreo, la aplicación web y las seguridades del sistema; y se profundiza en cómo todos estos componentes tecnológicos interactúan en la plataforma de control.

Finalmente, en el séptimo capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones.

# CAPÍTULO 1

## GENERALIDADES

### 1.1 INTRODUCCIÓN

Hoy en día, se evidencia una gran crisis energética debido a que existe una población creciente que continuamente está demandando grandes cantidades de energía eléctrica. En Ecuador, el principal problema es que existen poblaciones remotas con escaso acceso a las redes eléctricas.

Una vivienda social se define como “una solución habitacional destinada a cubrir el problema de déficit presente en las áreas más deprimidas socialmente cuyas familias permanecen en condiciones económicas apremiantes” (Parlamento Andino, 2015).

Desde el punto de vista eléctrico, una vivienda social sostenible que utilice el hidrógeno como vector energético, constituye una solución a muchos problemas actuales del país, pues es capaz de solventar el inconveniente de generación y transporte de energía eléctrica y porque puede proveer de este servicio a poblaciones vulnerables sin acceso a él.

En 2009, en España surge la propuesta de la Casa Oikos, la cual fue desarrollada por el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). La Casa Oikos posee un sistema que utiliza el hidrógeno como almacenamiento de energía para generar electricidad con el objetivo de beneficiar a la población vulnerable de escasos recursos. Se debe tomar en cuenta que el hidrógeno es el elemento más común en el Universo, se encuentra casi en un 75% de todo lo que nos rodea. En la Tierra, aunque no esté en estado libre y aislado, conforma el 70% de los organismos y de la superficie.

El Ecuador es un país lleno de privilegios, cuenta con una gran cantidad de recursos energéticos renovables, una alta radiación solar durante gran parte del año, una cantidad importante de fuentes fluviales y vientos que son aprovechados para la generación eléctrica, siendo estos recursos la base para la producción de hidrógeno y, por consiguiente, de energía eléctrica; por tanto, existen las condiciones ideales para el desarrollo de este proyecto.

## **1.2 ANÁLISIS Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

### **1.2.1 SUPUESTOS TEÓRICOS**

La implementación de una vivienda social sostenible en lugares remotos, donde el acceso a la red eléctrica representa una gran dificultad, es una solución viable que permite a la población vulnerable acceder al recurso eléctrico.

Actualmente, el subsidio implementado para el consumo eléctrico permite que el precio del kilovatio hora sea muy inferior al costo real de producción, limitando la implementación de un sistema energético renovable en una vivienda social sostenible.

Por este motivo, es importante analizar los rendimientos que podrían obtenerse con sistemas híbridos de generación de energía renovable y almacenamiento de la misma, con sistemas convencionales y no convencionales, como el hidrógeno y las pilas de combustible.

### **1.2.2 SITUACIÓN REAL ESTUDIADA O DEFINICIÓN DEL PROBLEMA**

Los modelos para la generación de electricidad en una vivienda poseen una estructura convencional, donde los elementos generadores son principalmente, fotovoltaicos o eólicos. Recientemente, se ha estudiado sobre modelos energéticos que incluyan el hidrógeno como método de almacenamiento energético, por tanto, es indispensable proponer un proyecto que pueda ser implementado en el país considerando las limitaciones tecnológicas que existen para el desarrollo de dispositivos. Las consideraciones a tomarse en cuenta son:

- Que todas las piezas se consigan localmente.
- Que los elementos tengan un precio moderado.
- Que debe tener la facilidad de ensamble y mantenimiento.

Desde el punto de vista del control, existen problemas como el tipo de comunicación que se debe usar y las variables a monitorear o la topología. Cada país, tiene un modelo diferente que se ajusta a sus necesidades y a sus intereses.

Además, se tienen muchas limitantes para lograr que los equipos que integran la vivienda social sostenible se comuniquen unos con otros y puedan tomar decisiones en conjunto. Entre las principales limitaciones se encuentran:

- Temas referentes a seguridad.
- Servidores que gestionen altas cantidades de elementos conectados.
- Gestión de los datos en tiempo real.
- Softwares existentes con altos costos en licencias.
- Bases de datos que estén continuamente creciendo, por el alto tráfico en la toma de medidas.
- Algoritmos que permitan determinar las necesidades de la red en cierto momento.
- El costo de implementación y mantenimiento.

Desde el punto de vista del control, este documento busca establecer un método que permita instrumentar una vivienda social sostenible para la obtención de variables en tiempo real.

## **1.3 OBJETIVOS Y ALCANCE**

### **1.3.1 OBJETIVO GENERAL**

Diseñar y controlar automáticamente una vivienda social sostenible que utilice el hidrógeno como vector energético generado a partir del aprovechamiento de recursos renovables.

### **1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Diseñar un sistema de hidrógeno y pilas de combustible que permita el almacenamiento de energía.

Determinar una solución de bajo costo y de fácil aplicación en el Ecuador para la implementación del monitoreo de las variables físicas para la generación eléctrica en una vivienda social sostenible.

Diseñar una plataforma de control y monitoreo que permita gestionar datos provenientes de diferentes dispositivos conectados en la vivienda por medio de instrumentación.

#### **1.4 METODOLOGÍA**

Mediante la realización de simulaciones en diferentes escenarios que permitan establecer la mejor disposición de los elementos generadores y almacenadores de energía en la vivienda social sostenible, se seleccionarán diferentes componentes para la realización del diseño del control automático y la adquisición de datos en tiempo real de las variables involucradas en la vivienda social sostenible.

Se realizará una selección de materiales para diseñar diferentes elementos que componen el electrolizador de tubos concéntricos por medio del software *CES EduPack*.

Así mismo, se realizará una simulación en el software *HOMER Energy* para determinar los costos del consumo eléctrico y el valor del kilovatio hora; además de una simulación de los escenarios planteados en el proyecto.

Para la adquisición de datos en tiempo real y el desarrollo del control de la vivienda social sostenible se utilizará la herramienta Arduino y el software orientado a la web NodeJS.

#### **1.5 RAZONES POR LAS QUE SE NECESITA EL DESARROLLO DE UNA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE**

“La economía ecuatoriana podría tener serios problemas si no se descubren nuevas reservas de petróleo y se diversifica la matriz energética” (Corporación Eléctrica del Ecuador [CELEC], 2016).

Por otra parte, la matriz energética del país es altamente contaminante e implica altos costos fiscales. Hay que mencionar que el petróleo y sus derivados son subsidiados, por lo que el desarrollo de una VSS tiene un impacto directo en la balanza comercial.

Los subsidios juegan un papel importante en el precio del kilovatio hora. El bajo precio con que se vende la electricidad en el país, es una barrera a superar para que la vivienda social sostenible se implemente en el Ecuador.

En el país y en el mundo, se ha avanzado poco en el desarrollo de tecnologías que permitan utilizar el hidrógeno como vector energético. Lo que, en la actualidad, representaría un gran aporte para solucionar el problema de la diversificación de la matriz energética del Ecuador.

En consecuencia, se hace necesario fomentar el desarrollo de la energía renovable a través del hidrógeno como vector energético, realizando una comparación con las tecnologías de almacenamiento convencionales (por ejemplo, un banco baterías) y analizar la viabilidad tecnológica- económica de este sistema.

En relación al déficit habitacional, en el año 2010 fue de 692.216 viviendas (Ministerio de Desarrollo Urbano y Vivienda [MIDUVI], 2010). Según datos del Censo de Población y Vivienda realizado en 2010, el 5,23% de la población no dispone de servicio eléctrico.

El Parlamento Andino (2015), afirma que la calidad de la vivienda es uno de los indicadores más claros sobre el nivel de vida de la población y que existe una estrecha relación entre la calidad de la vivienda y el ingreso recibido por cada familia.

El rápido crecimiento de la población trae consigo una alta demanda de viviendas, lo que genera un impacto social notorio.

Por lo general, las condiciones del desarrollo urbano en sectores de escasos recursos económicos son precarias en cobertura y en calidad de los servicios públicos.

Se considera que el diseño y construcción de una vivienda social sostenible podrá ser una solución a los problemas señalados, ya que no sólo es una opción para la diversificación de la matriz energética, sino también una solución a los problemas habitacionales para familias de escasos recursos.



## CAPÍTULO 2

### HOGAR INTELIGENTE Y VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE (VSS)

En este capítulo se realiza una descripción de las características de una vivienda social sostenible y se las contrasta con las características de una vivienda inteligente, pues al poseer un sistema de control automático se conjugan simultáneamente electricidad, electrónica e informática aplicadas a la gestión técnica de la vivienda.

#### 2.1 HOGAR INTELIGENTE

Hogar inteligente es aquel que permite controlar de manera óptima todas las variables físicas involucradas en la vivienda. La propuesta de un hogar inteligente no es reciente, básicamente tiene su origen por la década de los 80's. Hoy en día, no existen lineamientos claros establecidos que permitan identificar una ruta viable para su implementación en todos los ámbitos sociales.

La vivienda inteligente nace del intento por usar controles de consumo mediante medidores y sistemas de monitorización para registrar los eventos tales como, consumo y comportamiento en la red a partir de los contadores inteligentes. En 1980, los medidores automáticos se utilizaron para monitorizar las cargas de millones de viviendas, lo que derivó en una infraestructura avanzada para los años de 1990 que era capaz de determinar la cantidad de energía que se utilizaba en diferentes momentos del día. Esta capacidad demostró las necesidades urgentes de realizar una infraestructura organizada, con características de cómputo distribuido y manejo de la *Big Data*.

“Las viviendas sostenibles son parte de las redes eléctricas que pueden integrar de manera inteligente el comportamiento y las acciones de todos los actores conectados a ellas (quienes generan electricidad, quienes la consumen y quienes realizan ambas acciones) para proporcionar un suministro de electricidad seguro, económico y sostenible”, (Ministerio de Industria, Energía y Turismo, 2013).

En un hogar inteligente, la instrumentación juega un papel muy importante, pues permite conocer el comportamiento dinámico de todas las variables a controlar dentro del proceso. Principalmente, permite conocer los datos de las variables físicas en tiempo real, lo que es vital especialmente cuando el control de la vivienda se hace de manera descentralizada.

La escasa implementación de sistemas basados en viviendas sostenibles se debe a los siguientes factores:

- Elevados costos en su implementación.
- Redes eléctricas obsoletas (dependiendo de los países).
- Precios bajos en la producción de electricidad.
- Poca penalidad por ineficiencia eléctrica (cuando la energía suministrada al sistema es mucho mayor que el resultado óptimo esperado) por parte de los entes controladores (empresa eléctrica).
- Falta de incentivos por parte de los gobiernos para promover el uso de esta tecnología.
- Poca estandarización de los productos que componen esta tecnología a nivel mundial.
- Costo de los equipos necesarios para su implementación.
- Infraestructuras urbanas complejas.
- Falta de estratificación de grupos consumidores, para discriminar el cobro del recurso.
- Los gobiernos ven el manejo de los recursos renovables como un negocio lucrativo.
- Poco interés hacia las clases vulnerables.

Desde el punto de vista del control, la vivienda social sostenible debe compartir muchas de las características que posee el hogar inteligente, principalmente la capacidad de responder de manera adecuada a las diferentes perturbaciones (fluctuación eléctrica, variación de temperatura, variación de voltaje).

Un conjunto de viviendas sociales sostenibles que están conectadas a través del sistema nacional interconectado se comportan como un solo elemento, el cual debe

contar con mecanismos de control. Por esta razón, con lo que respecta al manejo de los datos provenientes de la instrumentación, se debe considerar lo siguiente:

- Alta cantidad de datos transmitidos por internet.
- Tiempo real de transmisión de datos.
- Control en tiempo real.
- Miles de conexiones enfocadas a un solo proceso.

### **2.1.1 CARACTERÍSTICAS DE UN HOGAR INTELIGENTE Y UNA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE**

Un hogar inteligente y una vivienda social sostenible comparten las siguientes características:

- Anticiparse a responder perturbaciones que se presenten en la red o en la propia vivienda (de forma autónoma).
- Participación activa de los consumidores en tiempo real. Lo que implica la adquisición de datos en tiempo real de la vivienda social sostenible que deben ser puestos a disposición de la empresa eléctrica.
- Presentar seguridades activas para impedir daños en la vivienda, causados por la administración de los recursos energéticos y en especial, en el manejo del hidrógeno.
- Vincular la generación distribuida y el almacenamiento de energía.
- Garantizar la calidad de servicio y la autonomía por largos períodos de tiempo.
- Creación de nuevos productos y servicios a partir de las viviendas sociales sostenibles.
- Adaptarse a los cambios climáticos presentados (no hace parte del estudio).

La tabla 1 muestra las diferencias de las redes eléctricas entre una vivienda tradicional y una vivienda inteligente.

Tabla 1  
*Vivienda tradicional vs. vivienda inteligente*

Vivienda tradicional	Vivienda inteligente
Generación centralizada de los recursos energéticos y disponibles en la vivienda.	Generación distribuida, puede usar tanto los que están disponibles, como aquellos que son propios de la vivienda.
Flujo energético sólo de consumo.	Flujo energético bidireccional.
Conexiones y controles de la empresa pública.	Cualquiera puede participar.
Manejo climático interior deficiente.	Controla la variación de temperatura y humedad dentro de la vivienda con el menor gasto energético posible y de manera óptima.

Fedit, 2011.

## 2.2 CONTEXTO ECUATORIANO

Según la Revista Líderes (2013), “la disponibilidad de una mayor capacidad de generación eléctrica en los próximos tres años vendrá acompañada por un significativo incremento de la demanda de energía en Ecuador. El Gobierno ha venido promoviendo la idea de que el país pasará a ser exportador de energía eléctrica debido a la entrada en operación de ocho centrales hidroeléctricas, Sopladora, Minas San Francisco, Toachi Pilatón, Delsintanisagua, Manduriacu, Quijos y Mazar Dudas. De acuerdo con datos publicados en el Plan Maestro de Electrificación 2013-2022 por el Consejo Nacional de Electricidad, el Ecuador pasará de un promedio de 5,5% en el incremento anual de la demanda de electricidad registrado entre el 2000 y el 2012, a tasas de crecimiento que llegarán hasta el 21,3% anual en 2017”. Como se muestra en la figura 1, en 2012, el Ecuador destinaba parte importante de su producción petrolera a la generación eléctrica.

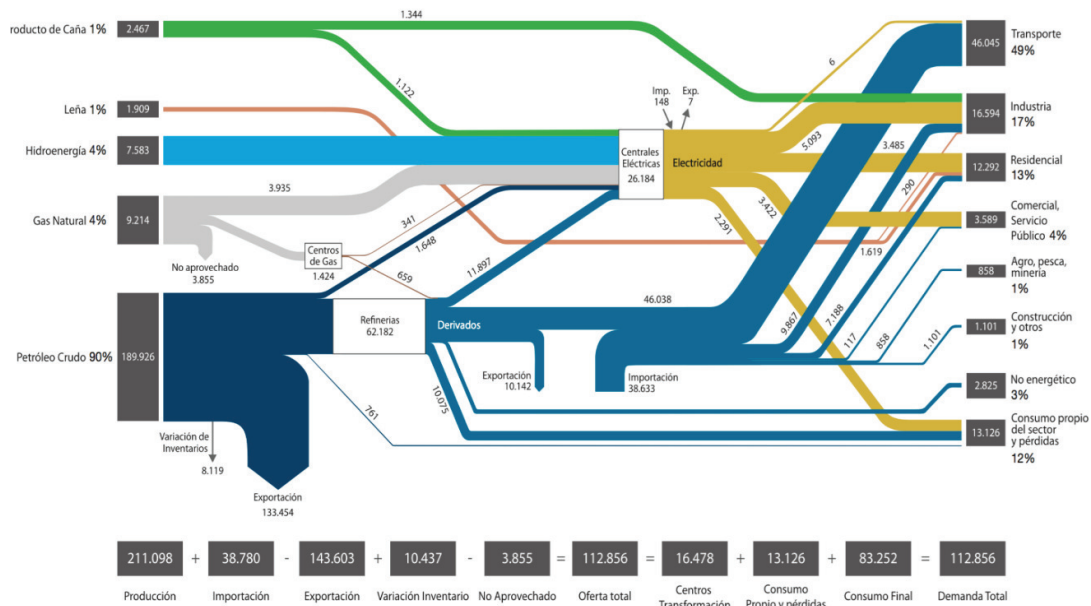


Figura 1. Flujo de energía en 2012. CELEC, 2014.

Hoy en día, hay países que están trabajando para promover el uso de nuevas tecnologías que permitan el uso eficiente de los recursos renovables, principalmente aquellos países industrializados en donde las políticas son implementadas con la finalidad de abaratar costos en producción y así evitar la implementación de subsidios. Un ejemplo muy claro es el incentivo tributario que implementó el gobierno alemán para aquellos ciudadanos que dispongan de sistemas fotovoltaicos. Para el verano 2016, este incentivo tuvo un impacto positivo, Alemania tuvo, por primera vez, el más alto rendimiento en todos los tiempos, aliviando los costos de producción y transporte.

El Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos (2013) dice que las energías primarias en el caso del Ecuador son:

- Energía solar
- Energía eólica
- Gas natural
- Biomasa (bagazo de caña)
- Hidroenergía
- Geoenergía (bajo investigación)

La mayoría de la electricidad es consumida por la industria (42%), seguido por el sector comercial (29%) y residencial (29%). El Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos (2013) muestra los usos de la energía en el Ecuador, figura 2. Además, indica que el único caso representativo de consumo eléctrico para el sector transporte es el trolebús de Quito.

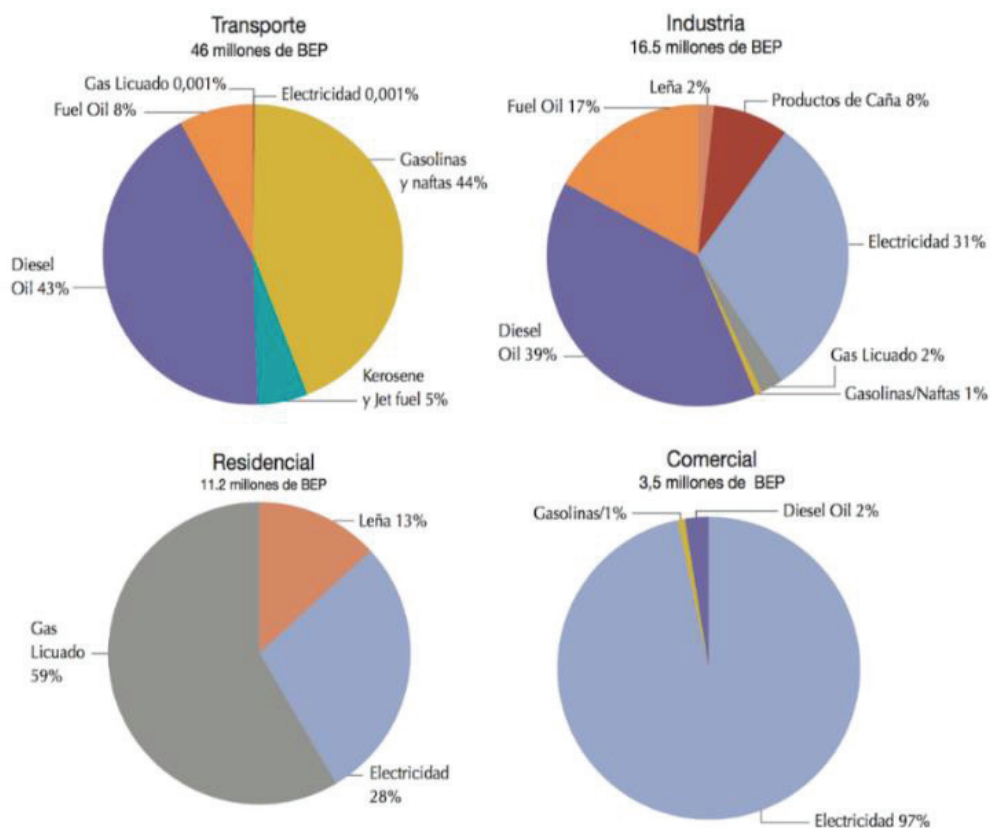


Figura 2. Usos de la energía producida en el Ecuador. CELEC, 2014.

La figura 3 también muestra de manera detallada el consumo de electricidad por sector en Ecuador.

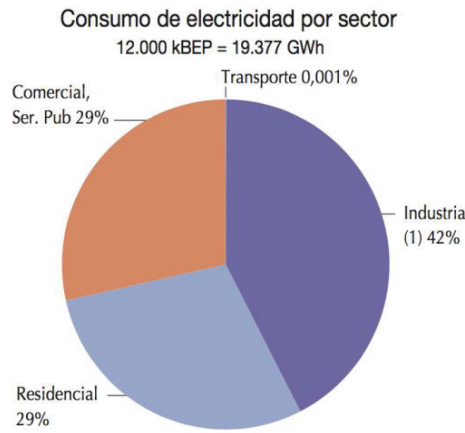


Figura 3. Consumo de electricidad por sector. CELEC, 2014.

“Para Ecuador, el sector energético tiene notable relevancia en el aspecto económico. Al 2012, el Producto Interno Bruto (PIB) petrolero representó el 10,7% (USD 6,8 mil millones) en relación al PIB total, la segunda participación más alta luego del sector manufacturero (11,6%)” (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2013).

Como es de notarse en las figuras anteriores, el sector residencial depende de un gran aporte energético eléctrico, siendo este sector junto al industrial, los principales consumidores de electricidad. Es aquí donde los sistemas autónomos juegan un papel importante dentro de la administración eléctrica.

### 2.2.1 IMPORTANCIA DE UNA VIVIENDA INTELIGENTE EN EL ECUADOR

En el país, es importante el desarrollo de una vivienda social sostenible principalmente en áreas remotas donde no hay redes eléctricas instaladas, por este motivo, brindar el servicio a dichas poblaciones debe ser imperativo.

Actualmente, el modelo de sostenibilidad del servicio eléctrico está subsidiado por el gobierno a través de las regalías generadas por el petróleo, por lo que el valor del servicio es realmente bajo en comparación con otros países. En el momento en

que el gobierno considere retirar los subsidios, el modelo planteado en este documento jugaría un papel importante para la reducción de costos del servicio, incluso masificándose a todos los niveles sociales.

## **2.2.2 PASOS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE UNA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE INTELIGENTE**

Para la implementación de una vivienda social sostenible en el Ecuador se debe considerar lo siguiente:

- Determinar los mejores componentes de generación eléctrica instalados en la vivienda social sostenible.
- Escoger el sistema de control para el manejo del flujo eléctrico.
- Garantizar el servicio eléctrico en todo momento.
- Evitar las fluctuaciones eléctricas.
- Monitoreo continuo y remoto de variables físicas.

## **2.2.3 LOGROS ALCANZADOS POR LAS VIVIENDAS INTELIGENTES**

- Maximización de la automatización.
- Mejoras en la eficiencia de la red.
- Reducción del impacto medioambiental del sistema eléctrico.

### **2.2.3.1 Puntos a vencer por las viviendas sociales sostenibles inteligentes**

Hoy en día, las viviendas inteligentes deben vencer puntos importantes, puesto que, la implementación de viviendas de estas características, se ve afectada por múltiples factores que impiden su realización. En Ecuador, el principal factor es el costo del kilovatio hora. Algunos puntos a considerar de manera general son:

- El control de la generación eléctrica es un negocio legalmente establecido con ánimos de lucro, son los emporios los que manejan y controlan el recurso.
- La generación, su principal objetivo es producir y vender toda la energía eléctrica posible.



- La transmisión, se preocupa sólomente de transportar.
- Cargas, requerimiento de energía dinámica y en todo momento.
- Vallas técnicas, como el manejo de alta información generada por la cantidad de elementos conectados a la red, que envían grandes cantidades de datos.
- Problemas de control asociados a sistemas descentralizados y capacidades de cómputo. Los sistemas convencionales manejan pocas conexiones entrantes.
- Los sistemas fotovoltaicos siguen siendo costosos de implementar y con una eficiencia relativamente baja.

En el capítulo cinco, se aborda el tema del control desde el punto de vista del manejo de datos asociados a la *Big Data* y a la cantidad de conexiones requeridas para manejar un conjunto de viviendas sostenibles como un solo elemento. La instrumentación implantada en los sistemas interconectados representa un problema mayor debido a la información que estas generan y la capacidad actual de cómputo.

## **CAPÍTULO 3**

### **RECURSOS ENERGÉTICOS DISPONIBLES PARA LA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE**

En este capítulo se hace una revisión de los recursos energéticos renovables disponibles en el país para posteriormente, describir los sistemas de energía renovable solar (fotovoltaico) eólico que conformarían la vivienda social sostenible y de esta manera, determinar las características geográficas de la ubicación de la vivienda social sostenible (VSS) y su consumo energético promedio. Luego, se hacen cálculos matemáticos para determinar el valor de los componentes propios de cada uno de los sistemas antes mencionados. Finalmente, se realiza el diseño del sistema de generación de energía por medio del hidrógeno y pilas de combustible, y la selección de baterías para el sistema de almacenamiento de energía.

#### **3.1 RECURSOS ENERGÉTICOS RENOVABLES DISPONIBLES EN ECUADOR**

El Ecuador es un país lleno de privilegios, cuenta con una gran cantidad de recursos energéticos renovables, una alta radiación solar durante gran parte del año, una cantidad importante de fuentes fluviales y vientos que son aprovechados para la generación eléctrica, siendo estos recursos la base para la producción de hidrógeno y, por consiguiente, de energía eléctrica; por tanto, existen las condiciones ideales para el desarrollo de este proyecto.

Actualmente en el país, se están impulsando proyectos de energía eólica en la provincia de Loja y Galápagos. En la provincia de Manabí existen planes a futuro para proyectos de energía solar con financiamiento del gobierno coreano. Ambas tecnologías son consideradas importantes dentro del territorio ecuatoriano por su disponibilidad y la alta radiación en el país.

## 3.2 SISTEMA DE GENERACIÓN FOTOVOLTAICO

### 3.2.1 SISTEMA FOTOVOLTAICO

Un sistema fotovoltaico es un grupo de células fotovoltaicas (paneles solares) que convierten la luz del sol en corriente directa de aproximadamente medio voltio. Un conjunto de células fotovoltaicas se conecta en paralelo para producir un voltaje específico.

Un sistema fotovoltaico autónomo consta de los siguientes componentes, regulador, inversor, banco de baterías y módulos fotovoltaicos, como se muestra en la figura 4.

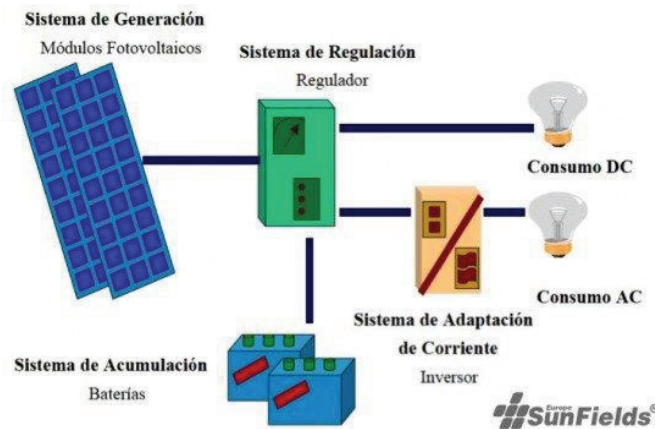


Figura 4. Esquema de un sistema fotovoltaico autónomo. SunFields, 2015.

#### 3.2.1.1 Módulos fotovoltaicos

Para sistemas aislados, los paneles con tecnología mono-cristalina y poli-cristalina son los más utilizados. Estos paneles pueden estar conectados en serie o en paralelo. Para uniones en serie y con configuraciones de 36 células fotovoltaicas, el voltaje rodea los 12 a 18 voltios.

### 3.2.1.2 Regulador

Controla la carga y descarga de las baterías. La intensidad máxima de entrada y salida del regulador dependerá de la corriente máxima que pueda producir el sistema de generación fotovoltaico.

Debido a los cambios picos de irradiación o de temperatura se recomienda seleccionar un regulador con 15 a 25 por ciento por encima de la corriente de cortocircuito ( $I_{\text{entrada}}$ ) o de carga de consumo del sistema ( $I_{\text{salida}}$ ). El regulador será aquel que soporte la mayor de las dos corrientes calculadas en todo el sistema.

### 3.2.1.3 Baterías

Se encargan de acumular la energía eléctrica generada por el sistema de generación fotovoltaico. Las baterías estacionarias de plomo ácido son las más usadas en este tipo de aplicaciones, estas baterías pueden permanecer largos períodos de tiempo cargadas y soportar descargas profundas esporádicamente.

Para definir el tamaño necesario de las baterías se debe tener en cuenta:

- La profundidad de descarga máxima. Es el nivel máximo de descarga de la batería antes de la desconexión del regulador. La descarga máxima para un ciclo diario (profundidad de descarga máxima diaria) gira en torno al 15-20%.
- En un ciclo estacional (número máximo de días que una batería está sin descargarse) la duración es alrededor de 4 a 10 días, con una profundidad de descarga del 70% aproximadamente.

### 3.2.1.4 Inversor u ondulator

Transforma la corriente continua procedente del regulador y baterías en corriente alterna para alimentar la carga de la vivienda. Para la selección del inversor, se considera la potencia que demanda la suma de todas las cargas AC (corriente alterna) en un instante de tiempo. De esta manera, el inversor debe superar el 20% de la demanda total de la carga.

### 3.2.2 CÁLCULO DE UNA INSTALACIÓN FOTOVOLTAICA AISLADA

Para el cálculo de los módulos fotovoltaicos se utiliza el concepto de “horas de sol pico” o HPS. Una hora pico de sol es un modo de contabilizar la energía recibida del sol agrupada en paquetes, donde cada paquete (1 hora) corresponde a 1000 watts/m<sup>2</sup>.

Para calcular el valor de la HPS se divide el valor de la irradiación incidente entre el valor de la potencia de irradiación en condiciones estándar de medida (STC). En dichas condiciones se cumplen las características eléctricas de los módulos fotovoltaicos. El valor de la hora solar pico (HPS) se determina mediante (1).

$$HPS = \frac{\text{irradiación en un día (Wh/m}^2\text{)}}{1000 \text{ Wh/m}^2} \quad (1)$$

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y el Atlas Solar del Ecuador han determinado que las provincias del norte y el oriente del país presentan una irradiación de 5500 Wh/m<sup>2</sup>, figura 5. Para realizar la conversión de irradiación a HPS se divide la irradiación del lugar específico entre 1000 Wh/m<sup>2</sup>. Como resultado de ello, se obtiene que la hora pico solar en Quito y Sucumbíos es de 5.5; hay que tomar en cuenta que este dato presenta un porcentaje de error y debido a esto, se deben buscar otras bases de datos actuales y con mayor afinación.

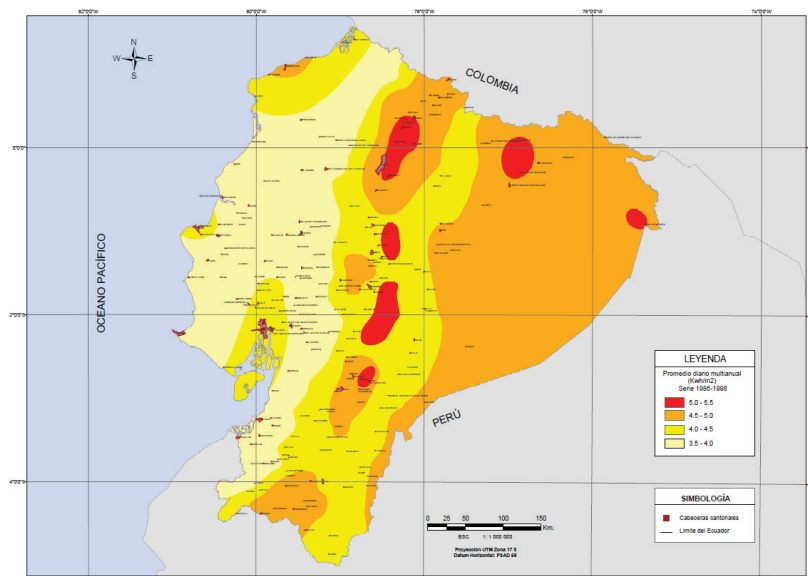


Figura 5. Irradiación solar para el Ecuador. Atlas del Ecuador, 2015.

Según datos de la Operadora Nacional de Electrificación (CENACE), la irradiación solar promedio para el Distrito Metropolitano de Quito es de 4.765 Wh/m<sup>2</sup> por día. En la tabla 2, se muestra este resultado, generado a partir de un estudio realizado en 2014 por el proyecto “Recurso Solar para la Generación de Energía, Análisis para el Distrito Metropolitano de Quito” (Joffre Constante 2014).

Tabla 2  
*Irradiación solar promedio para Quito*

MESES	CENACE [Wh/m2/día]	CONELC [Wh/m2/día]	MODELO N° 1	MODELO N° 2	MODELO N° 3	MODELO N° 4
Enero	4 738	5 013	4 838	----	4 741	4 698
Febrero	3 390	5 013	4 991	----	4 614	4 948
Marzo	5 462	5 013	5 036	----	4 420	5 172
Abril	4 364	4 838	4 876	----	4 210	4 922
Mayo		4 663	4 609	----	4 040	4 685
Junio	4 805	4 838	4 439	----	3 956	4 570
Julio	4 805	5 013	4 494	----	3 981	4 845
Agosto	5 309	5 363	4 722	----	4 107	5 061
Septiembre	5 368	5 538	4 937	----	4 301	4 848
Octubre	4 480	5 013	4 980	----	4 511	4 813
Noviembre	4 255	5 275	4 869	----	4 680	4 890
Diciembre	4 330	5 363	4 771	----	4 764	4 525
PROMEDIO	4 765	5 078	4 797	----	4 360	4 831
ERROR	0.0 %	6.2 %	0.7 %	----	-9.3 %	1.4 %

Nota: Recuperado de Recurso Solar para la Generación de Energía, Análisis para el Distrito Metropolitano de Quito, 2014.

### 3.2.2.1 Estimación del consumo o la carga energética

Para la estimación del consumo energético de la vivienda social sostenible se escoge el valor medio del consumo anual de una vivienda regular, para ello, se realiza un análisis de consumo de energía de todos los elementos que consumen electricidad en el hogar. Según la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) la potencia real de los equipos está dada por (2):

$$Potencia\ real = potencia\ de\ placa \times factor\ de\ corrección \quad (2)$$

En la tabla 3 se muestran los factores de corrección (Fc) de los aparatos electrónicos necesarios en una vivienda social sostenible.

Tabla 3  
*Factor de corrección*

Ítem	Equipo	Fc
1	Bombilla fluorescente	0,89
2	Refrigerador	0,18
3	Plancha	0,32
4	Televisor	0,55
5	Computadora	0,35
6	Estufa	0,42
7	Ventilador	0,82

OLADE

Cabe mencionar, que la vivienda social sostenible estará dirigida a un hogar de 4 personas, que es el promedio total de personas por hogar en Ecuador, INEC (2010), este punto se explicará más detalladamente en el capítulo siguiente.

La tabla 4 muestra el cálculo de consumo de energía eléctrica en una vivienda regular en el Ecuador y corresponde a un sistema de carga completa donde todos los elementos se encuentran conectados y encendidos al mismo tiempo, a una hora determinada.

Tabla 4  
*Consumos de energía eléctrica en una vivienda regular*

Equipo	Cant	Potencia de la placa (w)	Horas de uso por día							FC	Consumo diario (kWh/día)	Consumo calculado (kWh/mes)	Margen de seguridad (20%)
			L	M	M	J	V	S	D				
Estufa	1	4000	2	2	2	2	2	2	2	0,42	4,03	108,8	121
Plancha	1	1200	1	1	1	1	1	1	1	0,32	0,13	3,3	3,9
Televisor	1	250	5	5	5	5	5	5	5	0,55	0,83	20,6	24,8
Computador	1	350	4	4	4	4	4	4	4	0,35	0,59	14,7	17,6
Ventilador	1	350	1	1	1	1	1	1	1	0,82	0,34	8,6	10,3
Refrigerador	1	350	12	12	12	12	12	12	12	0,18	0,91	22,7	27,2
Bombillas fluorescentes (DC)	5	20	6	6	6	6	6	5	5	0,89	0,61	15,3	18,3
<b>Potencia acumulada</b>		<b>6600</b>								<b>Total</b>	<b>7,44</b>	<b>186</b>	<b>223,2</b>

La demanda máxima de potencia simultánea sería de 7,44 kWh/día que podría demandarse en el momento en que todos los receptores estuviesen conectados.

### 3.3 ANÁLISIS ENERGÉTICO REQUERIDO PARA LA VIVIENDA

A partir de la tabla 4, se obtiene el consumo medio diario de energía en una vivienda, a este consumo se le aplica un factor de seguridad<sup>1</sup> del 20%, pues se deben tener en cuenta las pérdidas del convertidor y de las baterías. El rendimiento de la batería es de un 95%, del inversor de un 90%, y de los conductores de un 100%.

El cálculo de consumo de energía diario está dado por (3).

$$L_{md} = \frac{L_{md,DC} + \frac{L_{md,AC}}{\eta_{inv}}}{\eta_{bat} * \eta_{con}} \quad (3)$$

Donde:

$L_{md}$  = consumo medio de energía diario

$L_{md,DC}$  = consumo medio de energía diario de las cargas en corriente continua (610Wh/día proveniente de los bombillos fluorescentes)

$L_{md,AC}$  = consumo medio de energía diario de las cargas en corriente alterna (6830Wh/día proveniente de los electrodomésticos de la vivienda)

$$L_{md} = \frac{610 + \frac{6830}{0,9}}{0,95 * 1} = 8630,4 \frac{Wh}{día} \quad ; \quad 8,63 kWh/día$$

Entonces, la energía requerida para la vivienda es de 8.63 kWh/día.

La ecuación (4) permite calcular el consumo de energía medio diario ( $Q_{Ah}$ ).

$$Q_{Ah} = \frac{L_{md}}{V_{bat}} \quad (4)$$

$$Q_{Ah} = \frac{8630,4}{24} = 359,6 Ah/día$$

Por tanto, la vivienda necesita 360 Ah diarios.

Para determinar el consumo total anual ( $L_T$ ) y el consumo promedio anual ( $L_{ma}$ ), se utilizan (5) y (6).

$$L_T = L_{md} * 365 \quad (5)$$

---

<sup>1</sup> Un factor de seguridad es un margen de sobredimensionamiento de la carga energética del sistema. Es 20% debido a la Norma del Atlas Solar del Ecuador.



$$L_T = 8630,4 * 365 = 3000701 \frac{Wh}{año} ; 3000 kW/año$$

$$L_{ma} = \frac{L_T}{365} \quad (6)$$

$$L_{manual} = \frac{3000701}{365} = 8630,4 \frac{Wh}{año} \text{ promedio diario anual}$$

### 3.3.1.1 Cálculo del número de módulos fotovoltaicos

Para determinar el número de paneles solares del sistema se emplean los datos de la radiación solar. Para este cálculo, se utilizarán datos del Atlas Solar. Hay que considerar que mientras mayor potencia entrega el panel fotovoltaico, es menor el número de paneles a usar.

Primero se determina la corriente que genera un solo módulo fotovoltaico en un día y se utiliza (7)

$$I_{FV/dia} = HPS \times I_{MOD,SD} \quad (7)$$

$$I_{FV/dia} = 4.765 \times 5.3A = 25.25 Ah/dia$$

En la ecuación (4), se obtuvo que el consumo es de 359.6 Ah/día y para determinar el número de módulos fotovoltaicos, se divide el consumo diario entre la producción diaria del panel y se obtiene (8)

$$\# \text{ Paneles FV} = \frac{Q_{Ah}}{I_{FV/dia}}$$

$$\# \text{ Paneles FV} = \frac{359.6 \frac{Ah}{dia}}{25.25 \frac{Ah}{dia}} = 14.25 \quad (8)$$

En consecuencia, se necesitarán 15 paneles para el arreglo fotovoltaico. Pero, para garantizar la potencia necesaria del sistema, se toma la decisión de instalar 16 paneles, como se indica en la figura 6.

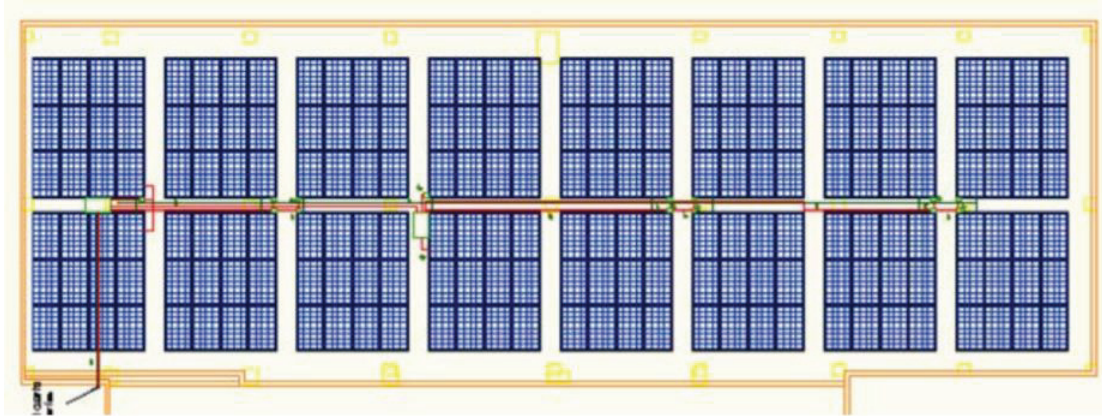


Figura 6. Arreglo fotovoltaico. CENACE, 2013.

### 3.3.1.2 Conexión de módulos en serie o paralelo

En promedio, los módulos fotovoltaicos comerciales poseen un voltaje máximo ( $v_{max}$ ) de 36,55 voltios.

### 3.3.1.3 Tipo de conexión serie o paralelo

La instalación en serie se define mediante (9) y la instalación en paralelo, por (10)

$$N_{serie} = \frac{V_{bat}}{V_{MOD,MPP}} \quad (9)$$

$$N_{serie} = \frac{24}{36,55} = 1$$

$$N_{paralelo} = \frac{N_T}{N_{serie}} \quad (10)$$

$$N_{paralelo} = \frac{15}{1} = 15$$

### 3.3.1.4 Cálculo de baterías para el sistema

Para el dimensionado de la batería, son importantes los parámetros de máxima profundidad de descarga (estacional y diaria) y el número de días de autonomía, dados por (11) y (12).

$$P_{Dmax,e} = 70\% = 0,7 \quad (11)$$

$$P_{Dmax,d} = 15\% = 0,15 \quad (12)$$

$$N= 3$$

Donde:

$P_{Dmax,e}$  = profundidad de descarga máxima estacional

$P_{Dmax,d}$  = profundidad de descarga máxima diaria

$N$  = número de días de autonomía

La capacidad nominal de la batería en función de la descarga máxima diaria ( $C_{nd}$ ) viene dada por (13).

$$C_{nd}(Wh) = \frac{L_{md}}{P_{Dmax,d} * F_{CT}} \quad (132)$$

$$C_{nd}(Wh) = \frac{8630,4}{0,15*1} = 57536 Wh; \quad 57.54 kWh$$

La capacidad nominal de las baterías  $C_{nd}$  (Wh), se determina mediante la ecuación anterior, dividiendo la energía diaria requerida  $L_{md}$  para un 15% de descarga máxima diaria y un factor de corrección de temperatura  $F_{CT}=1$ .

Una vez determinada la capacidad nominal de las baterías  $C_{nd}$  (Wh), se divide para la tensión de la batería 24V. Lo que determina la capacidad mínima  $C_{nd}(Ah)$  para el sistema de acumulación de energía en función de la descarga máxima diaria, ver (14).

$$C_{nd}(Ah) = \frac{C_{nd}(Wh)}{V_{Bat}} \quad (14)$$

$$C_{nd}(Ah) = \frac{57536}{24}$$

$$C_{nd}(Ah) = 2397.33 Ah$$

La capacidad nominal de las baterías en función de la descarga máxima estacional  $C_{ne}(Wh)$  se calcula a partir de (15) y (16).

$$Q_{ne}(Wh) = \frac{L_{md} * N}{P_{Dmax,e} * F_{CT}} \quad (35)$$

$$C_{ne}(Wh) = \frac{8630,4 * 3}{0,6 * 1}$$

$$C_{ne}(Wh) = 43152 Wh$$

$$C_{ne}(Ah) = \frac{C_{ne}(Wh)}{V_{Bat}} \quad (46)$$

$$C_{ne}(Ah) = \frac{43152}{24}$$

$$C_{nd}(Ah) = 1798 Ah$$

Por tanto, la capacidad nominal de las baterías debe ser como mínimo  $C_{100} = 1800$  Ah o superior. Para determinar el número de baterías necesarias se realiza la división entre la capacidad nominal que requiere el sistema  $C_{nd}(Ah)$  para la capacidad de la batería, que es 125 Ah (12 V), según catalogo VMAXTANKS, baterías para aplicaciones fotovoltaicas.

$$\# \text{ baterías} = \frac{1798 Ah}{125 Ah} = 14.4$$

Entonces se requieren 15 baterías conectadas en paralelo y dos ramales de 15 baterías cada uno para obtener un voltaje de 24 voltios. En total, se necesitan 30 baterías conectadas en serie y en paralelo.

### 3.3.1.5 Cálculo del regulador

Para el cálculo de regulador se determina la máxima corriente que debe soportar el regulador, tanto en la entrada, como en la salida. Este cálculo se obtiene de (17).

$$I_{in/out} = 1.25 * I_{MOD,SD} * N_p \quad (17)$$

$$I_{in/out} = 1.25 * 5.30 * 15 = 95,4A \text{ max}$$

Donde:

$I_{MOD,SD}$  = corriente unitaria del módulo fotovoltaico en condiciones de cortocircuito, en este caso es de  $I_{sc} = 5,30$  amperios según el promedio de los equipos comerciales

$N_p$  = número de ramas en paralelo

1,25 = factor de seguridad

Un regulador de carga es un componente esencial del equipo, ya que regula el voltaje generado por el sistema y es imprescindible para un mantenimiento correcto de las baterías. Impide que la carga de las baterías sea demasiado elevada o demasiado baja y garantiza la máxima duración de las mismas.

Para la intensidad de 95.4 A el conductor que se necesita es un AWG 6 para el caso en el conductor esté conectado por aire, y AWG 4 cuando el conductor se dirija por medio de ductos, como se indica en la tabla 5.

Tabla 5  
Datos técnicos THW – 90 (AWG/MCM)

CALIBRE CONDUCTOR	SECCION NOMINAL	NUMERO HILOS	DIAMETRO HILO	DIAMETRO CONDUCTOR	ESPESOR AISLAMIENTO	DIAMETRO EXTERIOR	PESO	AMPERAJE (*)	
								AIRE	DUCTO
AWG/MCM	mm <sup>2</sup>		mm	mm	mm	mm	Kg/Km	A	A
14	2.1	7	0.60	1.75	0.8	3.4	28	35	25
12	3.3	7	0.76	2.20	0.8	3.8	40	40	30
10	5.3	7	0.96	2.78	0.8	4.4	59	56	40
8	8.4	7	1.20	3.61	1.1	5.9	98	80	56
6	13.3	7	1.53	4.60	1.5	7.6	161	107	75
4	21.1	7	1.93	5.80	1.5	8.9	240	141	96
2	33.6	7	2.44	7.31	1.5	10.4	363	192	130
1/0	53.4	19	1.87	8.58	2	12.7	570	260	170
2/0	67.4	19	2.10	9.64	2	13.8	704	300	197
3/0	85.1	19	2.35	10.82	2	15	871	350	226
4/0	107.2	19	2.64	12.15	2.4	17.1	1109	406	260
250	126.7	37	2.06	13.25	2.4	18.2	1289	457	290
300	151.9	37	2.25	14.51	2.4	19.5	1527	505	321
350	177.5	37	2.44	15.69	2.4	20.6	1769	569	350
500	253.1	37	2.91	18.73	2.8	24.5	2512	699	429

(\*) NO MAS DE TRES CONDUCTORES POR DUCTO / TEMPERATURA AMBIENTE 30°C.

Nota: Recuperado de INDECO S.A. THW-90 450/750 V.

### 3.3.1.6 Cálculo del inversor

Para el cálculo del inversor, se considera (18), tomándose en cuenta las potencias de carga en corriente alterna  $P_{AC}$ .

$$I_{inv} = 1.2 * P_{AC} \quad (18)$$

$$I_{inv} = 1.2 * 6580$$

$$I_{inv} = 7896 \text{ kW } \textit{aprox.}$$

Para determinar el inversor adecuado se presentan dos opciones: inversores de onda senoidal pura (PWM) y de onda senoidal modificada (MSW). Los inversores PWM presentan mejores características debido a que imitan la forma de onda de la red eléctrica y, en consecuencia, es la mejor opción para alimentar los equipos eléctricos y electrónicos.

Para el caso de los inversores de onda modificada (MSW), éstos presentan problemas con los motores debido a las cargas inductivas.

Los equipos tomados en cuenta para la configuración del arreglo fotovoltaico, tabla 6, se los encuentra en el mercado ecuatoriano, y fueron tomados con referencia a la proforma de la empresa “Soluciones Técnicas Integrales EnerPro Cía. Ltda” No. S141014\_1, que se encuentra con más detalle en el anexo 2.

Tabla 6  
*Descripción de equipos fotovoltaicos EnerPro Cía. Ltda.*

Ítem	Descripción
1	Panel fotovoltaico de 250 Wp 24 Vdc Perlight IEC61215, 25 años de vida útil
2	Inversor SMA TL 10 10 kW USA
3	Batería MCA/TOYAMA, NP1500 AGM libre de mantenimiento, 800 Ah 2 Vdc, estacionaria
4	Estructura de soporte de paneles fotovoltaicos
5	Kit de instalación, cables, tableros, tubería Global
6	Monitoreo SFV con el SMA Webbox

EnerPro Cía. Ltda.

### 3.4 SISTEMA DE GENERACIÓN EÓLICO

#### 3.4.1 SISTEMA EÓLICO

El viento o flujo de masa de aire puede aprovecharse para la generación de energía porque contiene energía cinética. Los aerogeneradores son máquinas que permiten transformar la energía cinética en mecánica y mediante un generador, en energía eléctrica. Para determinar la energía generada a partir de este recurso renovable, se debe realizar el procedimiento indicado en el Atlas Eólico del Ecuador.

### 3.4.2 ENERGÍA DEL VIENTO

Para el cálculo de la energía del viento se considera el flujo que atraviesa un disco por unidad de tiempo ( $dm/dt$ ), como sigue según (19).

$$\frac{dm}{dt} = \frac{d(\rho.V)}{dt} \quad (19)$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot \frac{dx}{dt}$$

$$\frac{dm}{dt} = \rho \cdot A \cdot U$$

Donde:

$\rho$  = densidad del aire

$A$  = área de la sección transversal del disco (no varía con el tiempo)

$U$  = velocidad del viento

La potencia o energía cinética por unidad se rige por (20).

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{1}{2} m v^2 \right) \quad (20)$$

$$P = \frac{1}{2} U^2 \frac{d}{dt}$$

Donde:

$P$  = potencia del viento

$v^2$  = velocidad del viento al cuadrado

Sustituyendo  $dm/dt$  en la ecuación anterior, se obtiene (21).

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (21)$$

Despejando la ecuación anterior se obtiene (22).

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \quad (22)$$

De esta ecuación se concluye lo siguiente:

- La densidad de potencia es proporcional a la densidad del aire.
- La potencia del viento es proporcional al área barrida por el rotor (o el cuadrado de su diámetro en una máquina convencional)
- La densidad de potencia es proporcional al cubo de la velocidad del viento

En la tabla 7 se muestra cómo varía la altitud, la temperatura, la presión y la densidad en una atmósfera estándar.

Tabla 7  
*Variación de la densidad del aire, temperatura y presión con la altitud en una atmósfera estándar*

Altitud (m)	Presión (hPa)	Densidad (kg/m <sup>3</sup> )
0	1013.2	1.225
100	1001.3	1.213
200	989.5	1.202
500	954.6	1.167
1000	898.7	1.112
2000	794.9	1.007
2850	717.7	0.909
3000	701.1	0.909

Atlas Eólico del Ecuador

### 3.4.3 PERFIL VERTICAL DEL VIENTO

Por perfil vertical de viento se entiende la variación de la velocidad del viento horizontal con la altura sobre el suelo. Este es un parámetro importante en la caracterización del recurso eólico en los primeros metros de la atmósfera, y depende de la estabilidad atmosférica, la rugosidad del terreno y la orografía. Atlas Eólico (2011). El perfil vertical se determina mediante (23).

$$v_2 = v_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)} \quad (23)$$



Donde:

$v_1$  = es la velocidad del viento a la altura  $h_1$

$v_2$  = es la velocidad del viento a la altura  $h_2$

$z_0$  = es la longitud de rugosidad (o rugosidad del terreno)

El parámetro de rugosidad varía con el tipo de suelo, y refleja el hecho experimental de la disminución de la velocidad horizontal del viento a medida que se aproxima a la superficie. En la tabla 8 se muestran los valores de longitud de rugosidad.

Tabla 8  
*Clases y longitudes de rugosidad*

Tipo de Rugosidad	Longitud de rugosidad $z_0$ (m)	Usos del suelo
0	0.0002	Superficie del agua en calma.
0.5	0.0024	Terreno abierto con superficie lisa: pistas de hormigón en los aeropuertos, césped cortado, etc.
1	0.03	Área agrícola abierta sin cercados y con edificios muy dispersos.
1.5	0.055	Terreno agrícola con algunas casas y cercados de hasta 8 m de altura y separados por más de 1 km.
2	0.1	Terreno agrícola con algunas casas y cercados de hasta 8 m de altura, separados por aproximadamente 500 m.
2.5	0.2	Terreno agrícola con varios árboles, arbustos y plantas, o cercados de hasta 8 m de altura y separados por aproximadamente 250 m.
3	0.4	Ciudades, villas, terreno agrícola con muchos cercados o muy altos, bosques.
3.5	0.6	Grandes ciudades con edificios altos.
4	1.6	Ciudades muy grandes con edificios altos y rascacielos.

### 3.4.4 POTENCIA DEL AEROGENERADOR

Para determinar la potencia del viento entregada a través de un aerogenerador se utiliza la ley de Benz (1919). Benz determinó la eficiencia en la conversión de la energía del viento en energía mecánica mediante (24).

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho \cdot U^2 \quad (24)$$

$$\frac{P}{P_o} = \frac{1}{2} \left( 1 - \left( \frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \left( 1 + \frac{v_2}{v_1} \right)$$

Con esta función se determina que se puede llegar a la potencia cuando la relación entre  $(v_2/v_1)$  es  $1/3$ . Y que, la potencia máxima que se puede extraer del viento es 0.59, como se indica en la figura 7.

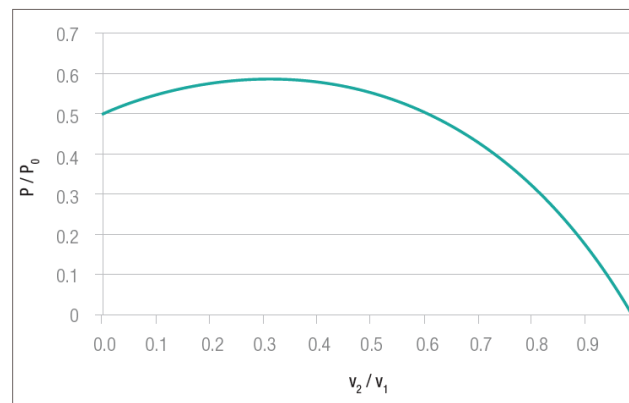


Figura 7. Energía extraíble del viento, según la Ley de Betz. Atlas Eólico, 2011

### 3.4.5 DISTRIBUCIÓN DE WEIBULL

Es una distribución de frecuencias de una serie de viento (proporción relativa de los diferentes rangos de velocidades) que se puede ajustar a una distribución de densidad de probabilidad de uno o dos parámetros. La función de densidad de probabilidad de Weibull es la más utilizada para la representación de una serie de viento, cuya expresión se define con (25).

$$p(U) = \left(\frac{k}{c}\right) \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (25)$$

Donde:

$k, c$  = parámetros de caracterización de una serie u otra

$C$  = altura de la distribución

$k$  = anchura de la distribución

### 3.4.6 CÁLCULO SIMPLIFICADO DE POTENCIA

Para determinar la potencia extraíble del viento se utiliza la curva de potencia del generador eólico. “Los aerogeneradores no se caracterizan por una única curva de potencia, sino por una familia de curvas, puesto que la potencia extraíble del viento, no depende únicamente de la velocidad del viento, sino también de la densidad del aire” (Atlas Eólico).

La potencia promedio generada por un aerogenerador viene dada por (26).

$$\overline{Pot} = \int_0^{\infty} \rho(U) \cdot W(U) \cdot dU \quad (26)$$

Donde:

$\rho(U)$  = densidad a la altura del buje

$W(U)$  = curva de potencia en función de la velocidad

### 3.4.7 CÁLCULO DE LA POTENCIA DE UN AEROGENERADOR

Como la potencia depende de la velocidad del viento, se determina el promedio de velocidad de viento para un sector específico, y las condiciones geográficas del mismo, para este caso la zona geográfica es Quito. La velocidad promedio del viento es 5.2 m/s como se indica en la tabla 9.

Tabla 9  
*Velocidad del viento para Quito*

MES	EVAPORACION (mm)			NUBOSIDAD MEDIA (Octas)	VELOCIDAD MEDIA Y FRECUENCIAS DE VIENTO																Vel. Mayor Observada		VELOCIDAD MEDIA (Km/h)				
	Suma Mensual	Máxima en 24hrs	dia		N	NE	E	SE	S	SW	W	NW	CALMA	Nro OBS	(m/s)	DIR											
ENERO	119.2	5.1	27		5.0	4	6.3	24	6.4	23	5.0	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	49	84	13.0	NE	4.9
FEBRERO	135.5	5.5	13		4.0	2	4.2	16	6.9	30	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	52	93	15.0	E	5.0
MARZO	115.5	5.0	20		0.0	0	4.2	12	4.2	12	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	76	90	8.0	E	3.7
ABRIL	132.0	5.0	9		0.0	0	5.2	10	5.0	27	4.7	3	2.0	1	0.0	0	2.0	1	0.0	0	0.0	0	58	93	10.0	E	4.5
MAYO	128.5	6.1	19		5.0	1	4.4	11	5.8	33	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	54	90	9.0	E	4.3
JUNIO	131.2	5.2	19		2.0	1	4.3	7	3.9	26	4.0	1	2.0	1	0.0	0	2.0	1	0.0	0	0.0	0	63	93	8.0	E	5.3
JULIO	135.3	5.9	1		5.3	4	5.2	7	4.6	31	4.7	3	1.0	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	54	93	10.0	N	5.2
AGOSTO	125.9	5.0	12		0.0	0	4.3	3	4.3	30	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	67	90	10.0	E	5.0
SEPTIEMBRE	127.5	5.0	13		0.0	0	7.0	2	5.1	20	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	77	93	10.0	E	4.0
OCTUBRE	113.4	5.0	3		0.0	0	0.0	0	3.8	6	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	94	90	5.0	E	3.0
NOVIEMBRE	112.2				0.0	0	3.0	2	4.7	14	3.0	1	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	0.0	0	83	93	6.0	E	3.2
VALOR ANUAL																											

Nota: Recuperado de Exa - División de Ciencias Planetarias, 2014.

Los parámetros a utilizar se eligen de las tablas 7 y 8 como sugiere el Atlas Eólico del Ecuador acorde a la ubicación del sistema.

La tabla 10 indica los parámetros utilizados para el cálculo de la potencia, tanto para determinar la potencia del aerogenerador de forma simplificada (Atlas Eólico), como para introducir estos datos en HOMER *Energy*.

Tabla 10  
*Parámetros para cálculo de potencia*

Parámetro	Valor
K	2
C	7.5 m/s
h <sub>1</sub>	2850
Vel. prom.	4.45 m/s
h <sub>2</sub>	20
Densidad kg/m <sup>3</sup>	0,909
A o D <sup>2</sup> (D es diámetro)	1.2 <sup>2</sup>

Para determinar la potencia del generador se selecciona un aerogenerador con las siguientes especificaciones y cuya curva de potencia se representa en la figura 8.

ESPECIFICACIONES:

- Potencia nominal: 1500W
- Velocidad nominal: 8 m/s
- Sistema de voltaje: 24V

- Corte en la velocidad del viento: 2.22 m/s (5.6 mph)
- Capacidad de la batería sugerida: 200A
- Número de palas: 3
- Diámetro del rotor: 1.4 m
- Peso ligero: 33 libras.

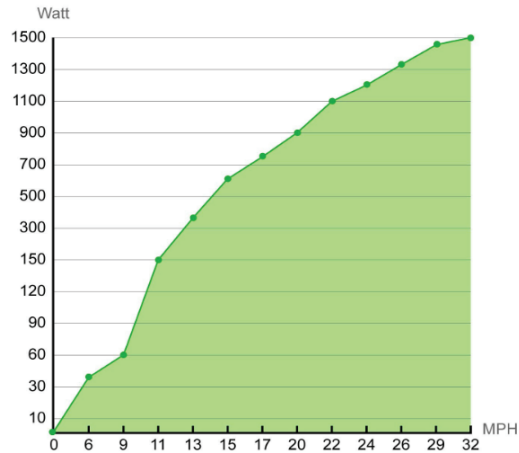


Figura 8. Energía extraíble del viento, según  
*Windwil*, 2016

La potencia (estimada) del aerogenerador de forma simplificada se calcula con (27).

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot D^2 \cdot v^3 \quad (27)$$

$$P_0 = \frac{1}{2} \left( \frac{0.909 \text{ kg}}{\text{m}^3} \right) \cdot (1.7 \text{ m})^2 \cdot \left( \frac{4.45 \text{ m}}{\text{s}} \right)^3 = 115.75 \text{ W}$$

Como indica el Atlas Eólico, sólo se puede extraer 1/3 de la potencia estimada y dividimos para 3.

$$P_{aerogen} = \frac{P_0}{3} = \frac{115.75}{3} = 38.6 \text{ W}$$

Si se multiplica por 24 horas al día se obtiene:

$$P_{aerogen} = 38.6 * 24 \text{ horas} = 946 \frac{\text{W}}{\text{dia}}$$

### 3.4.8 COSTOS DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA

Para estimar los costos del sistema renovable se utiliza como base la proforma por EnePro Cia. Ltda, los costos de observan en la tabla 11. Y en la tabla 12, se aprecia el costo de baterías para sistemas fotovoltaicos y eólicos.

Tabla 11

#### *Costo del sistema fotovoltaico*

Descripción	Unidad	Cantidad	Costos USD	Costo total USD
Paneles, 250 W, 24W, IEC61215	U	16	275	4400
Inversor 8 kW (o 2x4Kw)	U	1	7500	7500
Estructura soporte PV	U	1	1000	500
Kit de instalación	Global	1	1500	1000
Monitoreo y control	U	1	900	900
Mano de obra	Global	1	3000	2500
			<b>Sub Total</b>	<b>16800</b>
			<b>Costos indirectos</b>	<b>2520</b>
			<b>Total</b>	<b>19320</b>

Tabla 12

#### *Costo de baterías para sistemas fotovoltaicos y eólicos*

Descripción	Unidad	Cantidad	Costos (USD)	Costo total(USD)
Batería, VMAX SLR125 AGM, ciclo 12V, 125 Ah. Para aplicaciones FV y autogeneración	U	30	337,5	10125
VMAX TANKS,2016				

En la tabla 13 observa el costo total de sistema.

Tabla 13  
*Costo total de sistema*

Sistema	Energía Wh/día	Potencia kW	Costos USD	Vida útil Años
Consumo	8630,4			25
Aerogenerador	926	1.5	2400	25
Fotovoltaico	8630,4	4.0	19230	25
Baterías	43152 W	1798 A	10125	10
		<b>Costo</b>	<b>31845</b>	

El costo del sistema de generación de energía renovable es aproximadamente de \$31845, se tiene que tomar en cuenta que los costos son aproximados y no se toma en cuenta el 14% de IVA.

### **3.5 DISEÑO DEL SISTEMA DE GENERACIÓN DE ENERGÍA POR MEDIO DEL HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE**

El sistema *Busters de HHO*, posee un gran parecido al sistema de pilas de combustible, pero tiene una particularidad, consta de dos salidas independientes, una para la generación del hidrógeno y otra para el oxígeno. Luego, pasa por un proceso de compresión por medio de un dispositivo electroquímico, lo que eleva la presión en una sola etapa. Los gases producto del electrólisis son almacenados en los tanques de hidruros metálicos (para el H<sub>2</sub>) y el tanque convencional para el O<sub>2</sub>.

#### **3.5.1 ELECTROLIZADOR**

Un electrolizador está formado por un grupo de celdas electrolíticas tubulares. Cada una tiene un electrolito positivo o ánodo y un negativo o cátodo. A continuación, en la figura 9 se muestra un esquema simplificado de un electrolizador simple conformado por un ánodo, un cátodo y la fuente de energía (paneles solares o generador eólico).

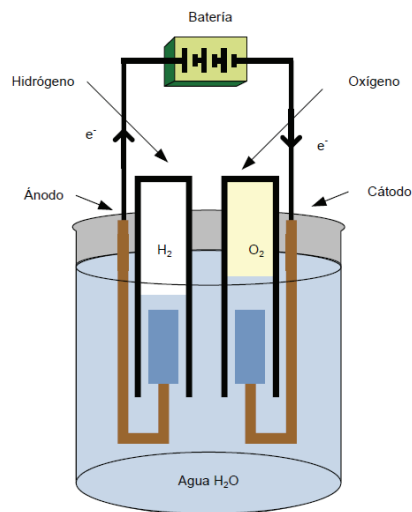


Figura 9. Proceso de electrólisis básica. San Valero, 2012

En este proceso, los aniones van dirección al ánodo o electrodo positivo, donde ceden o comparten sus electrones dando lugar a la oxidación (reacción). Los cationes se dirigen hacia el electrodo negativo o cátodo donde recoge electrones y da lugar a la reducción. Para un mejor rendimiento, el agua tiene que ser sustituida por un electrolito con mayor conductividad. En la tabla 14 se muestran los electrolizadores que existen en el mercado.

Tabla 14  
*Tipos de electrolizadores*

Tipo	Característica	Potencia
Alcalinos	Disolución acuosa de hidróxido de potasio(KOH)	Baja(20kW), media(90kW) altas(100kW)
Poliméricos	El electrolito es una membrana iónica conductora que permite el paso de protones desde el ánodo al cátodo	Potencias no mayores a 100 kW
Óxidos sólidos	Catalizadores sólidos que reaccionan a altas temperaturas y presenta eficiencias mayores al 80%	Potencias mayores a 100 kW

Debido al coste y a la baja potencia que maneja el sistema, se eligen los electrolizadores del tipo alcalinos con potencias menores a los 20 kW.



### 3.5.1.1 Electrolizador alcalino

Los electrolizadores alcalinos utilizan hidróxido de potasio (KOH) como electrolito para llevar la conductividad del agua. Pueden ser de dos tipos: unipolares o bipolares. En el electrolizador unipolar los electrodos están conectados en paralelo y en el electrolizador bipolar los electrodos están conectados en serie y son mucho más compactos.

### 3.5.1.2 Materiales empleados

Según la Revista VIRTUALPRO (2015), los electrodos (ánodos y cátodos) están basados en aleaciones de níquel. Teniendo en cuenta su estructura amorfa y cristalina, estos pueden presentar alta actividad catalítica en la reacción catódica de electrólisis del agua. Cabe destacar que, en general, se ha observado una menor actividad catalítica en metales y aleaciones amorfas, éstas usualmente requieren un pretratamiento in situ para formar las especies superficiales necesarias en un electro-catalizador activo.

La actividad catalítica de los materiales basados en níquel aumenta cuando se dopan con otro metal de transición como Cr, Ti, Sn, Mo, Pb, Tl y Cd. Las aleaciones Ni-Mo presentan mejores resultados, pero su costo es mayor en relación a los demás.

Por lo general, el cátodo está hecho de níquel y recubierto con platino u otro catalizador de similares características, esto para mejorar la reacción en el proceso de electrolización.

El ánodo, que sería de cobre o níquel, estará revestido de óxido metálico como manganeso o tungsteno. El electrolito debe estar concentrado en un 30% con el agua. En la figura 10 se muestra el esquema de funcionamiento de un electrolizador convencional.

Las densidades de corriente soportadas varían dependiendo de la concentración y del tipo de la membrana que se utilice. Puede variar desde los 100 mA/cm<sup>2</sup> hasta los 1000 mA/cm<sup>2</sup>. A mayor densidad de corriente, mayor fatiga de la membrana, lo que reduce su vida útil. En la actualidad, se utilizan membranas poliméricas para solventar este problema.

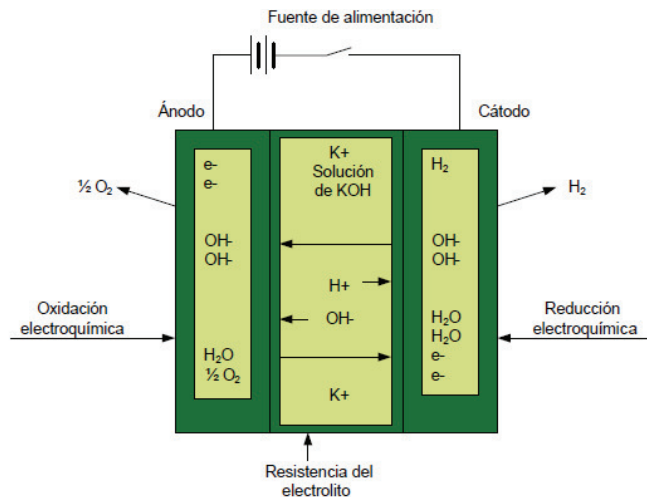


Figura 10. Esquema de funcionamiento de un electrolizador alcalino. Grupo San Valero, 2012.

### 3.5.2 SELECCIÓN DE MATERIALES PARA EL ELECTROLIZADOR (SOFTWARE CES EDUPACK)

El Software *CES EduPack* (2016), proporciona una amplia base de datos con información sobre materiales y procesos de transformación. *CES EduPack* brinda la comparación de miles de materiales bajo parámetros mecánicos, físicos y químicos. Es ampliamente usado en ámbitos ingenieriles y científicos.

#### 3.5.2.1 Análisis de materiales según el tipo de componente

##### 3.5.2.1.1 Recipiente contenedor del sistema de electrolización

Para el diseño del recipiente del electrolizador se realiza una selección de 3 materiales. El objetivo principal del componente es contener el electrolito en todos los procesos de electrolización evitando el desgaste y manteniendo una presión adecuada.

El acero inoxidable es un acero de bajo carbono que contiene 10.5% de cromo en peso, lo que lo hace un material resistente a la corrosión. La clasificación de los aceros varía según los elementos de aleación, como el material estará sometido a un proceso electroquímico, sufrirá una corrosión galvánica.

Los metales que soportan la corrosión en ambientes alcalinos son los aceros inoxidables. Mediante el software *CES EduPack*, los materiales que se comparan son:

- Acero inoxidable 304 (pasivo).
- Acero inoxidable 316 (pasivo).
- Acero inoxidable 440 (activo).

Los mejores resultados frente a la corrosión por el efecto galvánico es el acero inoxidable AISI 440, como se aprecia en la figura 11.

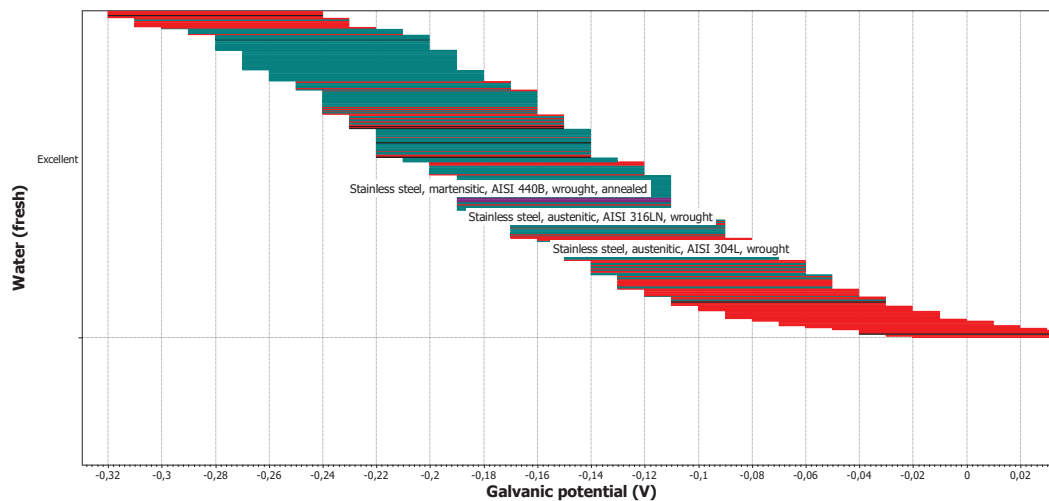


Figura 11. Potencial galvánico vs. resistencia respecto al agua. *CES EduPack*, 2015.

De los resultados que se han obtenido mediante el software *Ces EduPack* 2015 se determina la relación entre el potencial galvánico con relación al costo del material, ver la tabla 15.

Tabla 15  
*Potencial galvánico en medio acuoso*

Ítem	Acero	Costo USD / Kg	Potencial galvánico (V)	Durabilidad respecto al agua y ácidos
1	AISI 440	1.10	- 0.19 - 0.11	Excelente
2	AISI 316	4.71	-0.18 - 0.1	Excelente
3	AISI 304	3.53	-0.15 – 0.17	Excelente

El material seleccionado para fabricar el recipiente para el electrolizador es el acero AISI 304 por sus propiedades y su costo.

#### 3.5.2.1.2 *Electrodos (ánodo y cátodo)*

La selección de electrodos se basa en el criterio de desgaste.

#### 3.5.2.1.3 *Electrodo tubular positivo o ánodo*

Comercialmente se pueden encontrar diferentes materiales que tiene como base el níquel y aleaciones, por ejemplo:

- Níquel comercial grado 270.
- CZ 100.
- HASTELLOY C276.
- INCONEL 713L.

Posteriormente, se realiza la comparación entre los materiales para determinar el material con mejores características. Todos los materiales observados en la figura 12, presentan excelentes propiedades en ambientes alcalinos

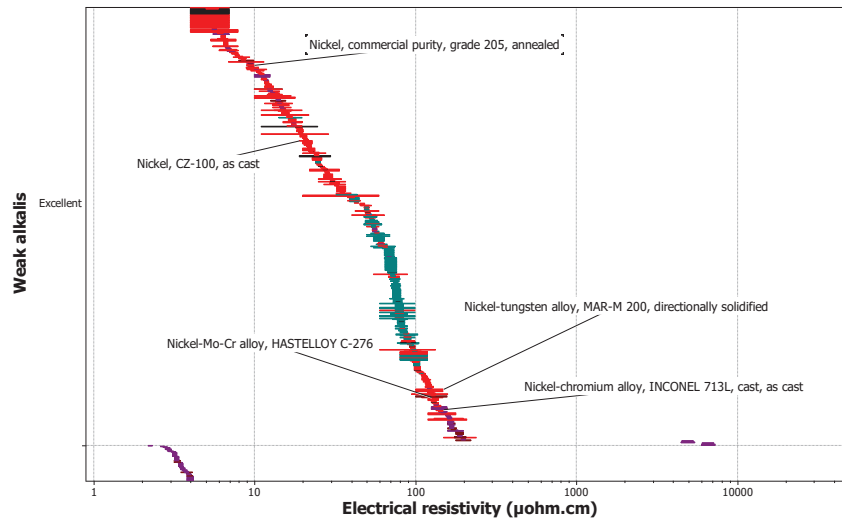


Figura 12. Comparación de aleaciones de níquel. CES EduPack, 2015.

Como resultado de la comparación de estos materiales en el software *CES EduPack* se elabora la tabla 16.

Tabla 16  
*Resistividad eléctrica en un medio alcalino*

Aleación de Níquel	Costo USD / Kg	Resistividad eléctrica (μohm.cm)	Durabilidad en un medio alcalino
<b>NÍQUEL</b>			
GRADE 205/ ALLOY 205	15.73	9 - 10	Excelente
CZ -100	22.86	19 - 23	Excelente
HASTELLOY C- 276	24.95	125 - 135	Excelente
INCONEL 713L	22.64	135 - 150	Excelente

De este resultado, la aleación de NÍQUEL GRADE 205 / ALLOY 205, presenta las mejores características en la conductividad eléctrica y el menor costo en relación a los demás materiales.

### 3.5.2.1.4 Electrodo negativo o cátodo

Al igual que el ánodo, el electrodo tubular del cátodo puede estar compuesto por níquel o cobre, ver figura 13. En este caso particular, debe estar recubierto con tungsteno /manganeso para realizar la separación de oxígeno.

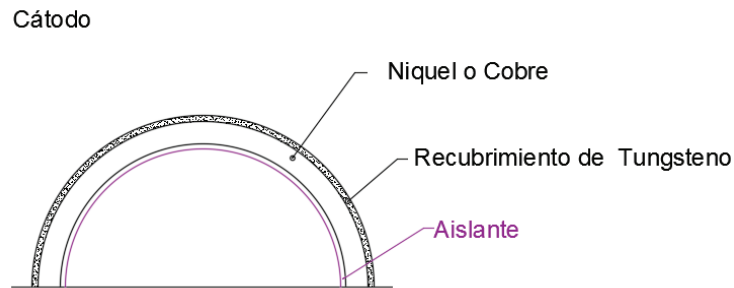


Figura 13. Materiales componentes del cátodo

## 3.5.3 ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO POR MEDIO DE HIDRUROS METÁLICOS

El hidrógeno reacciona a elevadas temperaturas con muchos metales de transición y sus aleaciones, lo que forma los hidruros metálicos. El almacenamiento se produce a través de una serie de etapas que parten del hidrógeno molecular ( $H_2$ ) y el metal. Termina con el hidruro metálico ya establecido. La figura 14 muestra un esquema del almacenamiento del hidrógeno.

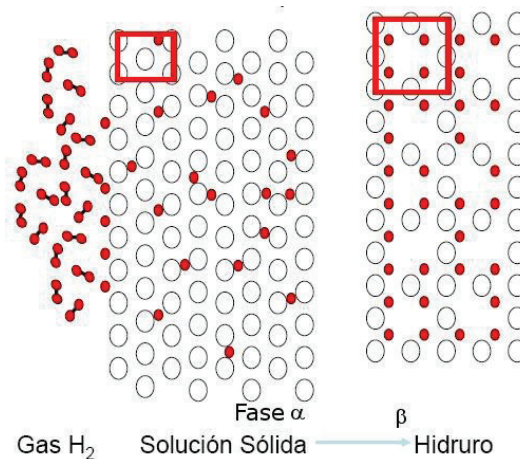



Figura 14. Esquema del almacenamiento de hidrógeno. Grupo San Valero, 2012.

En el mercado existen diferentes tipos de tanques de hidruros metálicos. Entre estos, los formados por compuestos intermetálicos, binarios y complejos. Los compuestos por intermetálicos (IMC) son los más empleados. Los IMC son aleaciones de elementos metálicos que presentan estabilidad, reversibilidad y cinética que favorecen el proceso de almacenamiento. Estos hidruros metálicos presentan la fórmula general  $AmBnHx$ , donde  $AmBn$  representa la composición de la aleación.

En el comercio se encuentran diferentes tanques de hidruros metálicos de la familia  $A_2B$  ( $Mg_2Ni$ ). El tanque MyH2 2000 es ideal para almacenar hidrógeno, porque cuenta con certificado CE ISO 16111 y transportable CE ISO 3479, normativas que regulan las tecnologías del hidrógeno y las pilas de combustible, así como los dispositivos de almacenamiento. En la tabla 17 se muestran las características de un tanque de hidruros metálicos para almacenamiento de hidrógeno.

Tabla 17

*Tanque de almacenamiento de hidrógeno*

Esquema	Características
	Capacidad de almacenamiento: 2000 lts Volumen externo: 3,3 lts Peso: 14kg Dimensiones A: 56cm D: 11cm Presión de llenado: 5 -12 bar Max presión: 30 bar

H2planet, 2014.

### 3.5.4 PILAS DE COMBUSTIBLE

La pila de combustible, a diferencia de los acumuladores electroquímicos (baterías), es un dispositivo de conversión de energía que tiene la capacidad de producir energía eléctrica, siempre y cuando se suministre combustible y oxidante a los electrodos. En la figura 15 se observa el esquema básico de una pila de combustible.

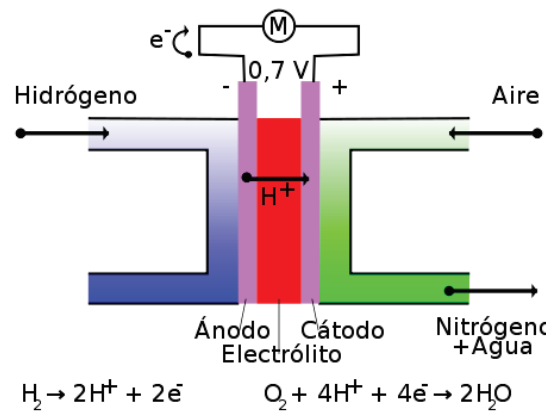


Figura 15. Esquema pila de combustible. Handige Harry, 2008.

Las pilas de combustible presentan grandes beneficios en comparación a las tecnologías convencionales basadas en la combustión. En la actualidad, existen varios tipos de pilas de combustible, como la de hidrógeno, metano, etanol, gas licuado de petróleo, entre otras, tal y como se muestra en la tabla 18.

Tabla 18  
*Tipos de pilas de combustible*

Tipo	Electrolito	Temperatura	Usos	Ventajas	Desventajas
Membrana polimérica (PEMFC)	Polímero Sólido	60-100	Generación estacionaria. Portátiles. Vehículos.	El electrolito sólido reduce la corrosión y mantenimiento. Baja temperatura. Arranque rápido.	Catalizadores costosos. Sensible a impurezas en H <sub>2</sub> u otro combustible.
Alcalina (AFC)	Solución acuosa de hidróxido de potasio	90-100	Espacio. Militar.	Reacción catódica. Más rápida en electrolito alcalino. Mayor eficiencia.	Sensible a impurezas.
Ácido fosfórico (PAFC)	Acido fosfórico líquido	175-200	Generación estacionaria. Portátiles.	85% de eficiencia en cogeneración de electricidad y calor. Acepta H <sub>2</sub> impuro.	Catalizador de Pt. Baja corriente y potencia. Gran Peso y volumen
Carbonatos fundidos (MFCF)	Solución líquida de litio, sodio y potasio	600- 1000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta Temperatura. Mayor eficiencia, catalizadores más baratos.	Corrosión debido a altas temperaturas. Baja vida útil



Óxidos sólidos (SOFC)	Solución líquida de litio, sodio y potasio	800- 1000	Generación estacionaria.	Ventajas por alta temperatura. Ventajas del electrolito sólido.	Corrosión debida a altas temperaturas. Baja vida útil.
-----------------------	--	-----------	--------------------------	---	--

La pila de combustible de membrana polimérica (PEMFC) es la más idónea para este tipo de proyectos debido a que alcanza una potencia de 5 kW, suficiente para los propósitos de la vivienda social sostenible.

### 3.6 SELECCIÓN DE BATERÍAS PARA LA VSS

Las pilas de combustible trabajan de manera conjunta con baterías o condensadores, lo que representa un sistema híbrido de generación y almacenamiento de energía. Las baterías sirven como apoyo a la pila de combustible. Si la demanda de energía es menor a la potencia nominal de la pila, la energía sobrante se utiliza para recargar el banco de baterías. El software *HOMER Energy* selecciona la mejor batería de acuerdo a los siguientes parámetros.

- Potencia nominal del sistema de generación renovable.
- Tipo de fuente de energía primaria para la generación de energía renovable (paneles solares, energía eólica, por medio de combustión interna, etc.).

Al momento de seleccionar las baterías, se debe tomar en cuenta la eficiencia del dispositivo, la vida útil y el costo, ver tabla 19.

Tabla 19  
*Selección de baterías*

Batería	Potencia Nominal	Voltaje nominal (V)	Capacidad máxima (A)	Vida útil (años)	Costo en USD
Generic 1 kW (lead acid)	1.5 kW	12	125	10	337.5
Generic 1 kWh, Li-Ion	1 kWh	6	167	15	700
Generic Vanadium	17.5 kWh	50	350	15	5000

## CAPÍTULO 4

### DISEÑO DE LA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE

En este capítulo se definen las características geográficas de la ubicación de la vivienda social sostenible (VSS), el número de personas promedio a la que está dirigida la vivienda, la distribución de espacios y las características de la estructura soporte para su posterior selección de materiales.

En este capítulo también se desarrolla una simulación en el software *HOMER Energy* para definir qué tipo de sistema de energía renovable (solar o eólico) y qué tipo de sistema de almacenamiento de energía (pilas de combustible de hidrógeno o baterías para sistemas estacionarios) es el más idóneo para la VSS, así como la mejor disposición de los elementos que conforman la generación eléctrica dentro de la vivienda. Para esto, se simulan dos escenarios, el primer escenario combina un sistema solar y eólico con dispositivos de almacenamiento de energía (banco de baterías); y el segundo escenario combina el mismo sistema de generación anterior con un sistema de almacenamiento de energía no convencional (hidrógeno y pilas de combustible).

#### 4.1 DISEÑO DE LA ESTRUCTURA PARA UNA VIVIENDA TIPO DE 4 PERSONAS

Para el diseño de la vivienda social sostenible se considerará el número de personas que ocupa la vivienda, el espacio físico designado para la construcción (área) y la ubicación geográfica. Además, el diseño de una edificación sostenible debe presentar las siguientes características:

- Protección del medioambiente en donde se implante.
- Eficiencia energética y consumo de agua.
- Correcta integración en el ambiente físico.
- Conservación de la vegetación preexistente.
- Emplazamiento que permita densificarla.
- Uso de materiales que disminuyan el impacto ambiental.

#### 4.1.1 DISTRIBUCIÓN DE ESPACIOS EN LA VIVIENDA

Según datos del Instituto Nacional de Estadísticas y Censos (INEC), “mientras más urbanos son los hogares prefieren ser más pequeños y tener menos hijos”. En Ecuador, en el año 2010, el número de hijos por familia disminuyó en 1.6 en relación con años anteriores. La selección del número adecuado de personas que habita la VSS se determina por el promedio de número de habitantes por hogar, según datos del INEC.

El esquema de espacios de la vivienda se encuentra dividida en: 2 habitaciones, sala, cocina, comedor y un baño completo. La vivienda posee un área de 56 metros cuadrados, como se indica en la figura 16.

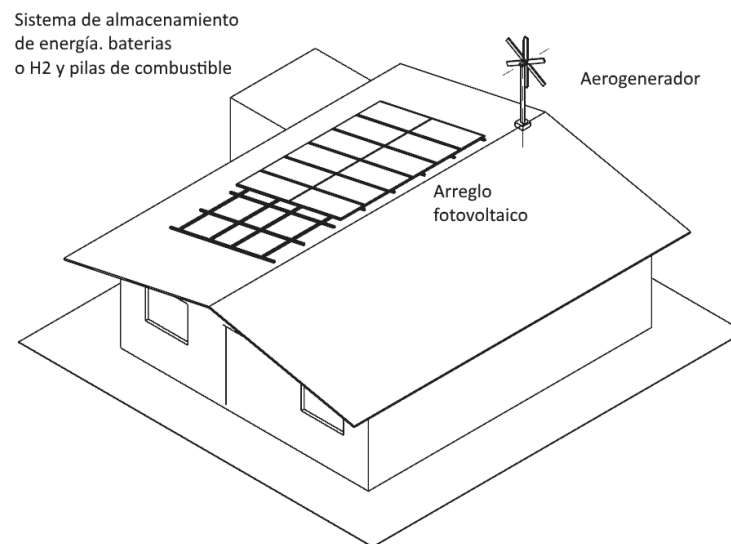


Figura 16. Diseño esquemático de la vivienda social

#### 4.2 SELECCIÓN DE MATERIALES PARA LA ESTRUCTURA SOPORTE

Los sistemas de generación de energía proveniente del arreglo fotovoltaico ocupan un área de 44 metros cuadrados, esto se debe a que cada panel tiene un área aproximada de un metro cuadrado (en el capítulo anterior se determinó el número de paneles fotovoltaicos necesarios para abastecer de energía a la vivienda). Con esta premisa, se plantea el diseño de la estructura soporte para el arreglo

fotovoltaico. Los materiales considerados para la estructura se muestran en la tabla 20.

Tabla 20  
*Materiales para realizar la estructura*

Material	Modulación	Instalación	Resistencia la corrosión
Corea Acero G	Baja	Media	Necesita recubrimiento
Perfil 8 40X40 E, AL anodizado	Alta	Fácil	No necesita recubrimiento

Debido al costo, facilidad de montaje y modulación se elige el Perfil 8 (40x40 E) de aluminio anodizado. Además, se requieren acoples de sujeción para minimizar los costos de instalación de la estructura.

#### 4.2.1 ESPECIFICACIONES DEL PERFIL 8 (40X40)

Es un perfil extruido de aluminio con una composición "Al Mg Si 0.5 F 25" y con un tratamiento térmico de envejecido artificialmente para mejorar sus propiedades mecánicas, en la tabla 21 se muestran las características mecánicas de este perfil.


Tabla 21  
*Especificaciones del perfil 8 (40X40)*

Ítem	Propiedad	Valor numérico
1	Resistencia a la tracción	Rm mín. 245 N/mm <sup>2</sup>
2	Límite de elasticidad	Rp0.2 mín. 195 N/mm <sup>2</sup>
3	Densidad	2,7 kg/dm <sup>3</sup>
5	Alargamiento hasta rotura	A10 mín. 8 %
6	Coefficiente de dilatación lineal	23,6x10 <sup>-6</sup> 1/K
7	Módulo de elasticidad	E aprox. 70 000 N/mm <sup>2</sup>
8	Módulo de compresión	G aprox. 25 000 N/mm <sup>2</sup>

#### 4.2.1.1 Superficie del perfil

Los perfiles de aluminio son anodizados en color natural (CO) o negro (C35). Resisten permanentemente a la corrosión y las ralladuras. La superficie tiene un acabado mate (E6), anodizado y comprimido. El grosor mínimo de la capa anticorrosiva es de 10µm. Su dureza está aproximadamente entre 250~350 HV. Por lo que, permite realizar cortes sin rebabas, de forma que no es necesario eliminar aristas vivas. La pre-tensión de las aletas de la ranura en la zona elástica del material se transmite a los tornillos, protegiendo la unión ante vibraciones.

En cargas nominales, a la deformación plástica se incluyen factores de seguridad ( $S > 2$ ). En la figura 17 se aprecia la carga máxima de tracción que soporta la ranura.



Forma de la ranura	5	6	8	10	12
normal	500 N	1.750 N	5.000 N	7.000 N	10.000 N
ligero		500 N	2.500 N		5.000 N
E			1.750 N	3.500 N	

Figura 17. Carga de tracción del perfil en la ranura. Catálogo ITEM, 2016.

### 4.3 DISEÑO DE ACOPLER/SOPORTES PARA LA ESTRUCTURA

La estructura está diseñada de tal manera que, la instalación, mantenimiento y modulación se realiza fácilmente, haciéndola más económica. Por este motivo, no se requieren equipos especiales para la ejecución del trabajo.

Lo acoples necesarios para la sujeción de la estructura (conformada por el perfil 8) se presentan en la tabla 22.

Tabla 22  
*Acoples de sujeción*

Ítem	Acople	Dimensiones	Material
1	Pletina plana	120x40x5	Acero
2	Ángulo 90	40x40x5	Acero
3	Acople interno	30xd 8	Acero
4	tornillo Allen Ave.	M8x 15	Acero Zincado

En la figura 18, se pueden observar los esquemas de los acoples de sujeción, del ángulo 90, del acople interno y del tonillo *Allen*, según norma DIN 7991 M8 x15.

En la figura 19, se muestra un esquema del sistema de sujeción ensamblado donde consta la pletina plana, el perfil E8 y los tonillos de sujeción *Allen* M8x15.

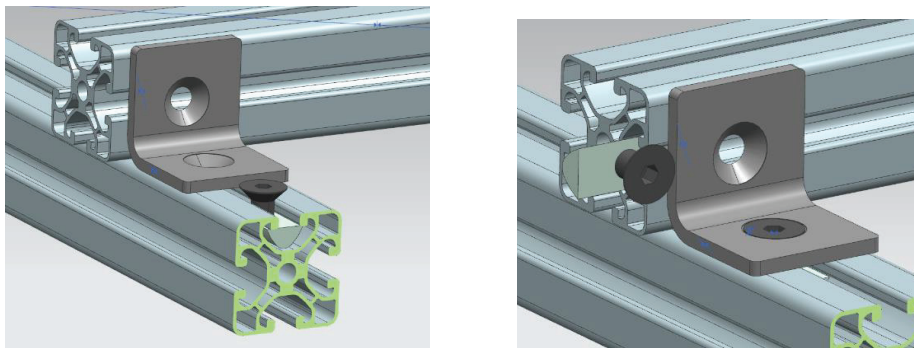


Figura 18. Esquema de disposición de los acoples de sujeción

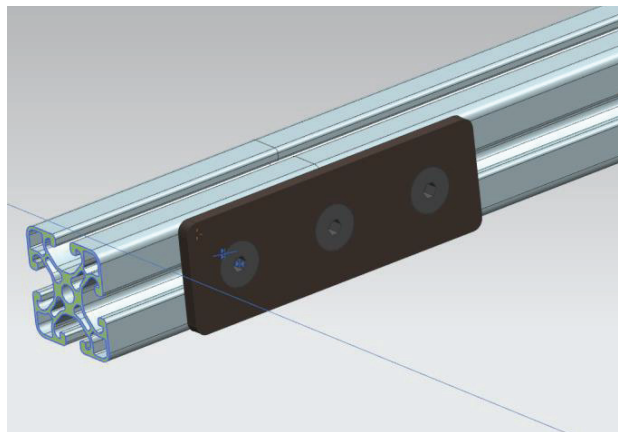


Figura 19. Pletina de sujeción rectangular

La figura 20 muestra el funcionamiento de los acoples de sujeción con el Perfil 8 (40x40) de aluminio anodizado. En esta figura consta también el sistema de acople interno, el tonillo Allen M8x15 y la platina angular (40x50).

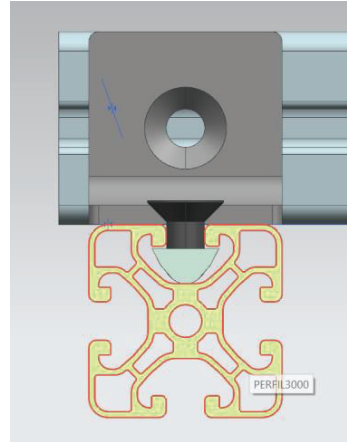


Figura 20. Acoples en sistema de sujeción

#### 4.4 MODELOS MATEMÁTICOS USADOS POR HOMER ENERGY PARA EL DIMENSIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS ENERGÉTICOS DE LA VIVIENDA

*HOMER Energy* es un modelo de optimización de energía que ayuda a diseñar y evaluar sistemas aislados a la red eléctrica. Es una herramienta muy utilizada en temas relacionados con la energía renovable, porque modela microsistemas de energía combinando varias fuentes de energía. Para el presente proyecto se realiza una combinación de componentes de menor costo que satisfacen las cargas eléctricas de una vivienda social.

*HOMER Energy* usa diferentes modelos matemáticos para determinar la potencia, posicionamiento, efectos de temperatura del sistema, entre otros factores, que están involucrados en el dimensionamiento de los sistemas energéticos para la vivienda. Entre los modelos usados están: *Erb*, *HDKR*, *Weibull*, *Duffie*, *Beckman*, entre otros. A continuación, se presentan las ecuaciones y los modelos usados por el software con la finalidad de entregar la mejor solución de diseño para el sistema de generación eléctrica a partir del uso de energías renovables.

#### 4.4.1 MODELO PARA DETERMINAR LA POSICIÓN Y POTENCIA DEL PANEL FOTOVOLTAICO

Para determinar la potencia y posición de los paneles fotovoltaicos, el software considera los parámetros: radiación, compensación de temperatura, orientación y oblicuidad.

##### 4.4.1.1 Cálculo de la salida de potencia de los paneles fotovoltaicos

Para el cálculo de la salida de potencia del panel fotovoltaico, el software utiliza (28).

$$P_{PV} = Y_{PV} f_{PV} \left( \frac{\overline{G}_T}{\overline{G}_{T,STC}} \right) [1 + \alpha_P (T_c - T_{c,STC})] \quad (28)$$

Donde:

$Y_{PV}$  = capacidad nominal del generador fotovoltaico. Salida de potencia bajo condiciones de prueba estándar [kW]

$f_{PV}$  = factor de reducción de potencia fotovoltaica [%]

$\overline{G}_T$  = radiación solar incidente sobre el generador fotovoltaico, en un instante de tiempo [kW / m<sup>2</sup>]

$\overline{G}_{T,STC}$  = radiación incidente en condiciones de prueba estándar [1kW/m<sup>2</sup>]

$\alpha_P$  = coeficiente de temperatura de la energía [%/°C]

$T_c$  = temperatura de la célula fotovoltaica en cada instante de tiempo [°C]

$T_{c,STC}$  = temperatura de la célula PV (panel fotovoltaico) en condiciones de prueba estándar [25°C]

##### 4.4.1.2 Radiación incidente sobre el generador fotovoltaico

La Radiación Global Horizontal (GHI) es la cantidad total de radiación solar que incide sobre la superficie horizontal de la tierra.

La potencia de salida del generador fotovoltaico depende de la cantidad de radiación que incide sobre la superficie de la matriz de PV. Por tanto, *HOMER Energy* debe calcular la incidencia global de la radiación solar sobre la superficie



del generador fotovoltaico, para lo cual, utiliza los procedimientos de *Duffie y Beckman* (1991).

Factores como la latitud, época del año y la hora del día, son factores que el software toma en cuenta para introducir en el modelo matemático. Otro de estos factores es la declinación, importante para determinar la perpendicularidad del sol en el año sobre el panel fotovoltaico. La ecuación (29) presenta el método usado por *HOMER Energy*.

*Ecuación para la declinación:*

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 * \frac{284+n}{265}\right) \quad (29)$$

$n$  = número de día en el año (1 a 365)

#### 4.4.1.3 Ángulo horario

La hora del día en la que el sol está en su punto más alto en el cielo es considerada como hora convenio del sistema (hora cero), es decir negativo antes del mediodía solar, y positivo después del mediodía solar, viene dado por (30).

$$\omega = (t_s - 12hr) * 15^\circ/hr \quad (305)$$

Donde:

$t_s$  = hora local solar

Para determinar la incidencia de la radiación se utiliza *civil time* u hora local estándar, ver (31).

$$t_s = t_c + \frac{\lambda}{15^\circ/hr} - Z_c + E \quad (31)$$

Donde:

$t_c$  = hora local solar en un intervalo de tiempo [h]

$\lambda$  = longitud [°]

$Z_c$  = zona horaria en horas al este de GMT [h]

$E$  = ecuación del tiempo [h]

#### 4.4.1.4 Oblicuidad de la tierra

La oblicuidad de la tierra es el desfase que existe entre el eje cenital de la tierra y el eje verdadero. El tiempo para determinar los efectos de oblicuidad, viene dado por (32).

$$E = 3.82(0.000075 + 0.001868 \cdot \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \cdot \sin 2B) \quad (32)$$

B se calcula a partir de (33) como sigue:

$$B = 360 \frac{(n-1)}{365} \quad (33)$$

Donde:

$n$  = número de día en el año

#### 4.4.1.5 Orientación

Para determinar la orientación del sol sobre el panel, el software usa (34).

$$\cos \theta = (\sin \delta \sin \phi \cos \beta - \sin \delta \cos \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \cos \phi \cos \beta \cos \omega \cos \delta \sin \phi \sin \beta \cos \gamma + \cos \delta \sin \beta \cos \gamma \sin \delta \sin \omega) \quad (34)$$

Donde:

$\theta$  = ángulo de incidencia [°]

$\beta$  = pendiente de la superficie [°]

$\gamma$  = azimut de la superficie [°]

$\phi$  = latitud [°]

$\delta$  = declinación solar [°]

$\omega$  = ángulo horario [°]

#### 4.4.1.6 Ángulo cenital

La ecuación (35) muestra el cálculo del ángulo cenital configurado.

$$\cos \theta_z = \sin \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta \quad (356)$$

Donde:

$\theta_z$  = ángulo cenital [°]

#### 4.4.1.7 Radiación extraterrestre

El cálculo de la radiación extraterrestre se define como la cantidad de radiación solar que incide sobre una superficie normal o perpendicular a los rayos del sol en la parte superior de la atmósfera de la tierra, viene dada por (36).

$$G_{on} = G_{sc} \left( 1 + 0.033 * \cos \frac{360n}{635} \right) \quad (36)$$

Donde:

$G_{on}$  = es la normal a la radiación extraterrestre [kW / m2].

$G_{sc}$  = es la constante solar [1.367 kW / m2]

$n$  = es el día del año [entre 1 y 365]

El software calcula la radiación extraterrestre horizontal media integrando (37) en cada iteración de (37).

$$\bar{G}_o = \frac{12}{\pi} G_{on} \left[ \cos \phi \cos \delta (\sin \omega_2 - \sin \omega_1) + \frac{\pi(\omega_2 - \omega_1)}{180^\circ} \sin \phi \sin \delta \right] \quad (377)$$

Donde:

$\bar{G}_o$  = radiación extraterrestre horizontal promedio [kW / m2]

$G_{on}$  = radiación extraterrestre [kW / m2]

$\omega_1$  = ángulo al comienzo de la etapa de tiempo [°]

$\omega_2$  = ángulo al final en cualquier etapa de tiempo [°]

$$k_T = \frac{\bar{G}}{G_o} \quad (38)$$

Donde:

$\bar{G}$  = radiación global horizontal en la superficie de la tierra promedio durante una iteración [kW / m<sup>2</sup>]

$G_o$  = radiación extraterrestre horizontal promedio durante una iteración [kW / m<sup>2</sup>]

$$G = G_b + G_d \quad (39)$$

$G_b$  = Radiación del haz proveniente del sol [kWh / m<sup>2</sup>]

$G_d$  = Radiación difusa del sol [kWh / m<sup>2</sup>]

#### 4.4.1.8 Correlación de *Erb*

*HOMER Energy* utiliza la correlación de *Erb* (1982), la cual permite el cálculo de la fracción difusa en función del índice de claridad, ver (40).

$$\frac{\bar{G}_d}{\bar{G}} = \left\{ \begin{array}{ll} 1.0 - 0.09 k_T & \text{for } k_T \leq 0.22 \\ 0.9511 - 0.1604k_T + 4.388 k_T^2 - 16.638k_T^3 + 12.366k_T^4 & \text{for } 0.22 < k_T < 0.80 \\ 0.165 & \text{for } k_T > 0.80 \end{array} \right\} \quad (408)$$

#### 4.4.1.9 Modelo *HDKR*

Para el cálculo de la radiación global que incide sobre la superficie inclinada del panel fotovoltaico, *HOMER Energy* utiliza el modelo *HDKR* (modelo matemático utilizado para determinar la radiación solar en un plano de inclinación en un lugar específico) que está basado en tres componentes de la radiación solar difusa:

- Componente isótropa: Aquella radiación que proviene de manera homogénea de todas las partes del cielo.
- Componente circunsolar: Radiación que emana de la dirección del sol.
- Brillo o radiación que emana de forma horizontal (horizonte iluminado).

Antes de la aplicación del modelo *HDKR*, se definen tres factores iniciales.

- $R_b$ : Es la proporción de haz de radiación en la superficie inclinada a la superficie horizontal de la tierra:

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\theta_2} \quad (419)$$

- $A_i$ : Es una medida de la transmitancia atmosférica del haz de radiación:

$$A_i = \frac{\overline{G_b}}{\overline{G_o}} \quad (42)$$

- La radiación en el horizonte iluminado es la más difusa. Este término (43) está relacionado con la turbidez solar  $f$ .

$$f = \sqrt{\frac{\overline{G_b}}{\overline{G_o}}} \quad (44)$$

El modelo de Hey y *HDKR* calcula la radiación incidente global sobre el conjunto fotovoltaico de acuerdo con (45):

$$\overline{G_T} = (\overline{G_b} + \overline{G_d}A_i)R_b + \overline{G_d}(1 - A_i) \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) \left[ 1 + f \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] + \overline{G} \rho_g \left( \frac{1+\cos\beta}{2} \right) \quad (4510)$$

Donde:

$\beta$  = pendiente de la superficie [°]

$\rho_g$  = reflectancia del suelo, que también se llama el albedo [%]

En la figura 21 se representa el recurso solar promedio por meses de una zona geográfica específica.

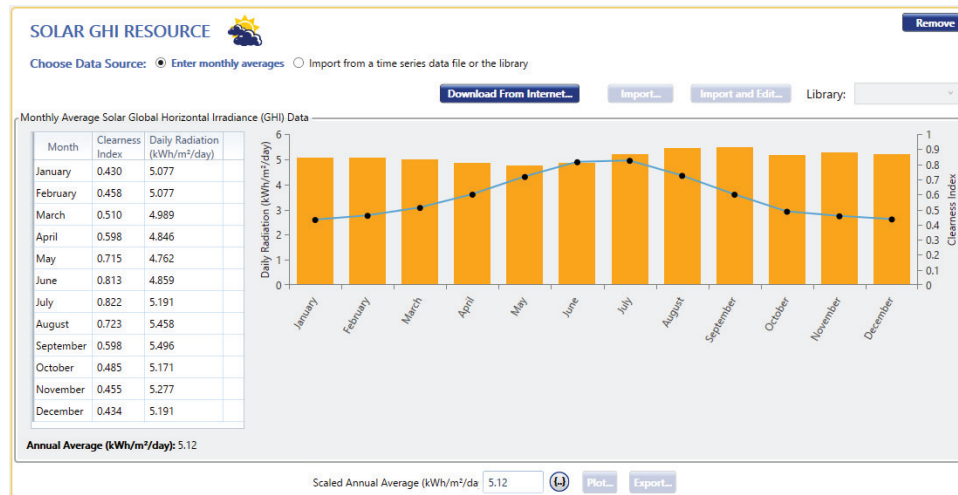


Figura 21. Ventana de ingreso de datos del recurso solar

#### 4.4.1.10 Índice de claridad en Homer

El índice de claridad es un número adimensional que varía entre 0 y 1. El índice de claridad ( $K_T$ ), y está definido por la relación entre la irradiación anual sobre una superficie horizontal situada en la Tierra y la irradiación anual sobre una superficie horizontal situada fuera de la atmósfera.

$$K_T = \frac{H_{ave}}{H_{o,ave}} \quad (46)$$

$H_{ave}$ = radiación promedio mensual en la superficie de la tierra [kWh/m²/day]

$H_{o,ave}$ = radiación sobre una superficie horizontal en la parte superior de la atmósfera de la Tierra [kWh/m²/day]

Para una latitud dada, se puede calcular  $H_o$  para cualquier mes del año. Así que, si se conoce  $H_{o,ave}$  o  $K_T$ , se puede realizar el cálculo usando la ecuación anterior. HOMER *Energy* hace exactamente eso, cada vez que se introduce un valor en la tabla de datos del recurso solar.

Si introduce un valor medio de radiación, HOMER *Energy* calcula el índice de claridad correspondiente. El índice de claridad para Quito varía entre 0.2 y 0.7 según datos del CENACE, 2014.

Para el presente proyecto, la localización geográfica en latitud y longitud se encuentra en Quito. *HOMER Energy* ubica estas coordenadas y las muestra en una ventana como se observa en la figura 22.

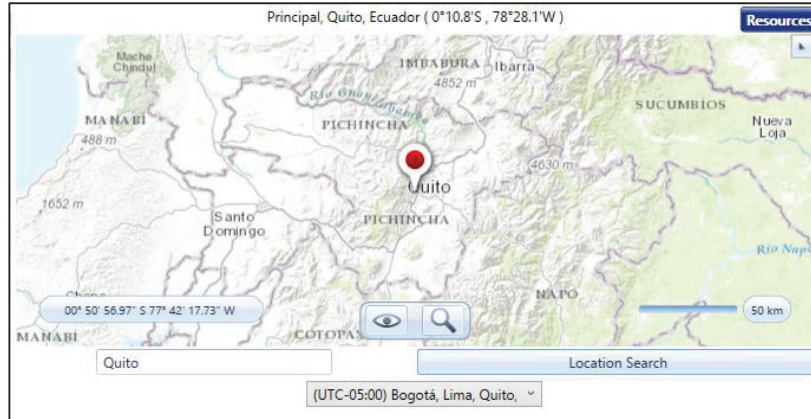


Figura 22. Localización en latitud y longitud

#### 4.4.1.11 Modelo del sistema fotovoltaico

Fórmula principal en función de la intensidad y generara a cierto nivel de tensión.

$$V(I) = N_s \cdot V_t \cdot \ln \left( 1 + \frac{I}{I_{sc}} \right) + V_{oc} - I_{sc} \cdot R_s \quad (47)$$

Con esta fórmula se calculan los diversos parámetros que la conforman y, posteriormente, se varía la intensidad  $I$ , desde cero hasta un máximo, delimitado por el valor de la corriente de cortocircuito  $I_{sc}$ .

Mediante (49) se calcula la intensidad del sistema fotovoltaico.

$$I = I_{sc} \cdot \left( 1 - e^{\frac{V - V_{oc} + I_{sc} \cdot R_s}{V_t \cdot N_s}} \right) \quad (48)$$

Una tensión de salida genera la señal corriente de salida en función de una serie de parámetros previamente hallado ( $V_{oc}$   $I_{sc}$ ). Luego, de forma teórica, la resistencia en serie se puede estimar como la pendiente de la curva tensión-intensidad (49).

$$R_s = \frac{V_{oc}}{I_{sc}} \cdot \left( 1 - \frac{FF}{FF_0} \right) \quad (49)$$

Los valores de los parámetros FF y FF0 se calculan de (50)

$$FF = \frac{I_M \cdot V_M}{I_{sc} \cdot V_{OC}} \quad (50)$$

$$FF_0 = \frac{v_{oc} - \ln(v_{oc} + 0.72)}{v_{oc} + 1}$$

Donde la tensión de circuito abierto es (51).

$$v_{oc} = \frac{V_{oc}}{V_t \cdot N_s} \quad (51)$$

Donde:

V= Tensión generada por la célula

Voc= Tensión de circuito abierto

Isc= Corriente de corto circuito

VM= Tensión de potencia máxima

IM= Intensidad de potencia máxima

Vt= Tensión térmica

Ns= Número de células en serie

La corriente de cortocircuito es una variable en función de la irradiación incidente sobre la superficie de la célula y se determina con (52)

$$I_{sc} = C_1 \cdot G \quad (52)$$

$$C_1 = \frac{I_{csmod}(G_1)}{G_1} \quad (53)$$

Donde

G= Irradiancia incidente sobre el módulo

I<sub>csmod</sub>= Corriente de cortocircuito del panel a una irradiancia definida por el fabricante.



$G_1$  = Irradiancia a la que han sido hallados los parámetros proporcionados por el fabricante.

#### 4.4.2 MODELO PARA EL AEROGENERADOR

##### 4.4.2.1 Cálculo de potencia de salida para el aerogenerador

*HOMER Energy* calcula la potencia de salida de la turbina de viento en cada iteración. Esto implica un proceso de tres pasos.

- Calcular la velocidad del viento a la altura de buje de la turbina eólica.
- Determinar la cantidad de energía producida por el aerogenerador, a una densidad estándar del aire.
- Establecer el valor de la potencia de salida para la densidad real del aire.

El cálculo de la velocidad del viento altura de buje se muestra en (54).

$$U_{hub} = U_{anem} * \frac{\ln\left(\frac{z_{hub}}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{anem}}{z_0}\right)} \quad (5411)$$

Donde:

$U_{anem}$  = velocidad del viento a la altura del anemómetro [m / s]

$z_{hub}$  = altura de buje de la turbina de viento [m]

$z_{anem}$  = altura del anemómetro [m]

$z_0$  = longitud de rugosidad de la superficie [m]

##### 4.4.2.2 Cálculo de la velocidad del viento

Bajo la ley de potencia, *HOMER Energy* calcula la velocidad del viento a la altura de buje utilizando (55).

$$U_{hub} = U_{anem} * \left(\frac{z_{hub}}{z_{anem}}\right)^\alpha \quad (55)$$

Donde:

$\alpha$  = exponente de la ley de potencia

#### 4.4.2.3 Potencia a densidad estándar del aire

Para determinar la potencia del aerogenerador se utiliza la curva de potencia. En la figura 23 se observa la línea de puntos de color rojo que indica la velocidad del viento altura de buje y la línea punteada azul que indica la potencia del aerogenerador que determina la potencia a la velocidad del viento.

Si la velocidad del viento en el buje de la turbina no está dentro del rango definido en la curva de potencia, la turbina no genera ninguna potencia. La energía producida por el aerogenerador depende directamente de los límites mínimos y máximos del viento de corte.

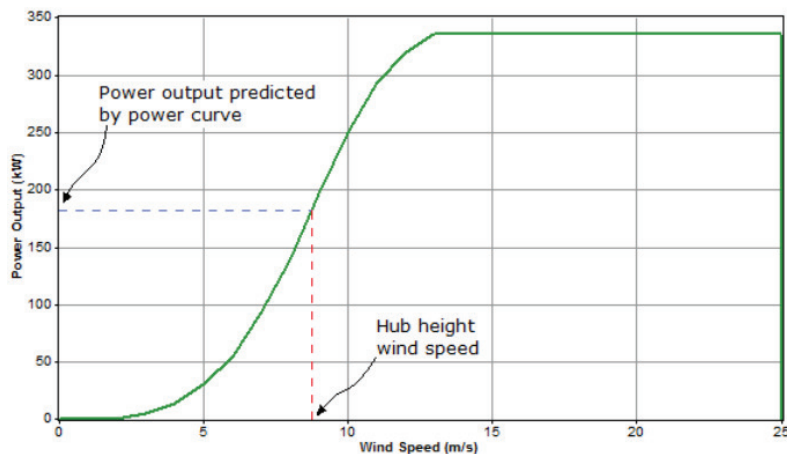


Figura 23. Curva de potencia para un generador eólico

#### 4.4.2.4 Potencia a densidad real del aire

Las curvas de potencia normalmente especifican el rendimiento de la turbina de viento bajo condiciones de temperatura y presión estándar (STP). Para ajustarse a las condiciones reales, *HOMER Energy* multiplica el valor de la potencia predicha por la curva de potencia y la relación de la densidad del aire, ver (56).

$$P_{WTG} = \left(\frac{\rho}{\rho_0}\right) * P_{WTG,STP} \quad (5612)$$

Donde:

$P_{WTG}$  = potencia de la turbina de viento [kW]

$P_{WTG,STP}$  = potencia de la turbina de viento a temperatura y presión estándar [kW]

$\rho$  = densidad real del aire [kg / m<sup>3</sup>]

$\rho_0$  = densidad del aire a temperatura y presión estándar (1.225 kg / m<sup>3</sup>)

#### 4.4.2.5 Estimación del recurso eólico

A través del algoritmo de síntesis se pueden determinar los datos del viento en serie. Este algoritmo requiere que se introduzcan parámetros iniciales para generar datos en series temporales artificiales. Dicho resultado es estadísticamente razonable. El algoritmo produce datos que imitan las características de los datos de velocidad del viento real, incluyendo ráfagas fuertes y sostenidas, largas pausas entre períodos de mucho viento y patrones estacionales diurnos.

##### *Parámetros necesarios*

Para el cálculo de la velocidad del viento promedio mensual en un año, *HOMER Energy* usa el banco de datos contenidos en el mismo software. Y para la realización de la simulación, usa los parámetros expuestos en la tabla 23.

Tabla 23

##### *Parámetros para el cálculo del viento*

Ítem	Parámetro	Descripción	Valor
1	k de Weibull	Refleja la amplitud de la distribución de velocidades del viento durante el año.	2.0
2	Factor de autocorrelación de 1 hora	Refleja la fuerza con que la velocidad del viento, en un intervalo de tiempo, tiende a depender de la velocidad del viento en el paso de tiempo anterior.	0.85
3	Patrón de fuerza diurno	Refleja la fuerza con que la velocidad del viento depende de la hora del día.	0.25
4	Velocidad del viento en hora pico	La hora del día en que, en promedio, tiende a ser más ventoso.	15

#### 4.4.3 ALGORITMO

El algoritmo usado por *HOMER Energy* para sintetizar un año de datos de la velocidad del viento a través de series temporales se describe a continuación.

#### 4.4.3.1 Pasos

*HOMER Energy* genera una secuencia de números de autocorrelación, uno por iteración en el año. Utiliza (57), que es un modelo autorregresivo de primer orden.

$$z_t = a * z_{t-1} + f(t) \quad (57)$$

Donde:

$z_t$  = valor en el intervalo de tiempo  $i$

$z_{t-1}$  = valor en el intervalo de tiempo  $i-1$

$a$  = parámetro autorregresivo.

$f(t)$  = función de ruido blanco. Devuelve un número aleatorio extraído de una distribución normal con media cero y desviación estándar 1.

Para calcular el coeficiente de autocorrelación por hora, el software asume un decaimiento logarítmico en la función de autocorrelación. En este caso, (58) permitirá el cálculo del parámetro de autocorrelación para un desfase de iteración  $k$ :

$$r_k = r_1^k \quad (58)$$

Resolviendo  $r_1$  se obtiene (59).

$$r_1 = \exp \left[ \frac{\ln(r_k)}{k} \right] \quad (5913)$$

El factor de autocorrelación de una hora es  $rk$ , donde  $k$  es el número de iteraciones que se ajustan en una hora, ver (60).

$$k = \frac{60}{t} \quad (6014)$$

Donde,  $t$  es el intervalo de tiempo en minutos.

Este primer paso del algoritmo produce una serie de números que se ajusta a una distribución normal con media cero y desviación estándar 1. Los siguientes pasos que realiza el software son operativos; para continuar se tiene que realizar un ingreso de datos del recurso eólico en la misma posición geográfica. Para el

ingreso del recurso solar-eólico hay que dirigirse a la pestaña “*RESOURCES*” de la ventana gráfica del programa, tal y como se indica en la figura 24.

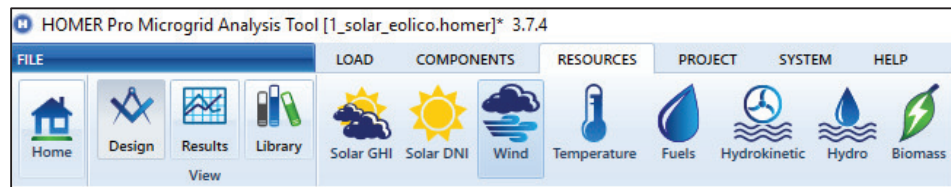


Figura 24. Ingreso del recurso eólico en *HOMER Energy*

A continuación, en la figura 25 se observa cómo el software *HOMER Energy* calcula la velocidad promedio del viento para 12 meses. Y en la figura 26, se muestran los resultados de simular un escenario solar-eólico.

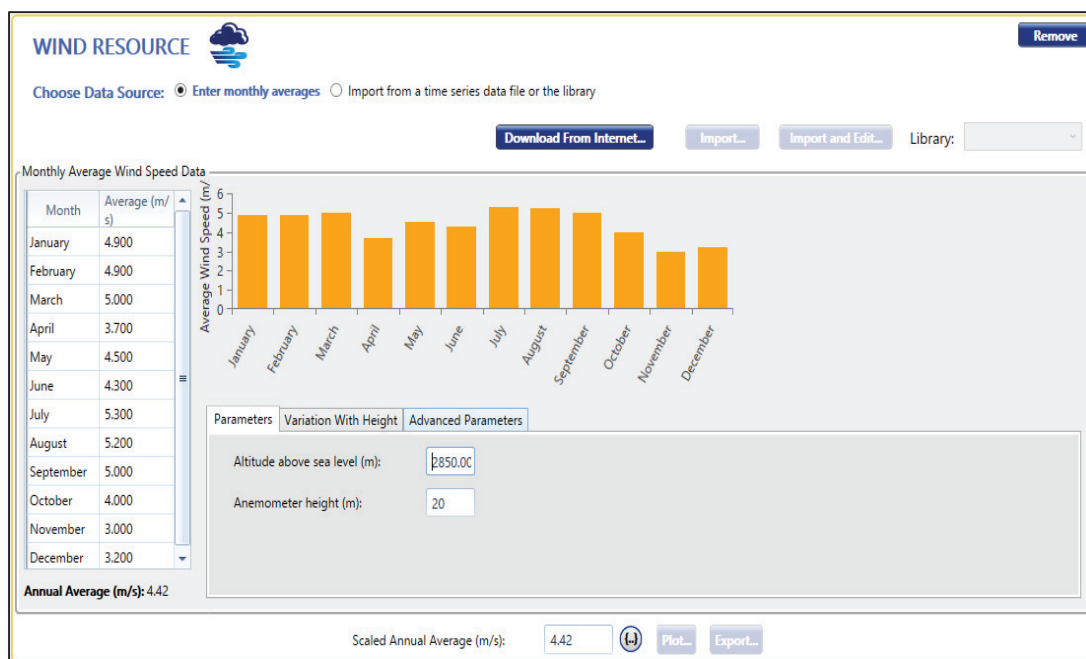


Figura 25. Recurso eólico

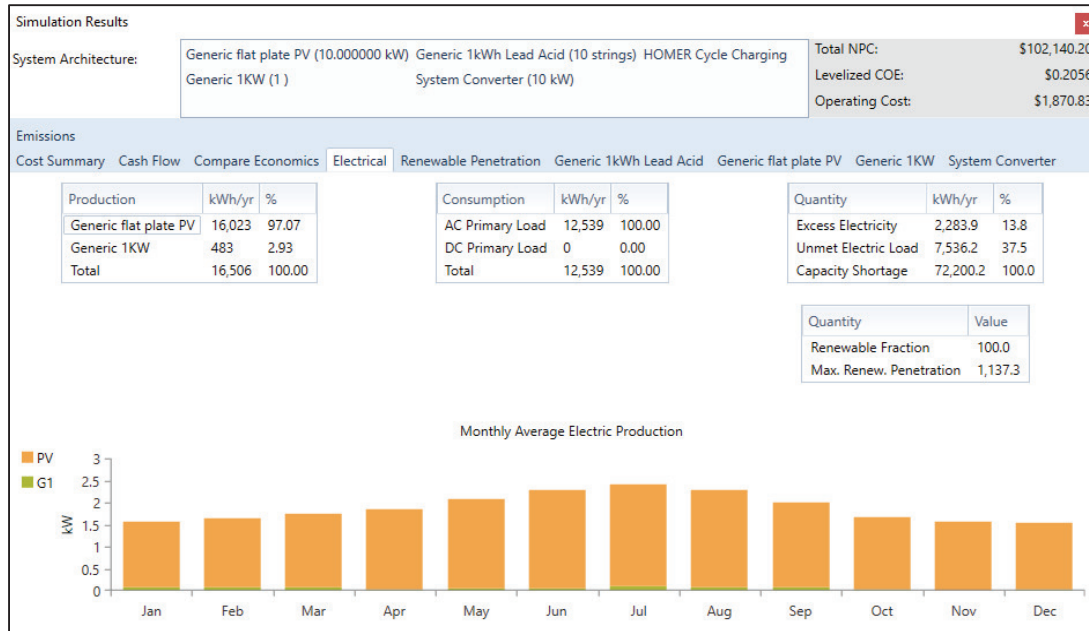


Figura 26. Resultados del escenario solar-eólico

#### 4.5 COSTE NORMALIZADO DEL SISTEMA

*HOMER Energy* define el coste normalizado de la energía (COE) como el costo promedio por kWh de energía eléctrica útil producida por el sistema. Para calcular el COE, se divide el costo anualizado de la producción de electricidad (el costo anualizado total menos el costo del servicio de la carga térmica) por la carga eléctrica total servida, observar (61):

$$COE = \frac{C_{ann,tot} - c_{boiler} H_{served}}{E_{served}} \quad (61)$$

Donde:

$C_{ann,tot}$  = costo total anualizado del sistema [\$/yr]

$c_{boiler}$  = costo marginal de la caldera [\$/kWh]

$H_{served}$  = carga térmica total servida [kWh/yr]

$E_{served}$  = la carga eléctrica total servida [kWh/yr]

El segundo término en el numerador es la porción del costo anualizado que resulta de servir a la carga térmica. En sistemas que no sirven a una carga térmica ( $H_{\text{thermal}} = 0$ ) este término será igual a cero, es decir, (62).

$$COE = \frac{C_{ann,tot}}{E_{served}} \quad (6215)$$

El COE es una métrica conveniente con el que se puede comparar los sistemas de energías renovables.

#### 4.5.1 COSTO TOTAL ANUAL

El costo total anual es el valor anualizado del coste actual neto total y se calcula usando (63):

$$C_{ann,tot} = CRF(i, R_{proj}) * C_{NPC,tot} \quad (63)$$

Donde:

$C_{NPC,tot}$  = el actual coste neto total [\\$]

$i$  = la tasa de descuento real anual [%]

$R_{proj}$  = la vida del proyecto [años]

$CRF()$  = una función de recuperación del capital

#### 4.5.2 COSTO TOTAL ACTUAL NETO

El costo total actual neto (NPC) de un sistema es el valor actual de todos los gastos en que ha incurrido durante su vida útil, menos el valor presente de todos los ingresos que gana durante su vida útil. Los costos incluyen los costos de capital, reemplazo, operación, mantenimiento, combustible, emisiones, sanciones y costes de compra de energía de la red. Los ingresos incluyen el valor residual y los ingresos por ventas de la red.

*HOMER Energy* calcula el costo total actual neto mediante la suma de los flujos de caja totales en cada año de la vida del proyecto (si el valor es positivo indica que el proyecto es viable económicamente). Los resultados se muestran en la figura 27.

Sensitivity Cases: Left Click on a sensitivity case to see its Optimization Results.														
Architecture										Cost		System	PV	
	PV (kW)	G1	1kWh LA	Converter (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)	Ren. Frac (%)	Capital Cost (\$)	Production (kWh)	Cap	
	1	10	10.0	10.0	CC	\$1.98	\$38,230	\$649.25	\$12,500	100			2,000	

Optimization Cases: Left Double Click on a particular system to see its detailed Simulation Results.														
Architecture										Cost		System	PV	
	PV (kW)	G1	1kWh LA	Converter (kW)	Dispatch	COE (\$)	NPC (\$)	Operating cost (\$)	Initial capital (\$)	Ren. Frac (%)	Capital Cost (\$)	Production (kWh)	Cap	
	10.0	10	10.0	10.0	CC	\$0.222	\$101,159	\$1,783	\$30,500	100	20,000	14,359		
	10.0	1	10	10.0	CC	\$0.225	\$105,598	\$1,845	\$32,500	100	20,000	14,359	2,000	

Figura 27. Cálculo del costo total actual neto

#### 4.6 SIMULACIÓN DE ESCENARIOS EN HOMER ENERGY

Para determinar qué combinación de sistema de energía renovable con sistema de almacenamiento de energía es el más idóneo, se realizarán simulaciones en *HOMER Energy*. Se evaluarán dos escenarios, el primer escenario combina un sistema solar y eólico con un sistema de almacenamiento de energía (banco de baterías). El segundo escenario combina el mismo sistema de generación anterior con un sistema de almacenamiento de energía no convencional (hidrógeno y las pilas de combustibles).

Igualmente, por cada simulación de escenario en el software se determina la configuración óptima de dispositivos para la generación eléctrica de energía y su almacenamiento en sistemas convencionales y no convencionales.



#### 4.6.1 ESCENARIO 1 (SOLAR – EÓLICO)

##### 4.6.1.1 Panel fotovoltaico

Ingreso de Datos panel fotovoltaico

Consumo medio de energía diario

- $L_{md} = 8630,34$  Kwh/día
- Radiación solar promedio: 4.765 kWh/m<sup>2</sup> /día
- Ubicación: Quito (0°10.8'S, 78°28,1'W)
- Costo por kW: 2500 USD

##### 4.6.1.2 Aerogenerador

- Costo por kW = 2400 USD
- Eficiencia = 13%
- Constante de Weibull = 2
- Altura sobre el nivel del mar= 2850 m
- Altura anemómetro = 20 m
- Hora máximo recurso solar = 15:00 pm
- Velocidad promedio anual = 4.42 m/s
- Tiempo de vida del proyecto = 25 años
- Inflación= 3.38 %

Una vez ingresados los datos al programa y una vez verificada la configuración adecuada de todos los elementos, se realiza la simulación.

Las diferentes capacidades de potencia de todos los elementos se ingresan al software, tal y como se indica en la tabla 24.

Tabla 24  
*Elementos considerados para la simulación*

Ítem	Panel (kW)	Aerogenerador	Batería	Inversor
1	0	0	0	0
2	5	1	10	3
3	8	2	15	5
4	10	3	20	20
5	15	4	25	25

Al ejecutar el programa, se indica que con la configuración anterior se van a realizar 800 combinaciones. El reporte de cálculo de *HOMER Energy* se observa en la figura 28, dando como resultado 576 soluciones factibles.

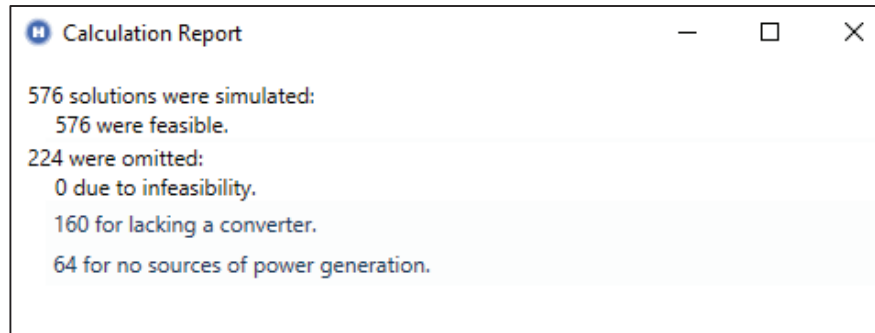


Figura 28. Reporte de número de simulaciones

Los resultados indican un costo actual neto de 69199.02 USD. Un costo normalizado de la energía (COE) de 0.53 USD/kW. Los resultados se indican en la figura 29.

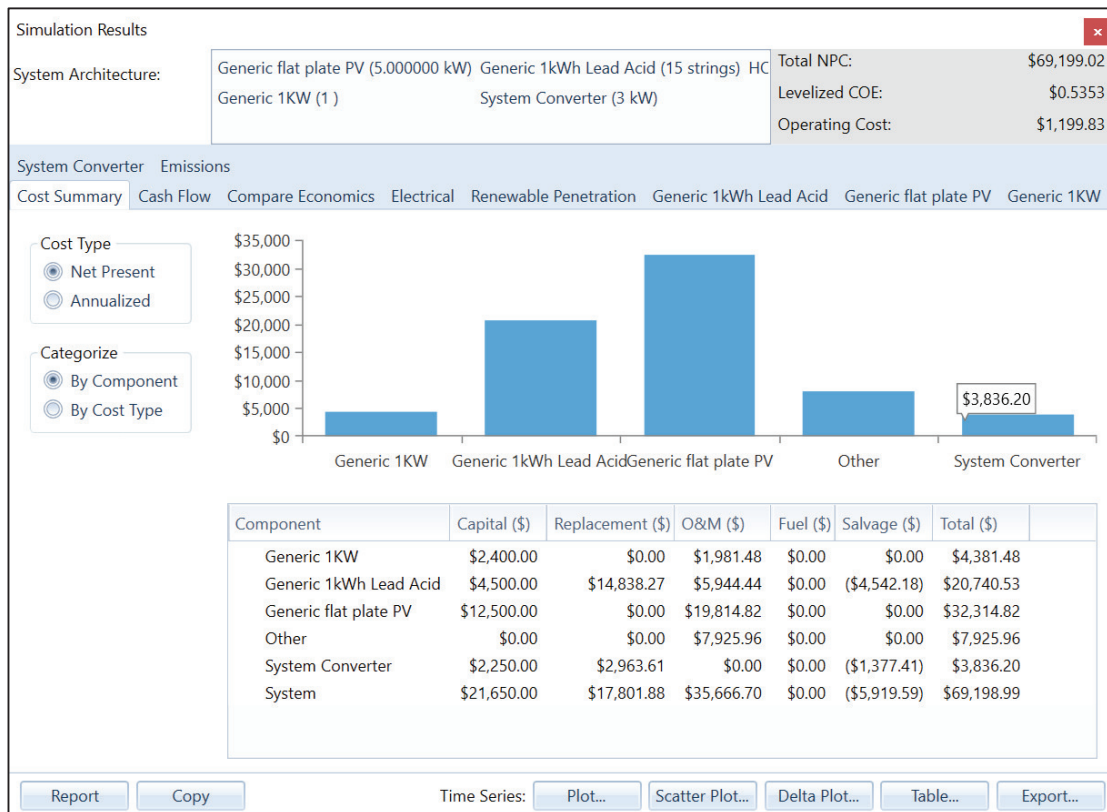


Figura 29. Simulación de resultados

Mediante la implantación del sistema híbrido de energía se obtiene una producción eléctrica promedio mensual de 1.2 Kw, como se indica figura 28. La tabla 25 especifica la cantidad de energía generada en el año por el sistema, así como el exceso de energía.

Tabla 25  
*Energía eléctrica del sistema*

Ítem	Generación	kWh/año	Consumo	kWh/año	Cantidad	kWh/año
1	Fotovoltaica	7179	Carga AC	3262	Exceso de electricidad	3813.2
2	Eólica	483	CargaDC	0		
	Total	7662	Total	3262		

Resultados generados por *HOMER Energy*

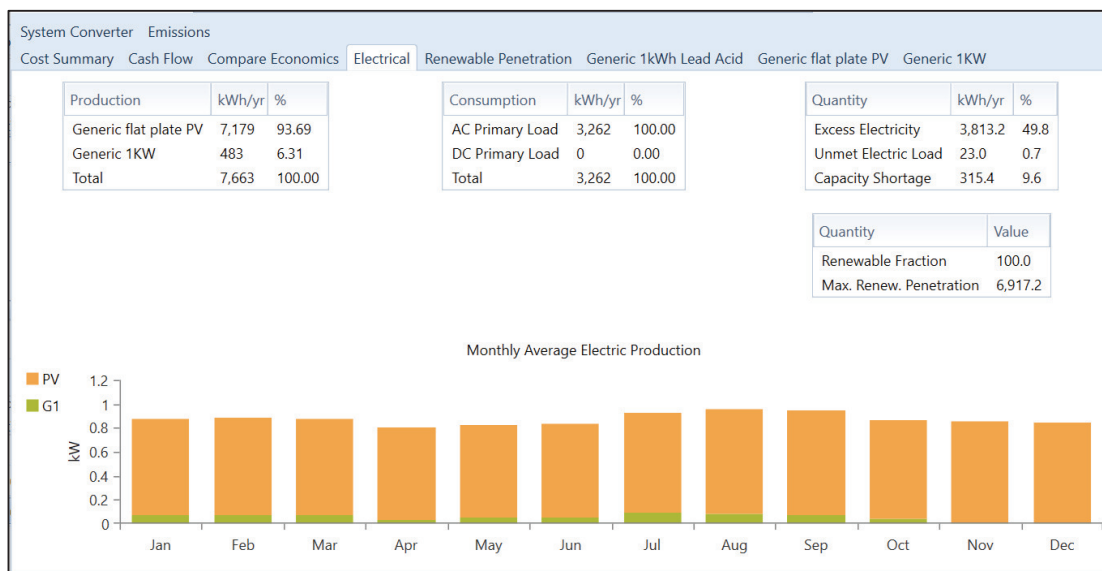


Figura 30. Generación de energía del sistema

La producción de energía por medio del sistema fotovoltaico es muy alta (aún sin considerar el aporte de 6,3% del sistema eólico a la carga total) y satisface las cargas energéticas de la vivienda (figura 30). Para minimizar los costos de generación de energía, se decide no tomar en cuenta el sistema eólico y se realiza una nueva simulación.

Los resultados de la nueva simulación indican que el costo normalizado de la energía (COE) es de 0.527 USD/kWh y la inversión inicial es de 19500 USD, ver figura 31.

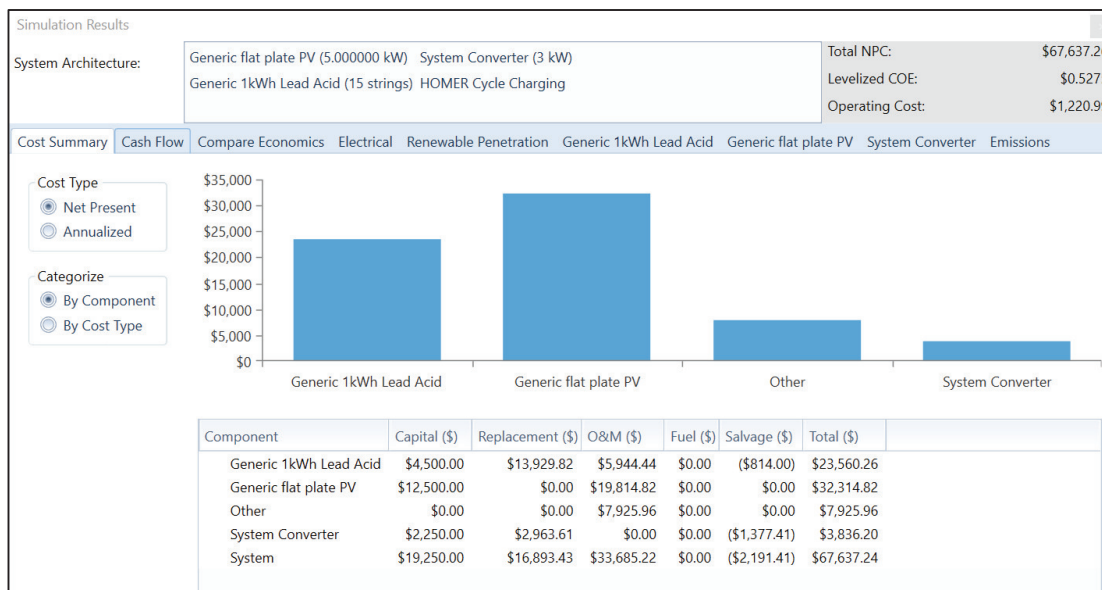


Figura 31. Resultados sin considerar el sistema eólico

En la tabla 26 se indica la comparación de los sistemas solar + baterías, y solar-eólico + baterías. En esta tabla, también se determina el porcentaje de aumento o disminución del COE, la inversión inicial y el exceso de electricidad.

Tabla 26

*Comparación entre sistemas de almacenamiento de energía*

Ítem	Descripción	Solar + baterías	Solar + eólico + baterías	Porcentaje de aumento o disminución
1	COE (USD/kWh)	0.527	0.535	1.33%
2	Inversión inicial (USD)	19250	21650	11.09%
3	Exceso de electricidad (kWh/año)	3275.7	3813.2	14.15%
4	Generación PV (kWh/año)	7179	1179	0.0%
5	Generación eólica (kWh/año)	-----	438	-----
6	Salida de baterías (kWh/año)	1254.7	1369.51	8.38%
7	Rendimiento anual batería (kWh/año)	1402.18	1288.95	2.83%

Resultados *HOMER Energy*

El sistema de generación fotovoltaico y baterías presenta un COE similar al sistema que considera un generador eólico adicional. De esta manera, se elige el sistema

de generación fotovoltaica (sistema único) y el sistema de almacenamiento por medio de banco de baterías.

#### 4.6.2 COMPARACIÓN DE LOS VALORES OBTENIDOS CON HOMER ENERGY Y LOS CALCULADOS

En la tabla 27 se observan los valores calculados en el capítulo 4 y los costos estimados mediante el software *HOMER Energy*.

Tabla 27

*Comparación de Resultados*

Descripción Sistema	Calculados	Homer Energy
Fotovoltaico	3150.1 kWh/año	7179 kWh/año
Eólico	345.3 kWh/año	483 kWh/año
Energía total(P-W)	3395.4 kWh/año	7662 kWh/año
Costo	31850 USD	21650 USD

Al realizar la comparación los resultados de los costos, vemos que estos varían debido a que, en la simulación, el software optimiza el sistema y considera suficiente el uso de 15 baterías como las calculadas en el capítulo 3.

#### 4.6.3 ESCENARIO 2 (ALMACENAMIENTO MEDIANTE HIDRÓGENO Y PILAS DE COMBUSTIBLE)

Esta configuración analiza otras opciones para proporcionar energía a la vivienda. Las dos posibles fuentes de energía son la energía fotovoltaica y la energía eólica. Como en la simulación anterior se determinó que el sistema eólico genera el 6% a la carga total, no se toma en cuenta para la presente simulación. Los medios de almacenamiento posibles son un banco de baterías y un sistema de hidrógeno y pila de combustible. La figura 32, muestra la configuración del sistema tomando en cuenta únicamente el sistema de hidrógeno para el almacenamiento (pila de combustible).

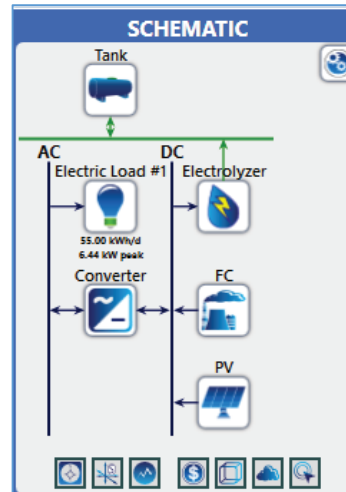


Figura 32. Esquema del sistema de almacenamiento

#### 4.6.3.1 Hidrógeno y pilas de combustible

- Eficiencia = 80%
- Poder calorífico inferior = 120 (MJ/ kg)
- Densidad = 0.09 kg/m<sup>3</sup>
- Costo (kW)= 3000 USD

Resultados de la simulación

#### 4.6.3.2 Electrolizador

- Costo por Kg almacenado = 1500 USD
- Eficiencia = 76%
- Vida útil = 15 años

#### 4.6.3.3 Panel fotovoltaico

Consumo medio de energía diario

- $L_{md} = 8630.4$  Kwh/día
- Radiación solar promedio: 4.765 kWh/m<sup>2</sup> /día
- Ubicación: Quito (0°10.8'S, 78°28,1'W)
- Costo = 2500 USD /kW

La energía almacenada depende de la cantidad de hidrógeno producido. Si la cantidad es baja puede concluirse que el sistema de almacenamiento por medio de

hidrógeno y pilas de combustible no es factible en relación al uso de un banco de baterías.

Se realiza la simulación y se observa que el hidrógeno producido por el electrolizador es de 77 kg /año (muy bajo), aproximadamente 1352 kWh/año.

Posteriormente, se analiza la salida de energía por medio de la pila de combustible de hidrógeno (*fuel cell*) y se compara este valor con la energía generada por los paneles fotovoltaicos. La figura 33 indica el porcentaje de energía generada por la pila de combustible y el costo normalizado de la energía, que es de 1.80 kW/h.

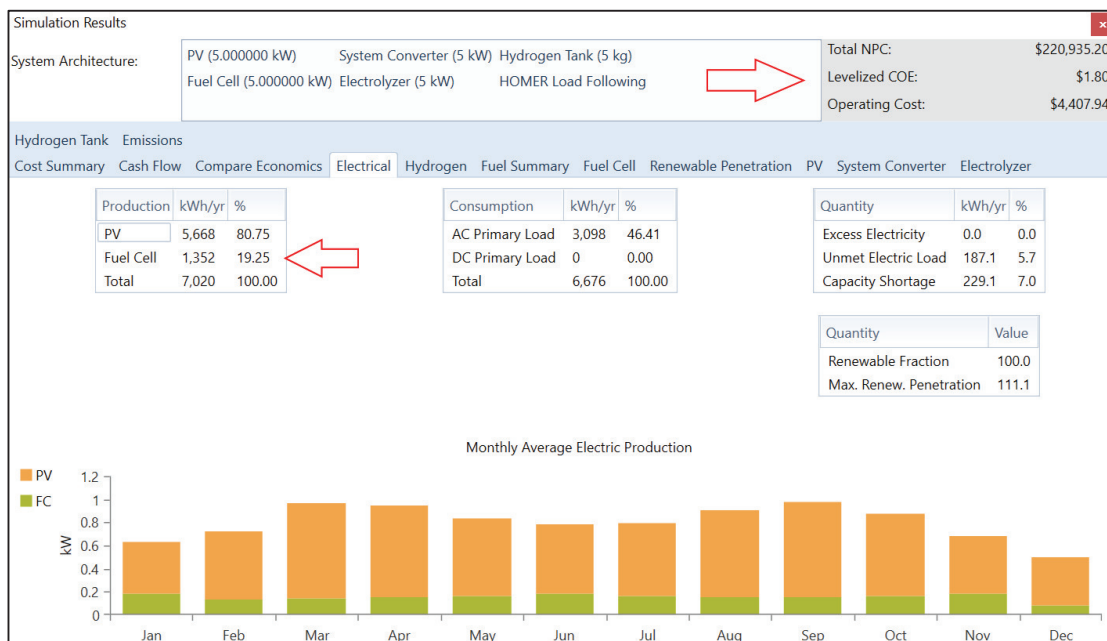


Figura 33. Salida de energía de la pila de combustible

La eficiencia de ida y vuelta del sistema de almacenamiento de hidrógeno es menos del 50% debido a que gran potencia se pierde en este sistema. El costo de inversión de este sistema, sin considerar la adición de baterías, es de 46.250 dólares, como se aprecia en la figura 34. Al analizar el sistema solar-eólico se observa que el costo para la implementación del sistema es muy alto con relación al sistema de almacenamiento de energía por medio de baterías.

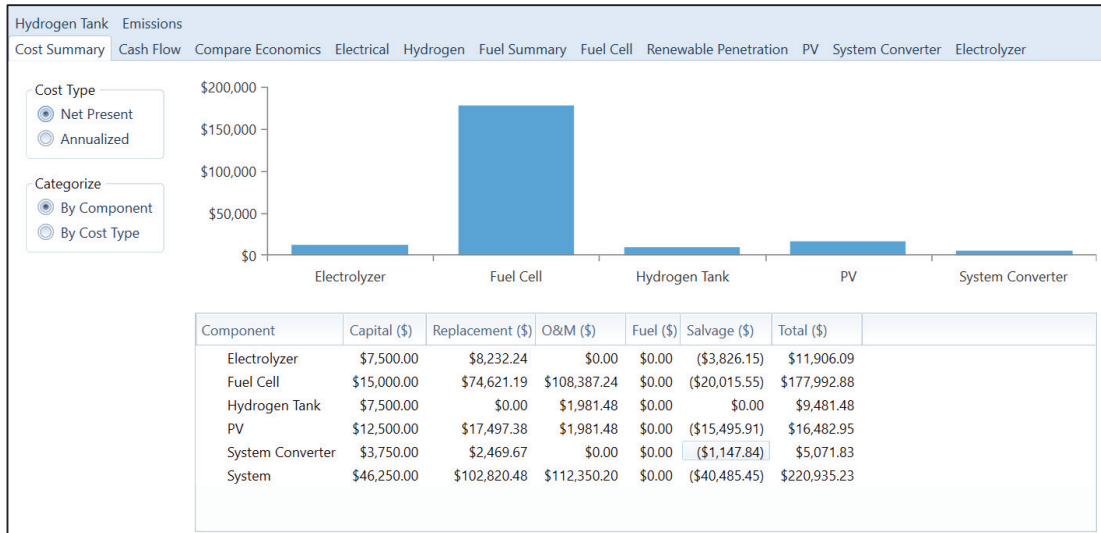


Figura 34. Costo de implementación del sistema solar más hidrógeno

#### 4.6.3.4 Sistema de almacenamiento de hidrógeno y pila de combustible más baterías

Para este caso, se adiciona un banco de baterías para evitar las fluctuaciones de potencia que entrega la pila de combustible. En la figura 35 se observa la configuración de este sistema.

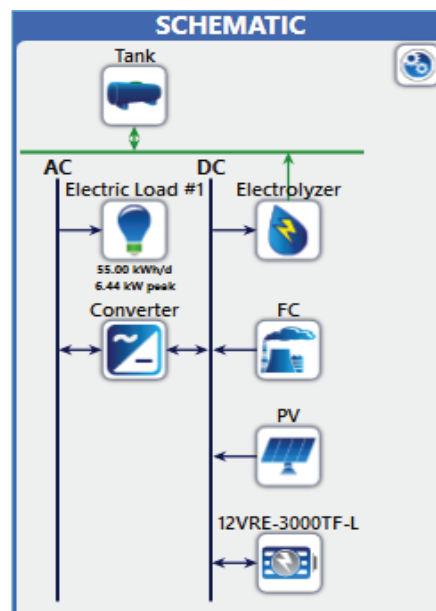


Figura 35. Almacenamiento H<sub>2</sub> – baterías



El valor de inversión inicial del sistema es de 14861.56 USD y el COE es de 0.11USD/kWh. A pesar de que la inversión es mayor que el COP y que disminuye debido a que la energía generada por el panel fotovoltaico no se utiliza para generar y almacenar el hidrógeno, la cantidad de hidrógeno producida es mucho menor en comparación a la configuración anterior.

La energía que no se destina al sistema de hidrógeno es almacenada directamente en las baterías. En la figura 36 se muestran los resultados de la inversión para la implementación de un sistema de almacenamiento por medio del hidrógeno y pilas de combustible, con la ayuda de un banco de baterías. La inversión inicial de todo el sistema es de 87500 USD y el COE es de 0.114 USD/kWh.

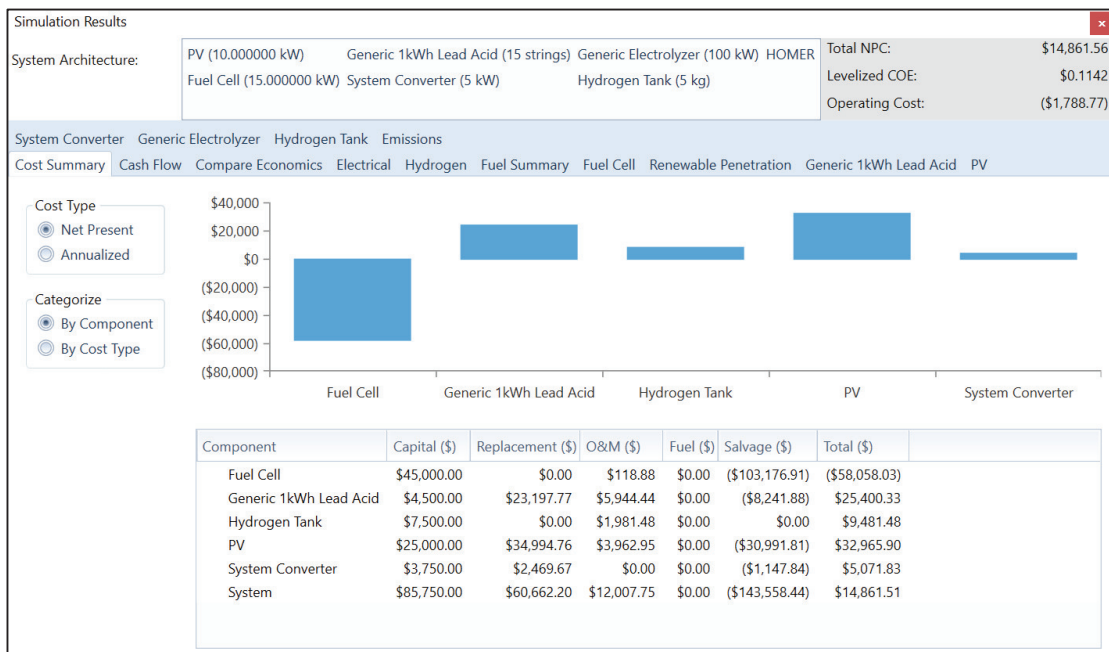


Figura 36. Costo de Inversión y COE

En la figura 37 se observa la generación de energía de la pila de combustible, que es un valor de 76 kWh/año. Al comparar este valor con el obtenido en el sistema que sólo utiliza el hidrógeno como vector energético, la potencia generada por la pila de combustible se reduce notablemente

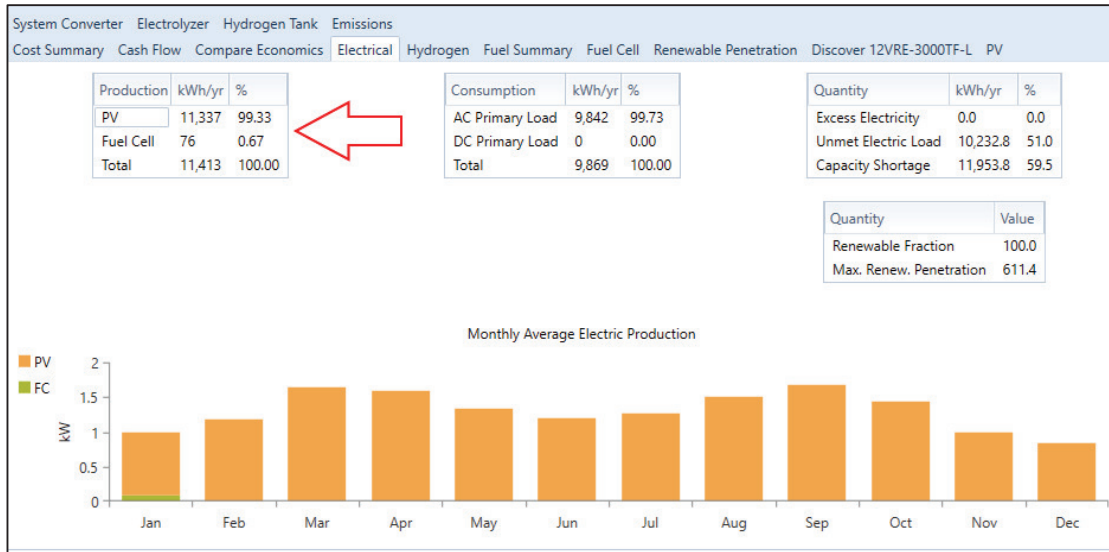


Figura 37. Disminución de la energía producida por el sistema de hidrógeno

Se realiza una comparación entre los sistemas que utilizan hidrógeno como sistema de almacenamiento y la adición de un banco de baterías, en la tabla 28 se muestra esta comparación.

Tabla 28

*Comparación almacenamiento de energía hidrógeno y baterías*

Ítem	Descripción	Solar + hidrógeno	Solar + hidrógeno + baterías	Porcentaje de aumento o disminución
1	COE (USD/kWh)	1.80	0.11	-93 %
2	Inversión inicial (USD)	46500	85750	48.24%
3	Exceso de electricidad (kWh/año)	5202	7300	28.74%
4	Generación PV (kWh/año)	11377	11366.7	-0.09%
5	Generación <i>Fuel Cell</i> (kWh/año)	1372	77	-93.7%
6	Hidrógeno producido (kg/año)	77	1	-93.7%
7	Salida de baterías (kWh/año)	-----	1347.62	-----
8	Rendimiento anual batería (kWh/año)	-----	1537.3	-----

En cada uno de los casos simulados, los costos de cada sistema son demasiado elevados al compararlos con el sistema de almacenamiento de energía por medio

de un banco de baterías, pues el costo se eleva un 137.7 %. Por este motivo, para la implementación del sistema de generación de energía renovable en la vivienda se selecciona un solo sistema fotovoltaico y un banco de baterías para abastecer la demanda energética de la vivienda social.

#### 4.7 ANÁLISIS DE GENERACIÓN Y ALMACENAMIENTO DE HIDRÓGENO

En cada uno de los casos se presenta una generación de hidrógeno baja, pero el consumo del mismo varía en función de si se utiliza o no un banco de baterías. Si el sistema no utiliza un banco de baterías, el consumo de hidrógeno mensual es 0.28kg/h para la generación de energía por medio de la pila de combustible.

Cuando se utiliza un banco baterías, el consumo es 0.23kg/h, sólo en el primer mes. En los meses posteriores, la energía ya no se almacena en los tanques de hidrógeno ya que, esta se almacena directamente en las baterías, lo que hace que el consumo (hidrógeno) y generación de energía por medio de la pila de combustible disminuya notablemente, ver tablas 29 y 30.

Tabla 29  
*Generación y consumo de H2*

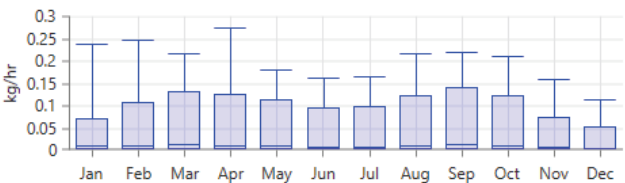
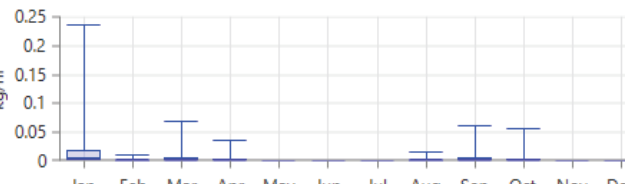
Ítem	Configuración	Consumo de H2	Tanque de almacenamiento
1	Solar + Sistema H2	77 kg/año	
2	Solar + Baterías + Sistema H2	1 kg/año	

Tabla 30  
*Comparación almacenamiento baterías vs. almacenamiento hidrógeno*

Ítem	Descripción	Solar + baterías	Solar + hidrógeno	Porcentaje de aumento o disminución
1	COE(USD/kWh)	0.53	1.8	90,54%
2	Inversión inicial (USD)	21850	86500	295.9%
3	Exceso de electricidad (kWh/año)	1300.5	0.6	-100%
4	Generación PV (kWh/año)	5688	11377	-20.75%
5	Generación Fuel Cell (kWh/año)	-----	1372	8.84%
6	Hidrógeno producido (kg/año)	-----	77	-----
7	Salida de baterías(kWh/año)	1281.6	-----	-----

El sistema de almacenamiento de energía por medio de banco de baterías es una tecnología muy utilizada y recomendada por sistemas de generación estacionarios.

En cambio, los sistemas de almacenamiento de energía por medio del hidrógeno y pilas de combustible es una tecnología que está empezando a ser desarrollada y no siempre puede ser usada debido a que utiliza una gran cantidad de energía en la producción y almacenamiento del hidrógeno. Cabe resaltar que el sistema no es estable (existen fluctuaciones en la energía entregada) y al ser una tecnología que aún está en experimentación, los costos de los equipos son muy altos al compararlos con sistemas de almacenamiento convencionales.

Por esa razón, en la actualidad no se recomienda el almacenamiento de energía en sistemas de hidrógeno y pilas de combustible.

Cabe señalar que los valores de costos utilizados en este documento, son estimaciones aproximadas de los precios actuales.

## CAPÍTULO 5

### SISTEMA DE CONTROL Y SEGURIDADES DE LA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE

En este capítulo se aborda el diseño de control y monitoreo de la plataforma para las variables a controlar dentro de la vivienda social sostenible, principalmente las de índole eléctrico como: corriente, voltaje y potencia que son fundamentales para mejorar el rendimiento de la vivienda. El principal problema es la gran cantidad de información que generan los instrumentos de medida. Se tiene en cuenta que cada instrumento debe estar conectado a internet para el manejo de la *Smartgrid* (conjunto de viviendas inteligentes conectadas a la red eléctrica).

Si se considera un conjunto de miles de viviendas interconectadas entre sí, todas están continuamente generando información que es usada para el control de la red eléctrica en general. El diseño de un sistema basado en tecnologías web representa una solución viable para superar este obstáculo, sin embargo, existen problemas técnicos asociados a la cantidad de conexiones, a las seguridades de las plataformas de control y a la comunicación en tiempo real. Tanto en el presente capítulo como en el siguiente, se presenta el desarrollo de una plataforma de control y monitoreo orientada a satisfacer las necesidades antes mencionadas. Dicha plataforma conforma una alternativa para la adquisición de datos en tiempo real.

#### 5.1 DISEÑO Y FABRICACIÓN DEL COMPONENTE BASE DEL SISTEMA DE CONTROL EN LA VIVIENDA

Los datos recolectados por la vivienda provienen de toda la instrumentación instalada dentro del hogar, dicha información corresponde a cada componente o sensor que tiene asociado consigo un *Arduino*. Este permite la captura de la señal (sensor de la variable a controlar) que debe ser normalizada en forma de trama para que sea enviada al *Raspberry Pi*, el cual se encarga de establecer una conexión segura con la aplicación servidor (control remoto, encargado de recolectar la información de una cantidad determinada de vivienda).

### **5.1.1 VARIABLES FÍSICAS**

Antes de establecer los elementos de adquisición de datos se debe tener en cuenta la naturaleza de las variables a monitorear. Dichas variables corresponden al ámbito físico, es decir aquellas que no son discretas. Dentro de la vivienda sostenible se consideran las siguientes variables:

#### **5.1.1.1 Variables asociadas al sistema de hidrógeno**

- Temperatura.
- Presión de almacenamiento de hidrógeno.
- Presencia de hidrógeno en el ambiente, detección de la variación de la impedancia del aire con respecto a la presencia de hidrógeno.

#### **5.1.1.2 Variables asociadas al sistema eléctrico**

- Voltaje de red.
- Corriente de red.
- Potencia de la red (implícito en las dos anteriores).

El sistema debe estar orientado al control de cualquier tipo de variable por lo que se debe considerar una inclusión adicional de elementos primarios (sensores) a la plataforma de monitoreo. Por consiguiente, la plataforma de control está direccionada a la adquisición de datos de cualquier variable normalizada (discreta en un rango de 0 a 1024).

## **5.2 SELECCIÓN DE ELEMENTOS PARA LA PLATAFORMA DE MONITOREO**

Los elementos que conforman el sistema de monitoreo deben cumplir con características mínimas, principalmente de precio y de integración. Se consideran diferentes tecnologías disponibles en el mercado como PLC y sistemas microcontrolados. Al ser conectados directamente a internet, sirven como clientes en la conexión. Estos elementos fueron seleccionados mediante una discriminación sistemática de sus características, acceso en el mercado local y el precio de comercialización.

### 5.2.1 GENERALIDADES DEL HARDWARE

A continuación, se establecen las entradas o requerimientos de hardware para el sistema de monitoreo de la vivienda social sostenible. Estos proporcionan la información básica para el diseño del elemento de adquisición de datos y la plataforma de control, tabla 31.

Tabla 31

#### *Generalidades del hardware*

Ítem	Descripción	Requerimiento
1	Tensión de operación	de 110/220/440 VAC
2	Tensión de control	5/12/24 VDC
3	Control	PLC Tarjetas de adquisición de datos Tarjetas de control TCP/IP
4	Comunicación	Serial RS 232 Profinet
5	Variables análogas	Mínimo 1 Máximo n
6	Señales digitales	5/12/24 VDC 110/220 VAC
7	Tipo de salidas de control	Análoga Digital RELÉ
8	Salidas de control	Transistorizadas Opto acopladas Entradas: 0-5VDC, 0-10VDC, 4-20mA, PWM.
9	Ámbito analógico	Salidas: 0-5VDC, 0-10VDC, 4-20mA, PWM Temperatura, consumo eléctrico, luminosidad, potencia suministrada por sistemas de generación de energía, consumo de los electrodomésticos de la vivienda.
10	Variables de control	
11	Tipo de Control	Lazo abierto Lazo Cerrado
12	Nivel de automatización	de Nivel 2: Supervisión
13	Intervención humana	1
14	Tipos de sensores	Análoga Digital (PNP)
15	Seguridad	Obligatorio
16	Cableado	AWG
17	Calibre cableado	16-18 AWG Control 10-20 AWG Potencia Cable para instrumentación, apantallado y encauchado.

18	Acometida	De ser necesaria
19	Tablero	De ser necesario

### 5.2.2 REQUERIMIENTOS TÉCNICOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Para la adquisición de datos se tienen en cuenta las siguientes características:

#### *Tarjeta de adquisición de datos*

- Entradas análogas y digitales
- Conversor análogo digital resolución 10 bits como requerimiento mínimo.

#### *Alimentación de fuente*

- 24 VDC
- 110/220 VAC, línea más neutro o bifilar

#### *Funciones a realizar*

- Control
- Comunicación
- Adquisición de datos

#### *Restricciones de uso*

- PLC o DAQs.
- Programación (Esquema de contactos, Listado de instrucciones, Gemma, Grafcet).
- Comunicación (TCP/IP).

### 5.2.3 ELEMENTOS PARA LA ADQUISICIÓN DE DATOS

Elementos básicos como *Arduinos* y *PLC* (Controlador Lógico Programable) son necesarios para la adquisición de datos en tiempo real; es decir que la vivienda social sostenible está compuesta de micro-sistemas interconectados unos con otros por medio de internet. Estos sistemas deben tener como objetivo el controlar una sola variable dentro de la vivienda o sólo monitorear dicha variable.

A continuación, las tablas 32 y 33 presentan la ponderación para la discriminación sistemática de las tarjetas de adquisición que a su vez determina el punto de partida de la arquitectura enfocada al control.



Tabla 32

*Características de selección de adquisición de datos*

Ítem	Dispositivo	Disponibilidad en el mercado	Desempeño	Precisión	Conexión	Compatibilidad	Total
1	Arduino	10	5	5	8	10	38
2	PLC	10	10	8	5	5	38
3	MyRio Daq	5	10	8	8	5	36
4	Freedom	3	5	5	5	3	21

0 = Pésima  
 3 = Regular  
 5 = Buena  
 8 = Muy Buena  
 10 = Excelente

Tabla 33

*Comparación de costos y soporte*

Ítem	Dispositivo	Costo	Costo de Reparación	Costo acceso al soporte	Total
1	Arduino	2	2	2	6
2	PLC	10	10	2	22
3	MyRio Daq	10	8	5	23
4	Freedom	2	2	10	14

2 = Bajo  
 5 = Medio  
 8 = Intermedio  
 10 = Alto

De acuerdo a las tablas anteriores, *Arduino* es la mejor solución para la implementación del sistema de control y adquisición de datos porque tiene una mejor puntuación respecto a los demás dispositivos mencionados. Los componentes compatibles con la arquitectura *Arduino* son los siguientes:

- *Arduino* (Microcontrolador).
- *Raspberry pi* (CPU).

- Elementos entradas y salidas digitales: tarjeta de *relays* o contactores, indispensables para activar o desactivar los elementos de control de cada variable.

Se puede considerar una opción alternativa el uso de *PLC*. Principalmente, por la masificación de este producto en el mercado.

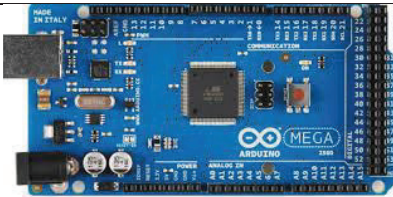

A continuación, se presentan las características de cada uno de los elementos de control involucrados en la arquitectura.

#### 5.2.4 ESPECIFICACIONES DE CONTROL

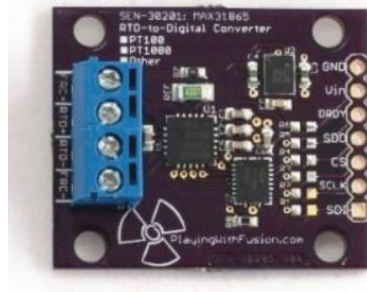
Los elementos mencionados a continuación son elegidos por la arquitectura que propone el fabricante *Arduino*. La disponibilidad en el mercado y el precio al público. La tabla 34 resume las especificaciones basadas en la arquitectura compatibles con *Arduino*.

Tabla 34

##### *Especificaciones de los componentes del sistema de control*

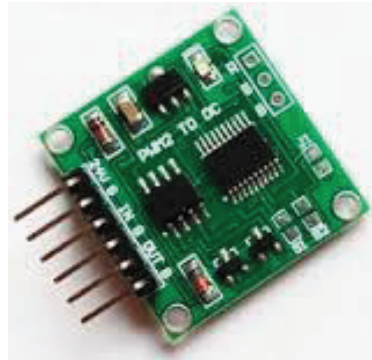
Ítem	Imagen	Descripción
1		<p>Arduino: Atmega2560-16AU            Voltaje de entrada: 6 a 20 voltios DC.            Entradas y salidas digitales: 54 configurables.            Entradas análogas: 16, 10 bits de resolución.            Corriente por cada pin: 40 mA.            Memoria flash: 256 KB.            Sistema operativo: multiplataforma.</p>
2		<p>RASPBERRY PI 2 Modelo B.            Voltaje de entrada: 5 voltios DC.            Memoria RAM: 1GB.            CPU: Quad Core.            Sistema operativo: multiplataforma (<i>Raspbian</i>).</p>

3



Módulo de temperatura: *MAX31865 RTD*  
 Modulo para PT100 (Transductor de temperatura)  
 Entrada: RTD PT 100.  
 Salida: normalizada 0 a 5 voltios.  
 Compatibilidad: Arduino.

4



Convertidor corriente a voltaje  
 Campo de conversión: 4-20mA to 0-5V  
 Entrada: 4 a 20 mA.  
 Salida: 0 a 5 voltios.  
 Compatibilidad: Arduino.

5



Medidor de consumo eléctrico  
 Tensión nominal: 120V ~ 60Hz  
 Mínimo de medición de corriente: 0.02 A  
 Medir la tensión: 110-130V (precisión: + / -3% del valor medido).  
 Corriente de medición: 0,00 ~ 16.00A (precisión: + / - 3% del valor medido + / - 0,03 A).  
 Energía de medición de uso: 0 ~ 3680W (precisión: + / -5% del valor + / -10 VA)

6



Sensor: Hidrógeno  
 Rango: MQ – 8, 100 – 10000 ppm.  
 Salida analoga: 0 a 5 voltios DC.  
 Resistencia: 33 Ohm +- 5%  
 Temperatura de uso: -20 a 50 C.  
 Humedad relativa: 95% Rh

7



Módulo de salidas tipo relay  
Entrada: 5 VDC.  
Salida: 10 Amperios.  
Lógica: inversa y directa.  
Compatibilidad: Arduino.

Los componentes descritos anteriormente son la base para el elemento de adquisición de datos que se describe a continuación.

### 5.2.5 REALIZACIÓN DEL COMPONENTE DE ADQUISICIÓN DE DATOS

A partir de la selección de *Arduino* y los componentes compatibles (arquitectura), se dimensionan los requerimientos necesarios para cumplir las necesidades del elemento de adquisición de datos. Se consideran las siguientes características:

- Conexión a internet.
- Robustez para soportar ambientes agresivos.
- Procesamiento de señales (analógicas o digitales) provenientes de la adquisición de datos del medio (instrumentación).
- Facilidad de construcción.
- Capacidad de control de variables (accionar elementos o dispositivos).

En la realización de la “Tarjeta de Adquisición de Datos y Procesos” (TAD&P), se considera lo siguiente:

- Únicamente podrán soportar entradas 0 a 12 voltios (opto-aislada).
- Las salidas son por relé y cantidad máxima 6.
- La placa no posee fuente de alimentación (opcional).
- La placa usa una conexión al PC para transmisión de datos al *Router* o enrutador.

- Cuenta con 4 entradas analógicas de 0 a 5 voltios (estándares industriales de 4-20mA).
- No posee salidas analógicas
- No posee reloj interno.
- Basado en *Arduino UNO*.

El *Arduino UNO* es un dispositivo de arquitectura abierta que posee una comunidad grande y activa, lo que permite el desarrollo de prototipos de complejidad media.

La versión 1.0 del prototipo, tal y como muestra la figura 33, debería asegurar los objetivos de adquisición de datos en tiempo real y la transmisión de la información.

Los problemas asociados principalmente al tamaño de placa TAD&P es considerablemente grande en comparación con las capacidades de cómputo que posee el componente. Su diseño está basado en mono-capa (*single-layer*), sólo se pueden poner pistas superficiales en un único lado de la cara de la placa lo que requiere más área superficial para fijar los componentes. Tras el análisis del primer prototipo se realiza una segunda versión de la placa tomando en cuenta los aciertos de la primera, se compacta el tamaño de la placa TAD&P mediante la reducción de las pistas conductoras, se sitúa la disposición de la placa con el *Arduino UNO* para que ambas tengan dimensiones similares por lo que obtiene una reducción de tamaño con respecto a la primera versión.

La figura 38 expone las características alcanzadas con la disposición de la arquitectura planteada.

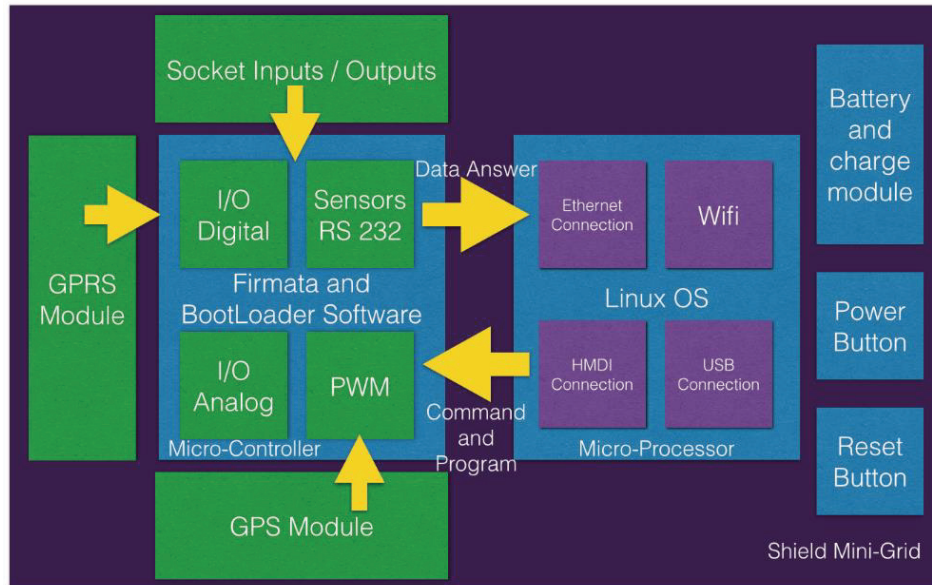


Figura 38. Esquemas de posición de componentes

En la segunda versión se incorpora la CPU (Unidad de Proceso y Control) *Raspberry Pi*. La división en dos componentes de la TAD&P (*Arduino* y *Raspberry Pi*) logra que el primero de ellos se asocie al monitoreo y el segundo a la comunicación de tal forma que se obtiene un sistema distribuido. La razón principal es debido a los tiempos de ejecución de las instrucciones y evitar la realización de múltiples procesos en el microcontrolador (*Arduino*).

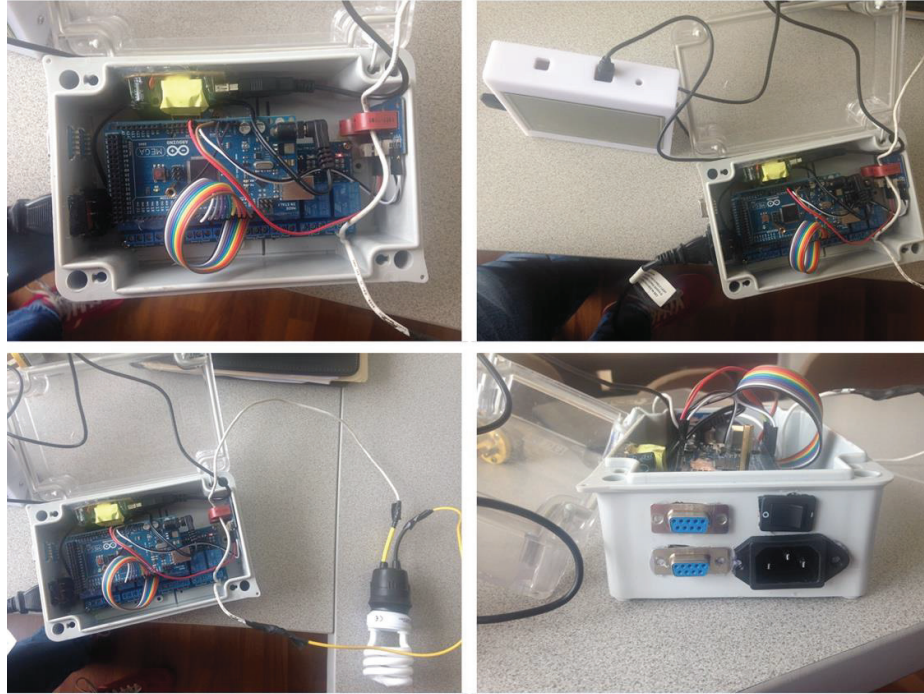


Figura 39. Primer prototipo de adquisición de datos de la vivienda

En la figura 39 se muestran las imágenes del segundo prototipo funcional de la TAD&P. Este modelo consta de un controlador basado en *Arduino Mega 2560* y un *Raspberry Pi*, maximizando las capacidades de computo del *Arduino UNO* de la primera versión. La incorporación de sensores normalizados con señales de salida en rangos 4-20 mA y 0-5V.

A partir de la incorporación del *Raspberry Pi* a la TAD&P deja de ser un dispositivo de adquisición y se convierte en un dispositivo con las prestaciones necesarias para ejercer un control autónomo sobre diferentes variables ya mencionadas.

### 5.3 INSTRUMENTACIÓN VIRTUAL PARA ADQUISICIÓN DE DATOS EN TIEMPO REAL

La instrumentación virtual permite centralizar la visualización de las variables, en este caso de la VSS. En procesos muy puntuales, la instrumentación se hace de manera local. En el caso de las *Smartgrid* analizar cada variable de manera independiente y en tiempo real es una tarea casi imposible de solventar con la

instrumentación local o convencional. Este problema intenta solventar la instrumentación virtual. Uno de los problemas que enfrenta este tipo de sistemas son las altas concurrencias en la red, es decir, la cantidad de elementos conectados. Como principal consecuencia es la latencia de la información. En esta sección se plantea una arquitectura o topología que solvente este inconveniente, para obtener información en tiempo real de las variables involucradas en la VSS.

A continuación, se establecen las necesidades que debe suplir el sistema de control en tiempo real.

- Precisión en la medida obtenida.
- Exactitud, la medida sea la correcta.
- Repetitividad, la medida debe permanecer en el tiempo.
- Trazabilidad, la visualización en el tiempo de la medida.
- Continuidad, evitar la pérdida de información de la medida.

Para las variables de monitoreo se deben tener en cuenta las anteriores consideraciones, motivo por el cual se establecen los siguientes criterios de adquisición de datos:

- Criterio de muestreo (cada cuanto se toma la medida).
- Criterio de toma de datos (cuál es la información relevante a transmitir).
- Tiempo de toma de datos (síncrono o asíncrono).
- Importancia de la variable.

Todos estos criterios determinan el flujo de los datos con la finalidad de determinar el tráfico de información que se genera dentro de la vivienda social sostenible y por ende el tráfico de la red.

### **5.3.1 FLUJO DE LA INFORMACIÓN**

El flujo de la información representa una importancia dentro del sistema ya que determina la latencia de la información, lo que afecta principalmente a los requerimientos de control en tiempo real y a los criterios de adquisición de datos. La figura 40 presenta esquemáticamente el flujo de la información desde los sensores hasta la aplicación servidor.



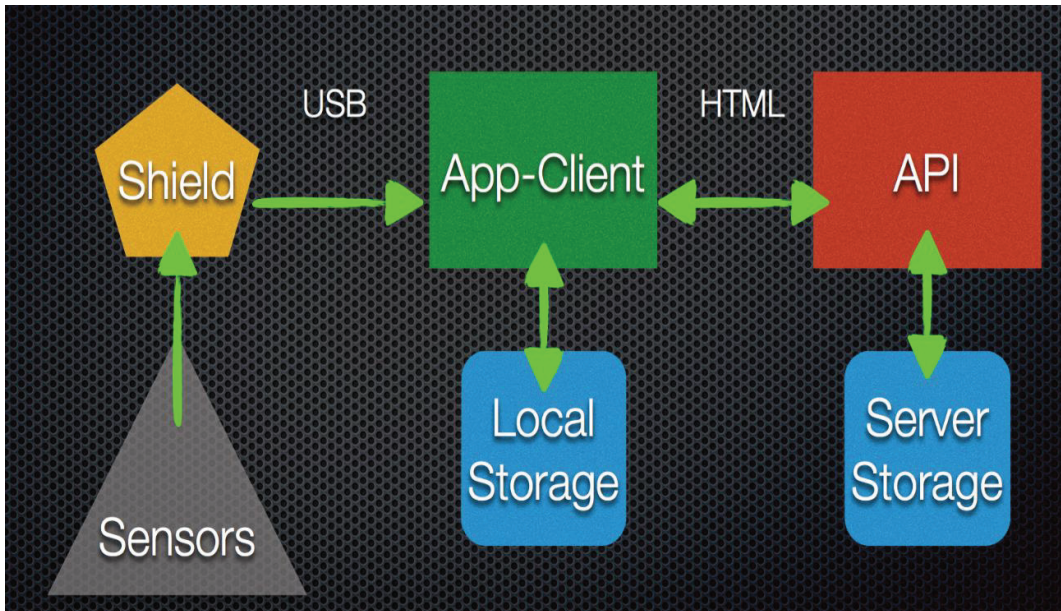


Figura 40. Diagrama de flujo de información

#### 5.3.1.1 Sensor

Captura la medida de la variable, esto depende de la exactitud, precisión, repetitividad y trazabilidad de la medida. Con respecto al esquema de control, la información que entrega el sensor debe mantenerse igual todo el tiempo posible. El tiempo de muestreo de la variable depende principalmente de la tarjeta de adquisición (*16 MHz según el fabricante*). En el caso expuesto, la selección del sensor depende directamente de la arquitectura propuesta, en este caso de los 10 bits de resolución que posee el conversor análogo digital de la entrada del *Arduino*, por consecuencia, todas las medidas entregadas por el TAD&P están en un rango de valores de 0 a 1023 puntos.

Cada variación de 0 a 5 voltios del sensor, el *Arduino* escala de 0 a 1023 (números enteros) en la medida. Se infiere que la resolución es una relación directa entre la medida entregada por el sensor y la conversión del análogo digital del *Arduino*. Por tanto, la relación  $5/1024$  corresponde a los incrementos del conversor, es decir cada 0.005 voltios se incrementa una unidad la resolución en el *Arduino*. Se puede considerar que los sensores que posean una resolución mayor (56) que la indicada ( $>0.005$  voltios) son un desperdicio de recursos. Para el caso de la vivienda social

sostenible la relación de 2R o dos veces la resolución (0.01 voltios) es satisfactoria, debido a la naturaleza de las variables físicas.

$$\text{Resolución sensor}(R_s) = \frac{\text{voltaje máximo de entrada análoga}}{\text{resolución conversor análogo digital}} \quad (64)$$

$$R_s = \frac{5 \text{ voltios}}{2^{10}}$$

$$R_s = \frac{5}{1024} = 0.005 \text{ (voltios/incremento)}$$

De acuerdo a lo anterior, cualquier sensor con una resolución entre (0.005 a 0.01 voltios por incremento) satisface las necesidades de la arquitectura propuesta. Datos que se verifican en las hojas de características de los componentes seleccionados anteriormente en la sección 5.2.4.

### 5.3.1.2 Tarjeta de adquisición de datos TAD&P

Es la encargada de la digitalización de las señales de entrada (variables físicas). Además, transmite la información organizada en tramas al *Raspberry Pi* (ver sección 5.4). Dicha transmisión se realiza de manera síncrona (se repite una cantidad de tiempo constante). La comunicación serial va desde 110 baudios (bits por segundo) hasta 921600 baudios (estándar IEEE 488). Problemas a pérdidas de información se relacionan directamente con velocidades altas de transmisión. Una tasa baja de transmisión crearía una latencia considerable. Las consideraciones del sistema limitan la adquisición en tiempo real de 100 milisegundos, por consiguiente, una velocidad de transmisión recomendada es 9600 baudios. La estabilidad conseguida con esta velocidad es alta (la recomendada por el fabricante *Arduino*). De igual manera, la tasa mencionada cumple con el objetivo planteado y resuelve el problema de latencia.

En la ecuación (65), considerando 9600 bits por segundo, en 100 milisegundos se transmiten 960 bits, cantidad suficiente para cumplir el objetivo de leer 4 entradas análogas con una resolución de 10 bits, incluidos los demás parámetros de la trama.

$$\text{Velocidad transmisión (ms)} = 9,600 \frac{\text{bits}}{\text{s}} \times \frac{1 \text{ s}}{1000 \text{ ms}} = 9.6 \left( \frac{\text{bits}}{\text{ms}} \right) \quad (6516)$$

Bits en 100 milisegundos:

$$bits_{100\ ms} = 9.6 \times 100$$

$$bits_{100\ ms} = 960\ bits$$

Finalmente, cada paquete de información serial contiene un número total de 10 bits, de los cuales dos bits corresponden de inicio y parada. La trama de información contiene 376 bits (peso de la trama), ver (66), por tanto, idealmente le toma 40 milisegundos enviar la información. Situación contemplada en el mejor de los casos.

$$Peso\ trama = 47\ (character) \times 8 \left( \frac{bits}{character} \right) \quad (6617)$$

$$peso\ de\ trama = 376\ bits$$

### 5.3.1.3 Cliente

La aplicación cliente se encarga de recibir la información proveniente de la tarjeta de adquisición de datos, la transforma en formato JSON (*JavaScript Object Notation*) y crea una conexión bidireccional asíncrona con el servidor (programa que corre en un computador remoto). La importancia del cliente es determinar el cambio en las variables entregadas por la adquisición de datos. Cuando una variable cambia de orden, el cliente notifica al servidor dicha variación, de esta forma, el sistema logra mantener una conexión asíncrona en síncrona. No obstante, al solucionar el problema de la latencia, el problema de concurrencia continúa persistente. Situación presentada por múltiples conexiones a un mismo puerto en el lado del servidor. Para solventar el servidor debe gestionar dicha información, de la forma que se explica a continuación.

### 5.3.1.4 Servidor

El servidor es la aplicación que controla la información proveniente de múltiples clientes.

El capítulo 6 trata en profundidad la realización del software para la realización de la plataforma y en específico, del servidor. Sin embargo, esta sección explica el comportamiento del programa que fue desarrollado para solventar los inconvenientes presentados por la concurrencia del sistema.

Considere miles de clientes (aplicación) enviando información a un solo servidor, el tráfico en la red retardará la conexión. Lo ganado en solventar la latencia se verá realmente afectado por la concurrencia. Por este motivo, gana importancia la solución presentada en este proyecto.

En primer lugar, la conexión debe ser definida bajo un indicador para lo cual cada cliente es marcado con un identificador único, diferente a la IP propia de la conexión. La información de múltiples clientes es multiplexada en una sola conexión para ser analizada por el servidor como un solo hilo. En el momento en que se sobrepase de tiempo la información en ser atendida, de forma automática se crea un hilo paralelo que alivia la carga de la conexión, de esta forma se pueden atender el problema de concurrencia.

## **5.4 TRANSMISIÓN DE DATOS Y PROTOCOLOS DE COMUNICACIÓN**

Un sistema de transmisión de datos se constituye en el canal que permite la transmisión de información entre dos terminales o más terminales. Para transmitir información entre los elementos de adquisición de datos se hace necesario la instalación previa de redes. Para la transmisión de datos, es necesario tener en cuenta los siguientes elementos como requerimientos del sistema:

- Elementos Hardware: Se basa en componentes finales e intermediarios o equipos inalámbricos y cableados. En este caso el *Arduino* y el *Raspberry pi*.
- Elementos Software: Programas que se basan en la administración y funcionamiento entre hardware y usuarios finales. Es decir, cada elemento de adquisición se encuentra conectado a la red y de esta se exportan los datos a internet, lo que permite que el sistema de control determine el funcionamiento de la red eléctrica y las variables físicas que se involucran en la VSS.

Para que la transmisión de datos sea posible los dispositivos de comunicación deben ser parte de un sistema de comunicación formado por *Hardware* y *Software*. La efectividad depende de:

- Entrega: dispositivo correcto, identificación del dispositivo.
- Exactitud: datos sin alterar, en el transcurso de la comunicación.
- Puntualidad: sin retardos considerables en la transmisión de datos (100 ms).
- Retardo variable *Jitter*: es el cambio o variación referente a la cantidad de latencia entre paquetes de datos que se reciben, también llamado retardo de la conexión.

En esta sección, se toman en cuenta las principales tecnologías que se deben usar para la transmisión de datos en la plataforma. Para determinar las ventajas y desventajas del sistema de comunicación se debe considerar lo siguiente:

- Uso de *Ethernet* en todos los niveles de automatización dentro de la VSS, es decir cada componente debe tener una conexión directa (cliente) por medio de una conexión TCP/IP.
- Incremento del uso de estándares en automatización, basados en tecnologías ya existentes y probadas.
- Velocidad de transmisión y criticidad de la información de las señales adquiridas, es decir que todas las señales de adquisición de datos y las respuestas de control tienen que ser en tiempo real. Para ello, el estándar industrial (IEC) determina un tiempo menor a 100 milisegundos de retardo.

#### **5.4.1 FAMILIA DE PROTOCOLOS**

La denominación *TCP/IP* recoge la descripción de una serie de protocolos, la topología y la arquitectura que sirven de base para una red de área extensa (*WAN*) como es el caso de internet.

Entre los protocolos descritos bajo esa denominación se encuentran el *IP (Internet Protocol)* y el *TCP (Transmission Control Protocol)* junto con varios más. Todos ellos sirven de soporte a un conjunto de aplicaciones y servicios de aplicación muy conocidos por su utilización en internet.

La descripción de todos los elementos que forman parte de la arquitectura *TCP/IP* y la mayor parte de las aplicaciones que hacen uso de ella se encuentran recogidos como estándares. *RFCs (Request For Comments)*.

### 5.4.2 DIRECCIONES IP Y ENCAMINAMIENTO MEDIANTE ROUTERS

Para hacer un sistema de comunicación universal que permita la integración de componentes a la red para cumplir con los objetivos de adquisición de datos en tiempo real se necesita un método de identificar los elementos de adquisición de datos. Cada elemento (*Arduino + Raspberry pi*) tendrá su propio identificador como dirección *IP* o dirección de Internet. En el caso de la VSS cuenta con múltiples *Raspberry Pi* distribuidos en toda la vivienda, estos micro-computadores se conectan directamente a internet por medio del protocolo explicado en este capítulo.

Las direcciones *IP* se representan como cuatro enteros decimales separados por puntos donde cada entero da el valor de un octeto de la dirección. En la figura 41 se observan las codificaciones de las direcciones *IP*.

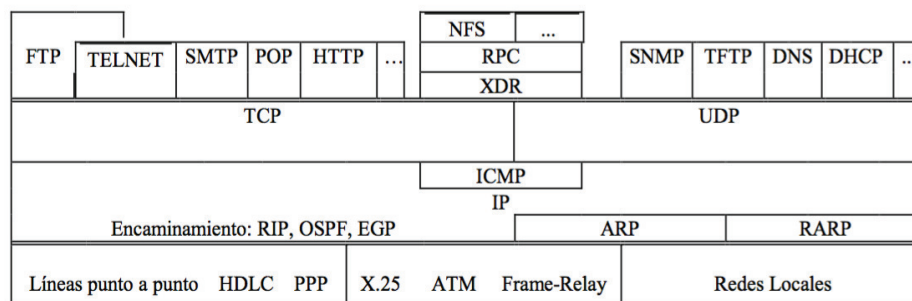


Figura 41. Direcciones IP y encaminamiento. ISA redes y ordenadores, 2011.

### 5.4.3 PROTOCOLO PROFINET

Para la selección del protocolo de comunicación se escoge bajo estándares establecidos por normas internacionales. En este caso *PROFINET*, es el protocolo de comunicación estándar de código libre para elementos de instrumentación conectados a la red de internet los cuales cumplen requerimientos de tiempos mínimos de retardo. Por lo general menor a 100 milisegundos. *PROFINET* es el estándar abierto de *Ethernet* Industrial de la asociación Internacional de *PROFIBUS (PI)* (según IEC 61784-2).

- Está basado en *Ethernet* Industrial.

- Utiliza *TCP/IP* y los estándares *IT* (Tecnología de la Información y Comunicación).
- Es *Ethernet* en tiempo real, para la adquisición y transmisión de datos a la plataforma de control.
- Permite una integración homogénea de los sistemas de bus de campo (elementos conectados a la red).

Las ventajas de usar *PROFINET* como protocolo son:

- Comunicación en tiempo real.
- Dispositivos descentralizados en el campo. Eliminación de islas en la topología de la vivienda social sostenible.
- Control en lazo cerrado, debido a los tiempos cortos de comunicación.
- Automatización descentralizada.
- Instalación en la red (cada dispositivo se conecta directamente a internet).
- Estándares *IT* y seguridad de acceso a red.

*PROFINET*, ofrece un acceso transparente a la vivienda social con servicios estándares remotos incluyendo el mantenimiento, diagnóstico, parametrización (puesta en marcha) y cambios de programa.

Además, también abarcan tiempos de parada menores y aumento de la eficiencia en el mantenimiento. Comparado con los sistemas de bus de campo actuales, *PROFINET* permite la conexión de más nodos en relación a otros protocolos. Su rendimiento se incrementa hasta 100 veces en control de movimiento, acceso a los datos con herramientas estándares de oficina, comunicación sin cable con “*Wireless LAN Industrial*”.

Para la integración de *PROFINET*, cada dispositivo compuesto por *Arduino* y *Raspberry Pi* cuenta con la configuración del protocolo de comunicación cumpliendo con los requerimientos establecidos en el subtítulo 5.2.

#### **5.4.4 MODOS DE TRANSMISIÓN**

Par mejorar el rendimiento de la comunicación basada en *Ethernet* existen tres modos de transmisión que deben implementarse en el control. Son:

- Transmisión acíclica sin prioridad de tiempo (NRT) (TCP/IP).
- Transmisión de datos cíclica con prioridad de tiempo (RT).
- Transmisión de datos isócrona en tiempo real (IRT).

En la figura 42 se muestra el rendimiento de la comunicación PROFINET.

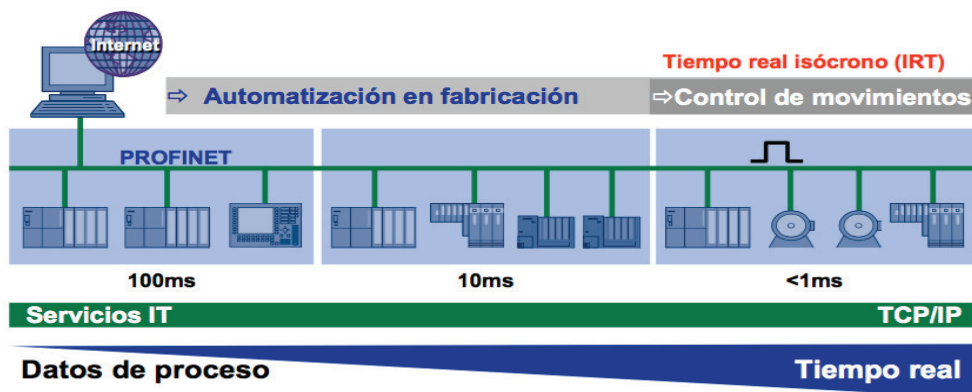


Figura 42. Rendimiento de la Comunicación PROFINET. PROFINET Technology, 2015.

La velocidad y dispersión de la señal determinan la calidad de la transmisión de los datos en la red. La figura 43, relaciona los protocolos de transmisión de datos *PROFINET* (IRT, RT, TCP/IP) versus el tiempo de reacción y se observan los tiempos de reacción en milisegundos.

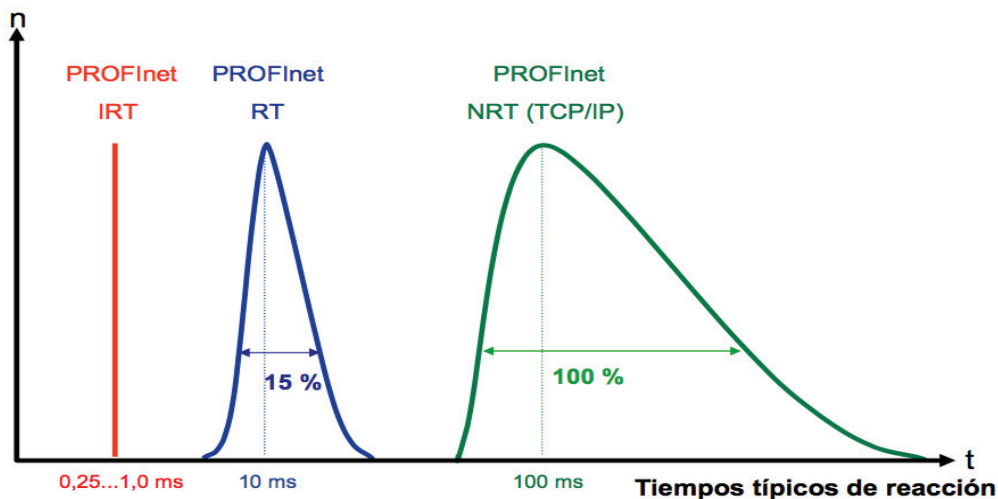


Figura 43. Tiempos de reacción del protocolo PROFINET. ISA redes y ordenadores, 2011.



### 5.4.5 STACK DE COMUNICACIONES RT

La comunicación *RT* puede realizarse con cualquier controlador *Ethernet* como se determina en la figura 44, teniendo en cuenta todos los canales de comunicación.

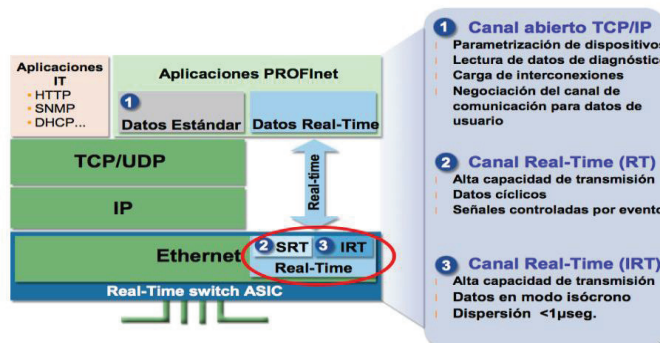


Figura 44. Stack de comunicaciones en tiempo real (RT)

Profinet Technology, 2014.

## 5.5 TRAMA DE ENVÍO DE LA INFORMACIÓN

Finalmente, la información se debe empaquetar en tramas, de este modo se organiza la información, se estandariza y las operaciones en la aplicación se simplifican notoriamente. Principalmente en la forma de cómo se discrimina la información.

La información se organiza bajo el estándar: *Standard ECMA-262 3rd Edition - December 1999*, conocido bajo el nombre de *JSON (JavaScript Object Notation)*. Dicho estándar, comparado con el *XML (Xtensible Markup Language)* es mucho más entendible y orientado a bases de datos no relacionales. Permite un tratamiento más transparente en tecnologías web.

La siguiente tiene como objeto presentar la estructura de la trama de comunicación.

{Entrada(I). Número de entrada (#): Valor (Binario)} → Discrimina la entrada que cambia en la tarjeta de adquisición.

{Salida(S). Número de la salida (#): Valor (Binario)} → Discrimina el valor en que se encuentra la salida.

{Entrada Análoga(IA). Número de la Entrada análoga (#): Valor Entero} → Discrimina la entrada análoga que cambia en la tarjeta de adquisición de 0 a 1024.

<,> → Separador de trama.

<&> → Inicio de trama.

</&> → Fin de trama.

### 5.5.1 ARMADO DE LA TRAMA

La siguiente imagen presenta el armado de la trama. En el caso de la trama enviada por *Arduino* es la siguiente estandarización de los pines, por lo que tendría la siguiente apariencia (código fuente).

```
{
  E:{          // Estado de las entradas digitales [estados binarios]
    I1 : 1,    // Estado de la entrada 1 -> [pin 12]
    I2 : 0,    // Estado de la entrada 2 -> [pin 11]
    ... : ..,
    ... : ..,
    ... : ..,
    I[n]: ..   // Estado de la entrada n -> [pin "n"]
  },
  S:{          // Estado de las salidas digitales [estados binarios]
    Q1 : 0,    // Estado de la salida 1 -> [pin 2]
    Q2 : 1,
    ... : ..,
    ... : ..,
    ... : ..,
    Q[n]: ..   // Estado de la salida n -> [pin "n"]
  },
  IA:{        // Estado de las entradas análogas [estados 0-1024]
    IA1 : 444, // Estado de la entrada análoga 1 -> [pin A0]
    IA2 : 0.00,
    ... : ..,
    ... : ..,
    ... : ..,
    IA[n]: ..  // Estado de la entrada análoga n -> [pin "n"]
  }
}& // Indicador de fin de trama
```

## 5.6 COSTO DE EQUIPOS UTILIZADOS EN EL SISTEMA DE CONTROL

El costo de los elementos de control, módulos compatibles con Arduino y el ensamble del sistema se discrimina en la tabla 35.

Tabla 35

*Costo de componentes del sistema de control*

Ítem	Descripción	Costo USD
1	Arduino	\$40.00
2	Raspberry Pi	\$70.00
3	Módulos	\$150.00
4	Ensamble e instalación	\$ 350.00
	Total	\$610.00

## CAPÍTULO 6

### SOFTWARE DESARROLLADO

#### 6.1 ARQUITECTURA DEL SISTEMA PROPUESTO

El presente capítulo, tiene como objetivo presentar la arquitectura y los criterios en la realización del software de control y monitoreo para la VSS. La arquitectura es un conjunto de elementos que describe la funcionalidad, desempeño, usabilidad, modificabilidad y estructura del programa.

Para la realización del software se debe tomar en cuenta muchos factores que afectan la selección de herramientas, entre ellas el tipo de plataforma, sistema operativo y estructura.

Para desarrollar un software de control y monitoreo se debe estructurar las necesidades básicas a suplir por la aplicación. La figura 45 presenta los requerimientos respectivos a la estructura de la plataforma.

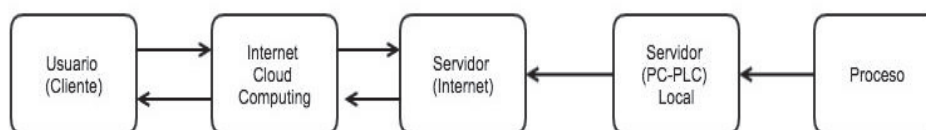


Figura 45. Diagrama de estructura de la arquitectura

Para la realización de un sistema distribuido y descentralizado el cual es requerido por la naturaleza del problema. En primer lugar, se considera la aplicación que debe ser basada en la web. Consideraciones que serán detalladas a continuación.

##### 6.1.1 PROCESO

Para cumplir con requerimientos de control, figura 46, el sistema debe presentar los siguientes módulos:

- Comunicación
- Diseño del entorno gráfico (histograma o panel de instrumentación)

- Visualización del histograma.

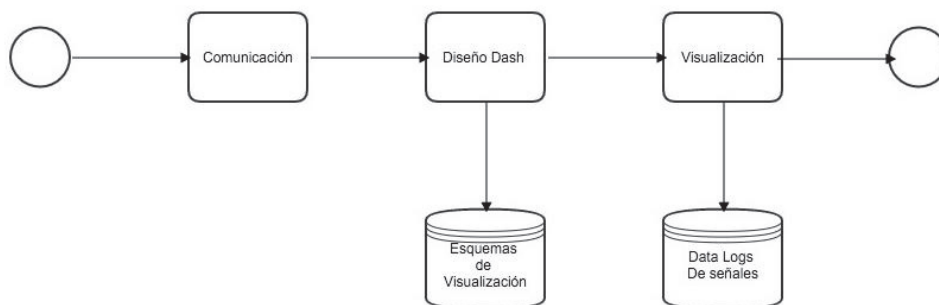


Figura 46. Proceso de la adquisición de datos

## 6.1.2 BACK- END

El *Back-end* son todos los procesos propios del sistema, que se encuentra fuera del alcance del usuario de la plataforma. El presente módulo, se encuentra todas aquellas tareas que no pertenecen al contacto directo con el usuario de la aplicación. Requerimientos que se detallan a continuación.

### 6.1.2.1 Comunicación

En esta etapa, se gestionan las comunicaciones entre los aplicativos servidores y clientes, además trata la información proveniente de las variables físicas capturadas para ser presentadas al cliente en las etapas de Front-end. El usuario no tiene control sobre esto. Procesos internos que permiten la configuración de los diferentes equipos.

### 6.1.2.2 Características

- Socket *TCP/IP*, entre elementos físicos y las aplicaciones cliente-servidor.
- Requerimientos *http (Hypertext Transfer Protocol)*, para la presentación al cliente.
- Módulo para el procesamiento de las señales y su adquisición (cliente).
- Verifica el estado de los elementos, sensores, tarjetas de adquisición de datos, entre otros.

- Difusión de la información (*broadcast*) a todos los clientes.

### **6.1.3 FRONT- END**

Los módulos que intervienen en la aplicación de control, permite la interacción con el usuario a través del interfaz de usuario, facilitando la visualización y monitoreo de las variables de proceso.

#### **6.1.3.1 El diseño de los histogramas**

Histograma es el entorno de visualización de las variables físicas a partir de elementos como indicadores visuales. El usuario puede personalizar las variables observa en el espacio delimitado por el histograma. Desde luego interviene en el proceso real de la planta, sin alterar la seguridad del equipo.

#### **6.1.3.2 Características**

- Crear y agregar elementos de visualización.
- Almacenar de manera personalizada el diseño del histograma.
- Visualizar las variables de control.
- Activar y desactivar parámetros de la planta.
- Almacenar en formato JSON información de su contenido histograma.

#### **6.1.3.3 Visualización**

La principal finalidad del módulo es permitir el análisis de las diferentes variables a controlar en el proceso de la planta.

#### **6.1.3.4 Características**

- Visualización del diseño creado en el histograma.

## **6.2 DEFINICIÓN DE LA ARQUITECTURA**

El sistema se plantea un entorno web bajo las reglas y los lineamientos prestados por *NODEJS* para una arquitectura modular. Para la selección de *NodeJS*, se tiene

en cuenta la capacidad de integración multiplataforma, capacidad de conexiones multi-hilo, lenguaje de programación en ambos lados de la aplicación (cliente – servidor) y el propósito por el cual fue creado (aplicaciones en tiempo real).

Profundizar en las razones de selección de la herramienta *NodeJS* como entorno de desarrollo de la aplicación de control, no tiene mayor relevancia. *NodeJS* se programa bajo el lenguaje de programación más usado en la actualidad (*JavaScript*). Está diseñado para aplicaciones en tiempo real basados en tecnología web. La selección principal de este elemento se debe a su codificación libre.

### **6.2.1 MÁQUINAS VIRTUALES (MV)**

Proceso en el que participa la virtualización de los elementos de la planta, aquellos que tienen contacto directo con las variables físicas.

Adquisición en tiempo real de variables bajo protocolos *TCP/IP* asíncronos. Deben considerarse sistemas operativos multiplataforma

### **6.2.2 CLIENTE-SERVIDOR**

#### **6.2.2.1 Presentación**

Está considerada por Modelo-Vista-Controlador (estructura MVC)

- Vistas: páginas web, por medio de *Express-js* (*framework* de desarrollo) se despliegan los contenidos y los formularios.
- Controladores: administrados por *Express-js*. Procesan las peticiones del cliente.
- Modelos: objetos reutilizados en la capa de dominio ayudado por el *framework Jade*.

#### **6.2.2.2 Lógica de negocios**

- Capa de servicios: permiten la administración compleja y el flujo de la aplicación, capaces de interactuar con los objetos del modelo de dominio.

- Capa de modelo de dominio: componentes con la estructura conceptual que presenta el dominio de la aplicación.

### 6.2.2.3 Datos

- Capa de implementación de acceso a la base de datos, *Mongoose (framework)*.

## 6.2.3 VISTAS DE CASOS DE USO

En esta sección se explica los casos de uso de la aplicación relevantes para la arquitectura. Al igual que los componentes que intervienen en su funcionamiento.

La relevancia reside en la capacidad de intervenir fuertemente en la arquitectura del proyecto, por ende, se muestran los casos de uso más importantes que afectan la aplicación y no la totalidad.

## 6.3 SEGURIDADES DEL SISTEMA

- Requisitos de usuario: permite al usuario no registrado registrarse.
- Autenticación: permite validar credenciales para entrar al sistema.
- Recuperar contraseña: permite al usuario ya registrado recuperar su contraseña, observar esquema de registro al sistema.

La figura 47 muestra las seguridades que el sistema debe considerar para el ingreso a la plataforma.

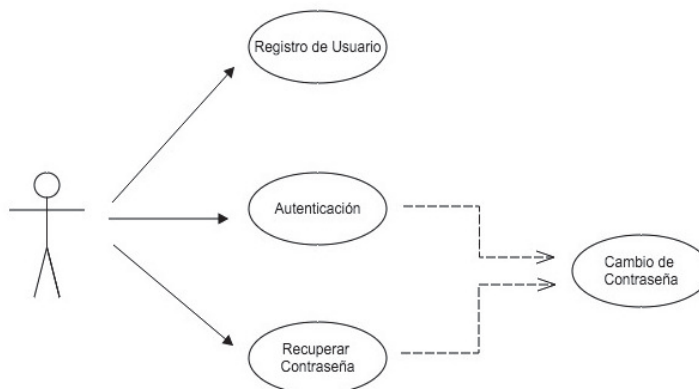


Figura 47. Seguridades del sistema para ingreso a la plataforma



## 6.4 BACK Y FRONT-END EN LAS SEGURIDADES DEL SISTEMA

Las seguridades del sistema representan la barrera para evitar fallos dentro de la aplicación de control. También evita intrusos en la plataforma. La figura 48 presenta el proceso a seguir para ingresar a la plataforma y la tabla 36 describe el proceso de ingreso.

- Crear nuevo: crea un nuevo histograma de instrumentos.
- Abrir existente: se selecciona algún modelo ya realizado previamente.
- Editar panel de instrumentación: permite hacer una modificación del histograma, agregar o borrar componentes, tanto o para un proyecto finalizado como un proyecto nuevo.

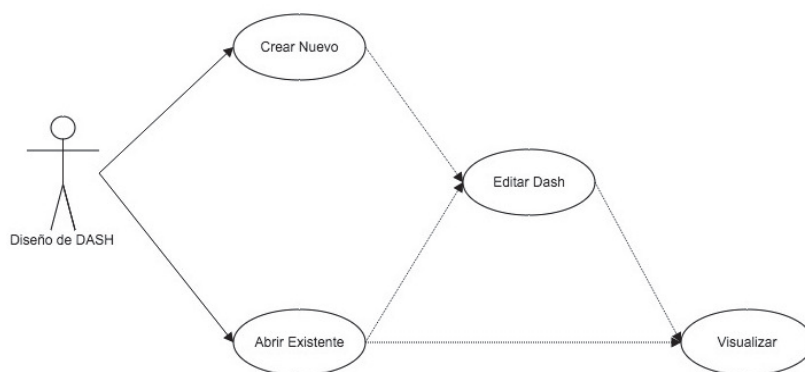


Figura 48. Ingreso a la plataforma

### 6.4.1 REQUISITOS DE SEGURIDAD

- El sistema debe contar con un módulo de seguridades.
- Los usuarios deberán estar registrados y autenticados. Solo un usuario autenticado podrá ver el contenido de los modelos, figura 49.
- Las contraseñas deberán cumplir un nivel de complejidad. 8 caracteres como mínimo. Alfanumérico.
- La contraseña debe ser encriptada antes de ser almacenadas, para eso se debe usar el protocolo 3DES.

Figura 49. Esquemas registro de usuario

Tabla 36

*Descripción para el ingreso al sistema*

Ítem	Descripción	Requerimiento
1	Descripción	Autenticación de usuarios
2	Actores	Usuario con registro
3	Precondición	Ingreso de al sistema
4	Secuencia	Registro
5	Normal	Secuencial 1. Usuario ingresa a la página de Autenticación. 2. La aplicación valida los datos. 3. La aplicación guarda la información y devuelve una autorización. 4. El usuario puede ingresar a la aplicación.
6	Post-condición	Usuario registrado
7	Excepciones	Secuencial 1. Usuario no registra datos completos, despliegue de error. 2. Usuario no introduce los datos correctos, despliegue de error. 3. Aplicación detecta múltiples intentos de registro, despliegue error e inhabilita el Usuario.
8	Reglas de Negocio	1. Usuario debe ser autenticado una sola vez. 2. El sistema debe reconocer el Rol y desplegar las opciones según sea el caso. 3. Debe detectar usuarios no registrados y solicitar que lo hagan.
9	Importancia	Alta
10	Urgencia	Alta
11	Comentarios	Usuario no registrado no accede al sistema y usuario sin clave no accede al sistema.

## 6.5 IMPLEMENTACIÓN DE SISTEMA DE CONTROL

La implementación del sistema de control se encuentra funcional. El acceso a la plataforma de control se encuentra disponible en internet para uso individual bajo licencia MIT la cual permite a cualquier persona visualizar, copiar el código fuente de la aplicación. Sin embargo, impide la comercialización y lucro.

### 6.5.1 REPOSITORIO

Bajo el nombre de SmartGridProject, se encuentra un repositorio de acceso libre.

**Acceso:** <https://github.com/SmartGridProject>

### 6.5.2 APLICACIÓN CLIENTE

El cliente está disponible sin ninguna restricción. Las instrucciones de uso se encuentran en el repositorio. Para el uso del cliente debe tener a disposición un *Arduino Mega* o *UNO*, si dispone de un *PLC* también puede hacer uso de la plataforma con un computador local por medio de conexión USB debe ejecutar el programa "Cliente".

**Acceso:** <https://github.com/SmartGridProject/clientes>

### 6.5.3 SERVIDOR

El código del servidor está a disposición libre.

**Acceso:** <https://github.com/SmartGridProject/users>

Para hacer uso de la plataforma debe acceder al siguiente enlace (<http://190.15.141.74:8080/register>), registra sus credenciales. Por último, puede ingresar mediante la autenticación del sistema.

### 6.5.4 LIBRERÍA PARA ARDUINO

La librería "SerialPortsArduino" permite el uso simplificado y estructurado de la trama para el envío de datos al cliente. Esta librería se encuentra disponible en:

<https://github.com/SmartGridProject/SerialDataPortsArduino>

## 6.6 SMARTGRID ENFOCADA AL SECTOR RESIDENCIAL (VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE)

La implementación del sistema de control descrito en este documento integra la VSS en un sistema *Smartgrid*. Los conjuntos de viviendas conforman una red interconectada que envía información continuamente al servidor de gestión de datos. Como se muestra en la siguiente figura 50.

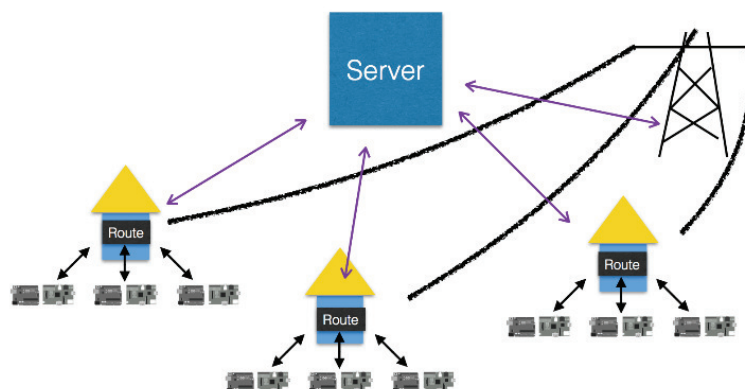


Figura 50. Esquema de los sistemas de viviendas conectados a la Red.  
LOPSCIENCE, 2015.

### 6.6.1 TOPOLOGÍA DE LA VIVIENDA EN LA SMARTGRID

La topología determina la disposición de los elementos dentro de la vivienda social sostenible. Por ende, el elemento principal es el TAD&P, envía las variables a controlar, toda la información puede enviarse de manera directa a través del *router*. El cual gestiona los datos que salen o entran a la vivienda social sostenible. Toda la información adquirida se envía directamente a la red (internet) y se almacena en un servidor, este servidor monitorea el estado de la red, y determinar el comportamiento que debe tener cada una de las viviendas en pro de la optimización de la energía. Al final, la información se presenta en un computador, *Smartphone* o *Tablet* de manera remota y en tiempo real. Los administradores de la red o los usuarios están autorizados para visualizar dicha información, estos últimos solo pueden ver el estado del comportamiento de su vivienda, a excepción del

comportamiento general de las múltiples viviendas. En la figura 51 se esquematiza la topología del control.

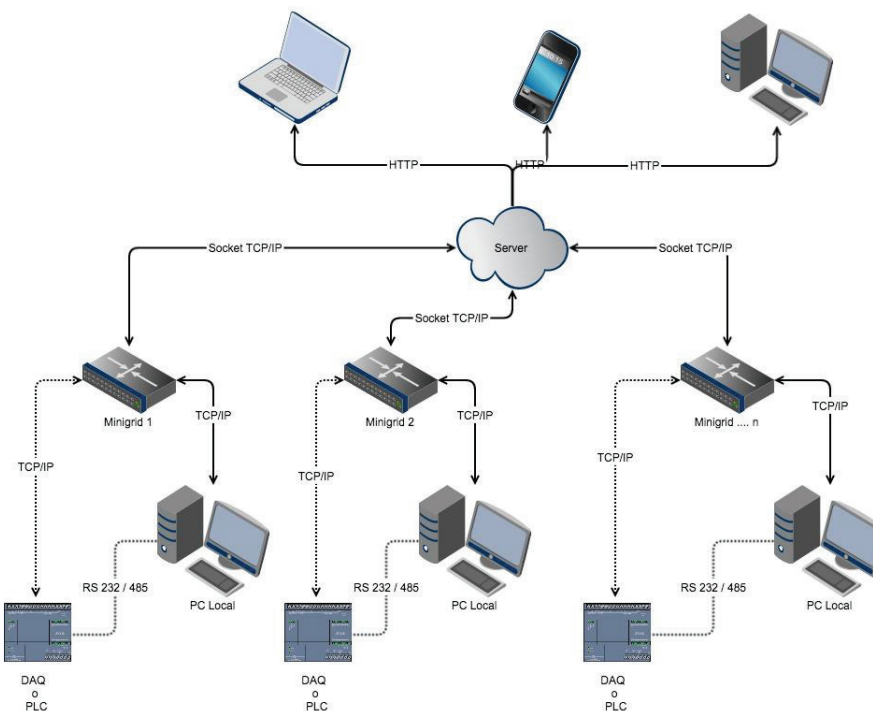


Figura 51. Esquema de la topología del control

La *Minigrid* (procesos puntuales de control) envían información estandarizada por medio de tramas. Cada elemento (*minigrid*) posee dos maneras de conexión. La primera es directamente a internet, como es el caso para los sistemas basados en *PLC* o por medio de un computador (TAD&P).

### 6.6.2 COMPORTAMIENTO DE LA VIVIENDA SOCIAL SOSTENIBLE.

El diagrama de flujo que se presenta a continuación define el flujo de datos enviado por la *Minigrid*. En este caso en particular la conexión es hecha directamente a la aplicación (*Server*).

En la figura 52 se observa el flujo de los datos dentro de la vivienda. En este caso en particular el control de la vivienda determina el comportamiento de la *minigrid*. Es decir, inyecta o no energía a la red. También se aprecia como ejerce control

sobre cada los actuadores. Por último, se ve el flujo de datos bidireccional que existe entre la vivienda (*minigrid*) y el servidor.

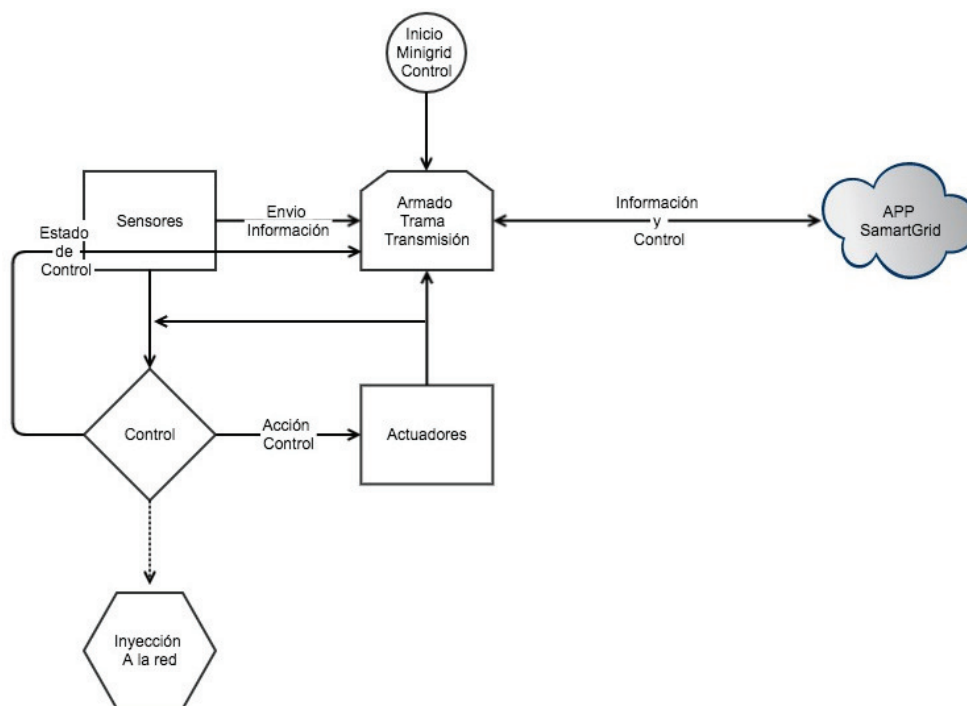


Figura 52. Diagrama de proceso de la VSS

### 6.6.3 DIAGRAMA DE SMARTGRID FLUJO DE PROGRAMA.

En primer lugar, la información recibida de miles de viviendas VSS es almacenada en una base de datos, esta discrimina por zonas. Cuando es necesario modificar una zona e incluso una sola vivienda la aplicación en el servidor lo realiza directamente, todo a favor de optimizar el consumo y el comportamiento de la red, figura 53.

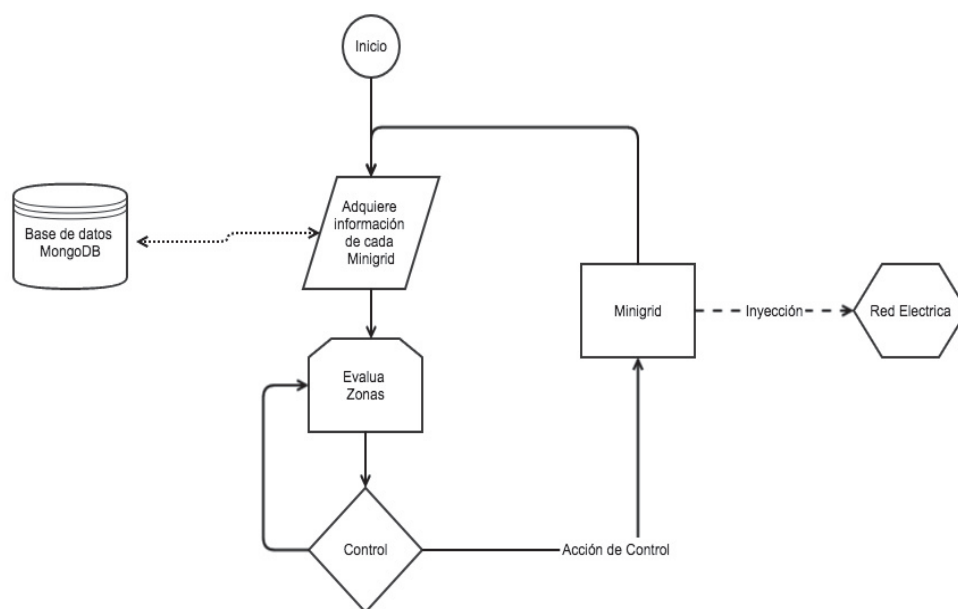


Figura 53. Diagrama de control de la vivienda social

Las evidencias del funcionamiento y codificación de la plataforma, se encuentran en el anexo plataforma.

## CAPÍTULO 7

### CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 7.1 CONCLUSIONES

Se concluye que la arquitectura de control y monitoreo desarrollada en el proyecto es única en su tipo. Involucra características de adquisición en tiempo real basado en tecnologías web, resolviendo problemas actuales de concurrencia y latencia en la conexión hacia el servidor y la información, gracias a su plataforma de control y monitoreo.

La implementación de sistemas basados en energías renovables presenta una dificultad de implementación mientras se sigan aplicando subsidios al servicio eléctrico.

Las aplicaciones basadas en el hidrógeno presentan barreras importantes a resolver, algunas de ellas, son debido a la naturaleza del hidrógeno y su almacenamiento, y otras relacionadas a la fluctuación eléctrica generada por la pila de combustible. Sin embargo, en este documento se realizó la simulación del sistema de almacenamiento de energía por medio de hidrógeno y pilas de combustible para la vivienda social para determinar cuánta energía se puede almacenar con esta tecnología, pero al compararlo con un sistema de almacenamiento por medio de baterías, el hidrógeno no es nada viable ya que sólo podría almacenar un 6% de la energía total del sistema.

En el caso del sistema fotovoltaico, el costo es demasiado alto para implementarlo en una vivienda social. Este satisface las necesidades energéticas de la vivienda, siendo esta una opción viable para la generación eléctrica en el Ecuador debido a la alta radiación solar que recibe el país.

La vivienda social sostenible que utiliza el hidrógeno como vector energético presenta obstáculos importantes a vencer, como el tipo de tecnología a utilizar, los problemas que presenta el hidrógeno al momento de almacenarlo, ya sea en tanques de hidruros metálicos, tanques a presión o en forma líquida. Para aplicaciones estacionarias y de baja potencia son ampliamente utilizados los



tanques de hidruros metálicos, estos tanques prestan mayor seguridad en el almacenamiento del hidrógeno.

La tecnología basada en bancos de baterías posee muchos más años de desarrollo que la tecnología de las pilas de combustible, razón por la cual las baterías plomo y ácido son las más utilizadas en aplicaciones estacionarias recomendadas por muchos fabricantes. Recientemente, la compañía Tesla Motors presentó un nuevo modelo de baterías económico de ion litio para aplicaciones domésticas.

El sistema de control y monitoreo, es un producto que todavía se encuentra en desarrollo, por lo que aún se requiere tiempo para su maduración. Sin embargo, en este documento se planteó las bases para que este sistema fuese escalable a lo largo del tiempo.

Los desarrollos web son un campo en crecimiento, por lo que realizar aplicaciones que usen componentes de código libre, como la arquitectura presentada en este documento, son necesarios para permitir este tipo de aplicaciones a nivel industrial orientados a las viviendas.

El código generado en este proyecto se encuentra a disposición del público en repositorios digitales de GitHub, con la finalidad de permitir a futuros interesados colaborar en el proyecto o generar otros aportes a partir de este.

Es necesario crear una comunidad colaborativa, con la finalidad de escalar la plataforma planteada y de esta forma la reducción de costos en software.

## **7.2 RECOMENDACIONES**

El proyecto de vivienda social sostenible, es viable en el caso en que se retiren los subsidios a la electricidad, a excepción de la utilización de sistemas de hidrógeno, por los inconvenientes antes mencionados. De otro modo, serviría para poblaciones alejadas del servicio de la red interconectada nacional.

Para la realización de futuros trabajos, es necesario destinar más recursos, principalmente por la complejidad de la fenomenología que se presenta alrededor de las viviendas sociales. Mayormente, las que implican un grado de

automatización. En materia energética, todavía nos falta mucho por recorrer y aún más, en materia de eficiencia energética de los sistemas basados en hidrógeno.

Se debe entender que las tecnologías desarrolladas en otros países están dedicadas para ambientes muy generales, por lo que, apegarse directamente a estas, es un error que lastimosamente se comete muy comúnmente, lo que impacta directamente su rendimiento, por lo que es necesario establecer políticas e incentivos que permitan hacer desarrollos locales, con personal que entienda la problemática actual y que pueda afrontar de manera directa estos inconvenientes.

La solución para una crisis energética, no se soluciona con el aumento de la capacidad generadora, por el contrario, se necesitan políticas que puedan penalizar a los infractores para restaurar los daños y abusos que se cometen con el mal uso de la energía. Todo lo cual, permitirá dar un gran paso a la mejora de la calidad y del rendimiento eléctrico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Andújar Márquez J.M., S. M. (2004). Control borroso de un vehículo híbrido con Pila de combustible. En *Primera Guía Científica del Hidrógeno y las Pilas de Combustibles*, (págs. 97-99).
- Bavendiek-et al., K. (2012). New Measurement Methods of Focal Spot Size and Shape of X-ray Tubes in Digital Radiological Applications in Comparison to Current Standards. *18th World Conference on Nondestructive Testing*. Durban.
- Center, N. R. (28 de December de 2015). Obtenido de nde-ed: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Radiography/Physics/GeometricUnsharp.htm>
- Click Renovables. (2016). *Cálculo paneles solares*. Obtenido de clickrenovables: <http://www.clickrenovables.com/blog/como-calcular-una-instalacion-solar-fotovoltaica-en-5-pasos/>
- Department of Energy, United States Of America . (2014). *The Future On The Grid, Evolving to Meet American's Need*.
- Díaz, C. &. (2011). Smart Grid: Las TICs y la modernización de las redes de energía eléctrica – Estado del Arte.
- Energy, U. D. (1998). FUEL CELL HANDBOOK. En D. S. J.H. Hirschenhofer, *FUEL CELL HANDBOOK* (Vol. Fourth). Morgantown , Virginia, EEUU: EG&Services Pearsons Inc.
- Estación climatológica, Agencia Espacial Ecuatoriana. (2016). *Quito.exa*. Obtenido de [quito.exa.ec](http://quito.exa.ec): <http://quito.exa.ec/>
- Funcación Natura. (2003). *Energías renovables conceptos y aplicaciones* . Quito, Pichincha, Ecuador.
- Gutiérrez, f. p. (2015). Smart Grids. *Epn Journals*. EPN.

- HOMER Energy & Microgrid software. (2016). *Simulation, Optimization, Sensitivity Analysis*, (2016). Obtenido de HOMER Energy: <http://www.HOMERenergy.com/software.html>
- J. F. Fulla, F. T. (1997). El vehículo eléctrico. Madrid: McGraw-Hill.
- Jason Stamp, Sandia National Laboratories. (2014). *Microgrid Design Tools (MDT), Smart Grid R&D*. Albuquerque, New Mexico, EEUU.
- John A. Duffie, W. A. (2014). *Solar Engineering of Thermal Processes*. University of Wisconsin-Madison, Mechanical Engineering Solar Energy Laboratory. Wisconsin: University of Wisconsin-Madison.
- Kodak. (s.f.). *Radiography in Modern Industry*. Obtenido de kodak: <http://www.kodak.com/eknec/documents/87/0900688a802b3c87/Radiography-in-Modern-Industry.pdf>
- M, D. (2015). Micro-Grid Platform based on NODE.JS architecture, Implemented in electrical network instrumentation. *ICPF*. iopscience.
- M. C. Izquierdo, F. P. (2001). La electroquímica y el medio ambiente. *UNED*. Madrid.
- Michael Stadler, L. B. (2014). *Microgrid Design Toolset (MDT) Development, Smart Grid R&D*. EEUU.
- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2013). *Balance Energético Nacional 2013, año base 2012*. Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, Quito.
- Niirnberg, H. W. (1983). Some general aspects of the significance and potentialities of hydrogen in future energy technologies, Hydrogen as an Energy Carrier. Dordrecht : Imarisio, A. S. Strub.
- Nist National Institute Of Standards And Technology, U.S Department Of Commerce . (s.f.). *Nist National Institute Of Standards And Technology, U.S Department Of Commerce*. Obtenido de NIST: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.1108r3>

- Observatorio Industrial del Sector de la Electrónica, Tecnologías de la Información y Telecomunicaciones. (2011). *Smart Grids y la evolución de la red eléctrica*. Spain.
- Organización de Consumidores y Usuarios. OCU Ediciones, S.A. (2016). *Ocu*. Obtenido de ocu: <https://www.ocu.org/vivienda-y-energia/gas-luz/noticias/cuanta-energia-consume-una-casa-571584>
- Pérez, D. M. (2008). *Estado y Desarrollo de la Tecnología Smart Grid en Colombia*. Universidad Nacional de Colombia. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Saborío, A. A. (s.f.). *Estudio de pre-factibilidad para la implementación de una red eléctrica inteligente ("Smart Grid") en la Empresa de Servicios Públicos de Heredia (E.S.P.H. S.A)*. Universidad de Costa Rica. 2012: Universidad de Costa Rica.
- Sandia National Laboratories. (2014). *The Advanced Microgrid Integration and Interoperability*. Albuquerque, New Mexico, EEUU.
- T.M. Harris, R. (1991). Grain boundary diffusion of hydrogen in nickel. En *Latanision. Met. Trans.*
- Technologies, G. I. . (2007). Obtenido de ge-mcs: [http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/GEIT-30158EN\\_industrial-radiography-image-forming-techniques.pdf](http://www.ge-mcs.com/download/x-ray/GEIT-30158EN_industrial-radiography-image-forming-techniques.pdf)
- V, M. M. (2013). *mart Grids Introducción, Estado del arte, Herramientas y Aplicaciones*. ABB. ABB.
- Vicente, M. E. (1994). *Electroquímica y Medio ambiente en el umbral del siglo XXI*. Universidad de A Coruña.
- ABB. (2016). *Power and productivity for a better world tm ABB*. Obtenido de ABB: <http://www.abb.com/smartgrids> Power and productivity for a better world tm ABB <http://www.abb.com/substationautomation>

Abdul Kadir, A. M. (2011). Harmonic impact of different distributed generation units on low voltaje distribution system. *IEEE International Electric Machines & Drives Conference* (págs. 1201-1206). IEEE.

ACS. (2016). Obtenido de <https://www.google.com.ec/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=8&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjE3PPCII7PAhXJXR4KHdbtCNkQFghGMAC&url=http%3A%2F%2Fwww.uco.es%2F~fa1lolur%2FDocureno%2Fp2007-2009.xls&usg=AFQjCNEGvvpYUAgX5xN-3o6WfifVzFzXog&bvm=bv.132479545,d.dmo>

Autor Stream. (2016). *autorStream*. Obtenido de <http://www.authorstream.com/Presentation/aSGuest57634-454160-a-s-khedim-dacar-wor-kshop-cloud-computing/>

Castilla, T. (03 de 04 de 2015). *IT DOCS Sharing IT Documents*. Obtenido de <http://www.it-docs.net/doc/19468/virtualizacion-lowcost.html>

Club Ensayos. (17 de 11 de 2011). *Sistemas industriales de control automático (PLC)*. Obtenido de <https://www.clubensayos.com/Temas-Variados/Sistemas-industriales-de-control-autom%C3%A1tico-PLC/101159.html>

Congreso de energía sostenible. (2014). *Congreso de energía sostenible, memorias CES 2016*. Obtenido de <http://www.congresoenergiasostenible.org/libs/pdf/Memorias2doCES.pdf>

Organización Latinoamericana de Energía. (2016). Bases conceptuales para el marco regulatorio de desarrollo energético sostenible. *Memorias del Seminario Internacional de Derecho Energético Bogotá, Colombia 2015*, 13-35. Obtenido de <http://www.parlamentoandino.org/images/lima/memoriasolade.pdf>

Sociedad española de pilas de combustible. (2016). *APPICE*. Obtenido de [http://sai.appice.es/mailling/2016\\_245/noticias/n3\\_es.html](http://sai.appice.es/mailling/2016_245/noticias/n3_es.html)

Tekno Solar. (2016). *Tekonosolar.com*. Obtenido de <http://www.teknosolar.com/kit-solar-fotovoltaico-650wh-dia-lite.html>

*Universidad de Vigo*. (26 de 08 de 2016). Obtenido de <http://www.tv.uvigo.es/es/announces.html>

Universidad Politécnica Salesiana . (2015). *Repositorio digital* . Obtenido de <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/1819>

Virtualidad, A. y. (02 de 08 de 2016). *Universidad Militar de Granada*. Obtenido de <http://revistas.unimilitar.edu.co/>

Técnicos en Sistemas Eléctricos y de Cómputo (09/2011). INDECO S.A. Obtenido de [http://dhrb.blogspot.com/2011\\_09\\_01\\_archive.html](http://dhrb.blogspot.com/2011_09_01_archive.html)

## **ANEXOS**