

# INTRODUCCIÓN A GRANJAS INTELIGENTES Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA HACER FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN ANDINA

*Hernán Paz Penagos  
Roberto Ferro Escobar  
Edgar Alirio Aguirre Buenaventura*



UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS

**Doctorado**  
*en Ingeniería*  
UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS"

## **Hernán Paz Penagos**



Doctor en Educación,  
Magíster en  
Teleinformática e  
Ingeniero Electrónico y  
Electricista. Profesor  
asociado de la Escuela  
Colombiana de  
Ingeniería Julio Garavito

e investigador senior de Colciencias.  
Director de proyectos de investigación y  
tesis. Par evaluador internacional y  
nacional del Sistema de Acreditación de  
la Educación Superior SINAES (Costa  
Rica) y CNA (Colombia).

## **Roberto Ferro Escobar**



Doctor en Ingeniería  
Informática, Magíster  
en Teleinformática e  
Ingeniero Electrónico.  
Profesor Universidad  
Distrital Francisco José  
de Caldas e investigador  
senior de Colciencias.

Director de proyectos de investigación  
en el grupo LIDER y tesis de doctorado,  
maestría y pregrado. Par evaluador  
internacional y nacional de artículos de  
investigación.

## **Edgar Alirio Aguirre Buenaventura**



Estudiante del  
doctorado en  
Ingeniería, Magíster en  
Ciencias de la  
Información e Ingeniero  
en Control Electrónico.  
Profesor de la  
Corporación

Universitaria Minuto de Dios.  
Coordinador de la Maestría  
en Agrónica de Uniminuto.



**UNIVERSIDAD DISTRITAL  
FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS**

**Doctorado**  
**en Ingeniería**  
UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS"

# **INTRODUCCIÓN A GRANJAS INTELIGENTES Y GENERACIÓN DE ENERGÍA ELÉCTRICA PARA HACER FRENTE AL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA REGIÓN ANDINA**

*Hernán Paz Penagos  
Roberto Ferro Escobar  
Edgar Alirio Aguirre Buenaventura*

Paz Penagos, Hernán

Introducción a granjas inteligentes y generación de energía eléctrica para hacer frente al cambio climático en la Región Andina / Hernán Paz Penagos, Roberto Ferro Escobar, Edgar Alirio Aguirre Buenaventura. – 1a ed. – Bogotá: Universidad Distrital Francisco José de Caldas, 2021.

125 p. ; 24 cm -- (Doctorado en Ingeniería)

Incluye reseña de los autores en la pasta -- Contiene referencias bibliográficas.

ISBN 978-958-49-4953-0 (Impreso) - 978-958-49-4954-7 (Digital)

1. Agricultura - Innovaciones tecnológicas. 2. Generación de energía - Aspectos ambientales. 3. Mitigación del cambio climático I. Ferro Escobar, Roberto II. Aguirre Buenaventura, Edgar Alirio III. Título IV. Serie.

CDD: 631 ed. 23

CO-BoBN- a1088111

© Universidad Distrital Francisco José de Caldas

© Doctorado en Ingeniería

© Hernán Paz Penagos, Roberto Ferro Escobar, Edgar Alirio Aguirre Buenaventura

ISBN Impreso: 978-958-49-4953-0

ISBN Digital: 978-958-49-4954-7

Primera edición: Bogotá, diciembre de 2021

Corrección de estilo, diseño gráfico y producción editorial:

IngeEdit Editores – Sandra Patricia Rodríguez Lamus - [ingeeditorial@gmail.com](mailto:ingeeditorial@gmail.com)

Impresión:

IngeEdit Editores – Sandra Patricia Rodríguez Lamus

Doctorado en Ingeniería

Carrera 7 No. 40B – 53 Bogotá

Correo electrónico: [investigacion.doctoradoing@udistrital.edu.co](mailto:investigacion.doctoradoing@udistrital.edu.co)

Todos los derechos reservados. Esta publicación no puede ser reproducida total ni parcialmente o transmitida por un sistema de recuperación de información, en ninguna forma ni por ningún medio, sin el permiso previo del Doctorado en Ingeniería de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

Hecho el depósito legal.

Impreso y hecho en Colombia

Printed and made in Colombia

# Tabla de contenido

|                    |    |
|--------------------|----|
| Introducción ..... | 11 |
|--------------------|----|

## Capítulo 1

|                                                                      |    |
|----------------------------------------------------------------------|----|
| Granjas Inteligentes ¿Qué son? .....                                 | 13 |
| Granjas Inteligentes ¿Qué son? .....                                 | 13 |
| 1.1 Granjas Inteligentes .....                                       | 14 |
| 1.2 Pilares de las granjas inteligentes .....                        | 17 |
| 1.2.1 Pilar de tecnologías de sensores .....                         | 18 |
| 1.2.2 Pilar de aplicaciones de software .....                        | 18 |
| 1.2.3 Pilar de sistemas de comunicaciones .....                      | 19 |
| 1.2.4 Pilar de Redes telemáticas y sistemas de posicionamiento ..... | 19 |
| 1.2.5 Pilar de sistemas de hardware y software .....                 | 19 |
| 1.2.6 Pilar de soluciones de analítica de datos .....                | 20 |

## Capítulo 2

|                                                            |    |
|------------------------------------------------------------|----|
| Cambio climático y su incidencia en el entorno rural ..... | 21 |
| 2.1 Cambio climático .....                                 | 21 |

## Capítulo 3

|                                                        |    |
|--------------------------------------------------------|----|
| IoT y sus aplicaciones en el agro .....                | 25 |
| 3.1 Arquitectura IoT .....                             | 27 |
| 3.2 Plataformas de Hardware .....                      | 29 |
| 3.3 Nodos de Edge computing .....                      | 32 |
| 3.4 Fog Computing .....                                | 33 |
| 3.5 Cloud Computing .....                              | 36 |
| 3.6 Plataforma para desarrollar aplicaciones IoT ..... | 38 |

|                                                |    |
|------------------------------------------------|----|
| 3.7 Otras aplicaciones de IoT .....            | 38 |
| 3.7.1 Manejo de tratamientos .....             | 38 |
| 3.7.2 Detección de plagas y enfermedades ..... | 38 |
| 3.7.3 Sistema de riego .....                   | 39 |

## Capítulo 4

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| Redes de sensores inalámbricos para granjas inteligentes ..... | 41 |
| 4.1 Variables edafoclimáticas .....                            | 41 |
| 4.1.1 Humedad del ambiente .....                               | 41 |
| 4.1.2 Humedad del suelo .....                                  | 42 |
| 4.1.3 Luminosidad .....                                        | 42 |
| 4.1.4 Evapotranspiración .....                                 | 42 |
| 4.1.5 Condensación .....                                       | 42 |
| 4.1.6 Precipitación .....                                      | 42 |
| 4.1.7 Presión atmosférica .....                                | 43 |
| 4.1.8 Velocidad del viento (La escala de Beaufort) .....       | 43 |
| 4.1.9 Temperatura ambiente .....                               | 43 |
| 4.1.5 Humedad del ambiente .....                               | 43 |
| 4.2 Redes de sensores agroclimáticos .....                     | 43 |
| 4.3 Plataformas de comunicaciones .....                        | 46 |

## Capítulo 5

|                                              |    |
|----------------------------------------------|----|
| Automatización de granjas inteligentes ..... | 49 |
| 5.1 Sistemas de cultivo .....                | 49 |
| 5.1.1 Acuicultura .....                      | 49 |
| 5.1.2 Aeroponía .....                        | 49 |
| 5.1.3 Acuaponía .....                        | 50 |
| 5.1.4 Hidroponía .....                       | 50 |
| 5.1.5 Cultivos NFT .....                     | 50 |
| 5.2 Electrónica para el agro .....           | 52 |
| 5.2.1 Agromática .....                       | 52 |
| 5.2.2 Agrónica .....                         | 52 |

## Capítulo 6

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| Fuentes naturales hídricas en la Región Andina ..... | 53 |
| 6.1 Fuentes hídricas en la Región Andina .....       | 55 |

## Capítulo 7

|                                                                          |    |
|--------------------------------------------------------------------------|----|
| Estaciones meteorológicas.....                                           | 57 |
| 7.1 Estaciones meteorológicas automáticas.....                           | 57 |
| 7.1.1 Sensores para estaciones meteorológicas.....                       | 61 |
| 7.2 Investigación sobre sistemas de medición medioambientales.....       | 65 |
| 7.2.1 Investigaciones realizadas en Colombia.....                        | 66 |
| 7.3 Soluciones comerciales de estaciones meteorológicas automáticas..... | 67 |

## Capítulo 8

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Convertor de energía mecánica a energía eléctrica.....                                      | 71 |
| 8.1 Métodos de generación de energías limpias.....                                          | 71 |
| 8.2 Principio de conservación de la energía,<br>y transformación de una energía a otra..... | 74 |
| 8.2.1 Variables Independientes.....                                                         | 74 |
| 8.2.2 Variables Dependientes.....                                                           | 75 |
| 8.3 Conversión mecánica a eléctrica mediante engranes mecánicos.....                        | 76 |
| 8.4 Conversión mecánica a eléctrica mediante inducción magnética.....                       | 78 |
| 8.4.1 Funcionamiento de imanes permanentes (Ley de Lorentz) ..                              | 80 |
| 8.4.2 Equivalencias.....                                                                    | 81 |

## Capítulo 9

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Alternadores, generadores y motores AC-DC.....                                         | 85 |
| 9.1 Alternador de corriente continua.....                                              | 85 |
| 9.2 Generadores de corriente continua y alterna.....                                   | 86 |
| 9.3 Generadores de imanes permanentes.....                                             | 87 |
| 9.4 FEM inducida en una espira de un<br>generador de imanes permanentes.....           | 88 |
| 9.5 FEM inducida en una serie de conductores<br>paralelos debida a imanes móviles..... | 89 |
| 9.6 Generador Síncrono de Imanes Permanentes.....                                      | 91 |
| 9.7 Motor-generador magnético.....                                                     | 91 |

## Capítulo 10

|                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------|----|
| Resultados.....                                             | 93 |
| 10.1 Caracterización de las granjas.....                    | 93 |
| 10.2 Aspectos tecnológicos de aplicación de IoT.....        | 95 |
| 10.3 Resultados de la generación hidroeléctrica limpia..... | 97 |

|                                 |                                             |     |
|---------------------------------|---------------------------------------------|-----|
| 10.3.1                          | Mediciones de tiempo y fuerza ejercida..... | 97  |
| 10.4                            | Engrane mecánico.....                       | 101 |
| 10.4.1                          | Motor dinamo M63X25.....                    | 103 |
| 10.5                            | Mecanismo de inducción magnética .....      | 105 |
| 10.6                            | Mediciones de fuerza y tiempo .....         | 116 |
| Conclusiones.....               |                                             | 119 |
| Referencias bibliográficas..... |                                             | 121 |

# Índice de figuras

|            |                                                                                                                  |    |
|------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1.  | Sensor de Ultrasonido HC-SR04 de bajo costo.....                                                                 | 16 |
| Figura 2.  | Pilares sobre los que se fundamentan las Granjas Inteligentes.....                                               | 17 |
| Figura 3.  | Sensores inteligentes para Granjas Inteligentes .....                                                            | 18 |
| Figura 4.  | Sistemas de comunicaciones y software<br>para Granjas Inteligentes.....                                          | 19 |
| Figura 5.  | Integración de Raspberry Pi y Arduino.....                                                                       | 20 |
| Figura 6.  | Estación móvil conectada al servidor mediante red IoT .....                                                      | 26 |
| Figura 7.  | Foro mundial IoT modelo de referencia.....                                                                       | 27 |
| Figura 8.  | Pilares de OpenFog.....                                                                                          | 34 |
| Figura 9.  | Jerarquía de Fog.....                                                                                            | 35 |
| Figura 10. | Descripción de la arquitectura .....                                                                             | 37 |
| Figura 11. | Taxonomía Cloud.....                                                                                             | 38 |
| Figura 12. | Clasificación de topologías de redes Cisco para uso rural .....                                                  | 44 |
| Figura 13. | Redes de corto, mediano y<br>largo alcance para IoT y Smart Farming.....                                         | 47 |
| Figura 14. | Proceso de cultivo NFT.....                                                                                      | 51 |
| Figura 15. | Estación meteorológica Davids Vantage Pro2.....                                                                  | 68 |
| Figura 16. | Estación meteorológica SUTRON.....                                                                               | 69 |
| Figura 17. | Estación meteorológica OTT NetDL.....                                                                            | 69 |
| Figura 18. | Estación meteorológica Unilog Com.....                                                                           | 70 |
| Figura 19. | Tipos de imanes.....                                                                                             | 79 |
| Figura 20. | Imagen ilustrativa de la Ley de Lorentz.....                                                                     | 81 |
| Figura 21. | Líneas de campo de un imán.....                                                                                  | 81 |
| Figura 22. | Desplazamiento del imán cuando segmento de conductor AB<br>está en reposo, donde el polo sur sale del papel..... | 82 |
| Figura 23. | Desplazamiento del segmento de conductor AB<br>con el imán estático, donde el polo norte sale del papel.....     | 82 |
| Figura 24. | Desplazamiento del segmento de conductor AB<br>con el imán estático, donde el polo sur sale del papel.....       | 81 |
| Figura 25. | Polaridad de una espira cuando dos imanes<br>de polos opuestos pasan enfrente.....                               | 83 |
| Figura 26. | Polaridad de espiras cuando una hilera de<br>polos magnéticos pasa al frente.....                                | 83 |

|                                                                                                                                                                                |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 27. Estator y rotor de un alternador de corriente continua.....                                                                                                         | 86  |
| Figura 28. Flujo axial. Funcionamiento de un generador de imanes permanentes.....                                                                                              | 87  |
| Figura 29. Flujo radial. Funcionamiento de un generador de imanes permanentes.....                                                                                             | 88  |
| Figura 30. Polaridad de la FEM inducida a una serie de conductores, cuando existen imanes móviles.....                                                                         | 89  |
| Figura 31. Polaridad de la FEM inducida a una serie de conductores, cuando existen imanes móviles.....                                                                         | 91  |
| Figura 32. Etiqueta NFC para marcación de cultivos, caracterización de la comunidad, productos propios comercializables por la comunidad y muestra de un producto, cacao ..... | 94  |
| Figura 33. Gráficas de medición de las condiciones climáticas Temperatura y Humedad .....                                                                                      | 95  |
| Figura 34. Gráficas de consolidación de mediciones.....                                                                                                                        | 95  |
| Figura 35. Vista de la Web desarrollada .....                                                                                                                                  | 96  |
| Figura 36. Vista del monitoreo en tiempo real de las condiciones climáticas.....                                                                                               | 96  |
| Figura 37. Vista de la Web donde se presentan los proyectos productivos ..                                                                                                     | 96  |
| Figura 38. Vista del desarrollo de la aplicación para Smartphone.....                                                                                                          | 97  |
| Figura 39. Características de operación del motor DC tipo .....                                                                                                                | 103 |
| Figura 40. Simulación del mecanismo, vista superior y frontal.....                                                                                                             | 104 |
| Figura 41. Implementación del mecanismo .....                                                                                                                                  | 104 |
| Figura 42. Estructura imanes en SolidWorks .....                                                                                                                               | 111 |
| Figura 43. Estructura de las bobinas en SolidWorks.....                                                                                                                        | 112 |
| Figura 44. Montaje final de las piezas mecanismo magnético SolidWorks....                                                                                                      | 112 |
| Figura 45. Ubicación de los imanes espaciados cada 45° .....                                                                                                                   | 112 |
| Figura 46. Bobinas de cable de cobre esmaltado.....                                                                                                                            | 113 |
| Figura 47. Estructura bobinas.....                                                                                                                                             | 113 |
| Figura 48. Bobinas con núcleo incorporado .....                                                                                                                                | 114 |
| Figura 49. Ensamble total de las piezas del mecanismo magnético .....                                                                                                          | 114 |
| Figura 50. Conexión serie entre dos bobinas .....                                                                                                                              | 115 |
| Figura 51. Conexión serie entre dos polos, con polos cambiados .....                                                                                                           | 115 |
| Figura 52. Conexión Paralelo de 4 bobinas .....                                                                                                                                | 116 |
| Figura 53. Prototipo magnético final, con manivela adicionada al eje .....                                                                                                     | 116 |
| Figura 54. Resultados obtenidos del mecanismo de engranes mecánicos....                                                                                                        | 117 |

# Índice de tablas

|           |                                                                                                         |     |
|-----------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabla 1.  | Proceso de Estandarización de IoT.....                                                                  | 28  |
| Tabla 2.  | Cuadro de disponibilidad hídrica mundial.....                                                           | 55  |
| Tabla 3.  | Clasificación de las estaciones hidrometeorológicas IDEAM.....                                          | 67  |
| Tabla 4.  | Generador mediante una rueda magnética.....                                                             | 72  |
| Tabla 5.  | Generador mediante un sistema de engranes mecánicos.....                                                | 72  |
| Tabla 6.  | Generador mediante aperturas de puertas para uso doméstico.....                                         | 72  |
| Tabla 7.  | Generador de imanes permanente<br>de doble rotor con engranaje magnético.....                           | 73  |
| Tabla 8.  | Generador de energía eléctrica rotativa de base piezoeléctrica.....                                     | 73  |
| Tabla 9.  | Tipos de engranes.....                                                                                  | 76  |
| Tabla 10. | Tipos de trenes de engranes.....                                                                        | 77  |
| Tabla 11. | Caracterización de la nomenclatura<br>de diente de engranes rectos.....                                 | 78  |
| Tabla 12. | Tipos de Motor-generator magnético.....                                                                 | 91  |
| Tabla 13. | Mediciones realizadas en la microturbina cinética.....                                                  | 98  |
| Tabla 14. | Resumen de los valores del diseño del mecanismo.....                                                    | 105 |
| Tabla 15. | Especificaciones técnicas del imán.....                                                                 | 107 |
| Tabla 16. | Características del grado del imán seleccionado<br>propiedades magnéticas del imán de neodimio N45..... | 107 |
| Tabla 17. | Permeabilidad relativa de los materiales.<br>Permeabilidad y permitividad.....                          | 109 |
| Tabla 18. | Resumen de parámetros calculados.....                                                                   | 110 |
| Tabla 19. | Caracterización de las pruebas en las bobinas.....                                                      | 114 |
| Tabla 20. | Datos de voltajes de salida con diferentes<br>configuraciones de conexión en las bobinas.....           | 115 |
| Tabla 21. | Salidas de voltaje por 2 métodos.....                                                                   | 117 |
| Tabla 22. | Resultados obtenidos para los dos mecanismos.....                                                       | 118 |



# Introducción

La agricultura es uno de los sectores de mayor impacto por la emisión y absorción de Co<sub>2</sub>, deforestación y uso de la tierra, por lo que la importancia de las granjas inteligentes como innovadora alternativa es una solución en la mitigación del efecto del cambio climático, y permiten mejorar el rendimiento de los cultivos, asegurar la alimentación y la cadena productiva de forma responsable y competitiva, protegiendo la vida, los ecosistemas y el medio ambiente.

Este libro presenta aspectos fundamentales sobre el desarrollo de la agricultura inteligente en Colombia con un enfoque en la Región Andina caracterizada por tener recursos hídricos que facilitan la actividad en granjas o fincas que se dedican al cultivo de alimentos para el consumo de interno y también para la exportación. Y aunque actualmente la agricultura en la región es estable, el cambio climático amenaza la producción de alimentos. Estas situaciones muestran la necesidad de actuar con urgencia mediante **IoT (Internet Of Things, es decir, Internet de las cosas)** así como la generación de energía limpia.

Abordamos por tanto aspectos como el desarrollo de las tecnologías emergentes de sensores que han tenido un crecimiento vertiginoso, el auge del modelo OSI de la ISO que permitió llegar a una estandarización de productos informáticos, el desarrollo de las redes de alta velocidad, la masificación de Internet, el desarrollo de la programación orientada a objetos,

los nuevos desarrollos de software bajo el paradigma de las metodologías ágiles, el desarrollo de dispositivos de hardware embebido con transmisiones de radio frecuencia en banda libre, que han permitido integrar todos estos avances desde la IoT hasta el análisis de grandes volúmenes de información por medio de la ciencia de datos. Gracias a estos avances hoy se integran en las ciudades inteligentes y hacia el cuidado del medio ambiente para evitar el recalentamiento planetario.

Todo lo anterior permite pensar en llevar algunas de estas soluciones a la industria agropecuaria. Por lo tanto, en la descripción teórica de los primeros capítulos del libro se buscan alternativas que permiten realizar mediciones de muchas variables relacionadas con los cultivos, la energía y mejorar la calidad de los productos.

De acuerdo con lo planteado, se describen en detalle los sensores inalámbricos que operan como redes y transportan información para que sea procesada mediante técnicas de Inteligencia Artificial, de forma tal que las personas encargadas de los cultivos puedan tomar acciones preventivas o correctivas con el fin de mejorar la producción, por ejemplo: se pueden evitar la proliferación de plagas, el uso de químicos que pueden traer repercusiones en la salud.

Por otro lado, es necesario generar energía eléctrica que no contamine la naturaleza y que permita alimentar todos los elementos constitutivos de las granjas inteligentes. Este libro describe diferentes aspectos de estas tecnologías convergentes al servicio del sector agropecuario, como sector esencial para el desarrollo de Colombia.

**Palabras Clave:** Smart Farming, IoT, Sensores, Agro, energía limpia, región Andina, cambio climático, eficiencia.

# Capítulo 1

## Granjas Inteligentes ¿Qué son?

Este capítulo aborda los aspectos relacionados con las Granjas Inteligentes o Smart Farming, cómo están definidas, los retos y aplicaciones.

Colombia en su composición se divide en zonas urbanas y rurales, la gran mayoría de las zonas rurales no se priorizan en las iniciativas del estado que se enfocan hacia la ampliación de cobertura tecnológica en las zonas urbanas, lo cual aumenta la brecha tecnológica entre ambas disminuyendo las oportunidades competitivas.

Esa brecha se evidencia en la diferencia de la cantidad de población que habita en dichas zonas y la migración hacia las áreas urbanas, sobre todo en las grandes ciudades, lo que impacta en el aumento de la pobreza de las zonas rurales y en las grandes ciudades.

El impacto económico por la falta de desarrollo tecnológico en las zonas rurales es multidimensional, porque impide la actualización y migración de tecnologías debido a la dificultad para el acceso de esta.

Es interesante mencionar que los negocios del sector rural no solo se concentran en grandes organizaciones, también impactan organizaciones a diferente escala, desde la gran empresa hasta los procesos de agricultura familiar, y los escenarios también cambian, porque el turismo y el medio

ambiente se abren a los contextos tecnológicos, generando nuevas oportunidades.

## **1.1 Granjas Inteligentes**

La "agricultura inteligente" define la gestión de granjas que utilizan tecnologías emergentes como IoT (Internet de las Cosas), el uso de AUV (Drones, robótica), la IA (Inteligencia Artificial), así como el software para aumentar la eficiencia, la calidad de los productos del agro y al mismo tiempo mejorar la mano de obra de los humanos que se utilizan en la producción (IoTforall, 2020).

Debido a los desarrollos de los computadores y a la penetración de los mismos en todas las áreas del conocimiento se tecnificaron las grandes ciudades y ahora se pretende llevar ese conocimiento al campo, donde hay grandes extensiones de tierra con múltiples dificultades como acceso a Internet. Se busca la imposición de sensores que estén en capacidad de medir todo tipo de información que pueda ser procesada y obtener información valiosa sobre aspectos que rodean el agro.

El uso de sensores inalámbricos es muy importante, las velocidades de transmisión, el bajo consumo de energía, los bajos costos de los dispositivos, entre otros aspectos técnicos, permiten despliegues de múltiples nodos de forma rápida y con bastantes aplicaciones que pueden ayudar a mejorar el agro y por ende mayor producción.

Estos nodos permiten tener una comprensión del contexto agrícola, un sensor inalámbrico permite ver las propiedades físicas del suelo donde están los cultivos y determina la extensión de dichos componentes (González, Ferro, y Aguirre, 2020). Esto implica que la radiación solar, la temperatura, la humedad, el aire, el PH, el nivel de fertilidad del suelo, pueden conocerse de forma instantánea de manera confiable, sin tener que colocar cables, postes y otros elementos de difícil colocación. Así es posible conectar estas variables como si fueran los 5 sentidos de las personas que trabajan en el campo, por ahora solo se pueden tener inmensas cantidades de datos que serán analizadas

por plataformas de Internet donde se aplican o corren funciones de ciencias de datos como Big Data o Data Mining, en un futuro cercano se realizarán aplicaciones que permitirán controlar dichas variables y mejorar las funciones estratégicas del campo. En resumen, las tres funciones principales de un sensor dentro de un sistema son: monitoreo y control, seguridad y advertencia, y diagnóstico y análisis.

Es importante destacar algunos factores que afectan el rendimiento del campo como el agua, los nutrientes del suelo, el aire y la temperatura atmosférica, que han dado lugar a crear sensores de tres tipos: físicos, mecánicos y químicos, los cuales pueden ser conectados a un dispositivo inalámbrico que se encarga de enviar las mediciones en forma de datos a la nube o a un servidor principal que se ubica en la granja.

Los **sensores físicos** son sensores de flujo, de humedad, de presión y de temperatura. Los **sensores mecánicos** son: los de proximidad, los de posición, los de nivel y de movimiento, y por último los **sensores químicos** son los biosensores de perfil y los de gas. Un **sensor acústico** es un sensor de detección de plagas de insectos que monitorean el nivel de ruido de las de los insectos bajo ciertos umbrales de comparación, se conectan a una estación base para detectar el nivel de ruido cuando cruza el umbral establecido, y transmite esta información al computador de la sala de control o en la Web, e indica con precisión el área que está siendo atacada. Así el personal que trabaja puede tomar las debidas medidas correctivas para evitar una posible devastación.

Los **sensores de proximidad** aseguran que los espacios entre cultivos se cumplan correctamente cuando se realizan actividades para facilitar el crecimiento de los cultivos. Por ejemplo, el sensor de ultrasonido HC-SR04 puede resultar muy útil, reduciendo las posibilidades de desperdicio de espacio en la siembra de árboles. Con ello se minimiza el costo de comprar pesticidas de más y se incrementa la posibilidad de una cosecha robusta y libre de químicos dañinos para el ser humano o los animales, ver Figura 1.

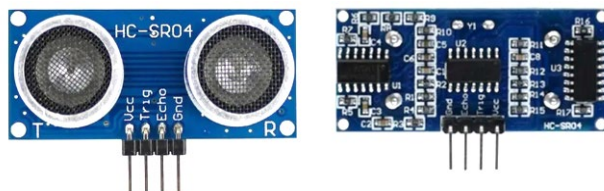


Figura 1. Sensor de Ultrasonido HC-SR04 de bajo costo.

Los **biosensores de perfil** pueden brindar información sobre la idoneidad de los productos agrícolas después de la cosecha al verificar el contenido nocivo e insalubre. Por ejemplo, los biosensores ópticos muestran un mayor potencial para la detección de patógenos, de residuos de pesticidas y medicamentos, pueden monitorear metales pesados y otras sustancias tóxicas permitiendo evaluar la seguridad del consumo.

El New York Times en un artículo de 2015 publicó: "Internet de las cosas y el futuro de la agricultura" destacando una presentación realizada por el investigador agrícola Lance Donny en un taller en Silicon Valley. Señalando que la agricultura ha pasado por etapas preindustrializadas e industrializadas, "la tercera etapa, que Donny llama Ag 3.0, está comenzando e involucra la explotación de datos de muchas fuentes: sensores en equipos y plantas agrícolas, imágenes satelitales y clima rastreo (Agricultureros, 2015). Lo anterior implica nuevos temas como el bajo uso de fertilizantes y químicos en la producción del agro, exigidos por gobiernos y personas activistas en temas de cultivos libres de químicos.

Otro aspecto es que los consumidores exigen saber datos específicos sobre la relación entre el gasto del agua usada en los cultivos, que productos químicos se utilizaron, cómo y cuándo fueron cosechados, de donde provienen, entre otros aspectos, en este sentido, las granjas inteligentes son un factor revolucionario. El uso y desarrollo tecnológico de sensores inalámbricos, sistemas de procesamiento en sitio, el IoT, la ciencia de datos y el Cloud computing ayudan a desarrollar esta agricultura.

Por su parte la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) indica que para el 2050 es necesario aumentar la producción de alimentos en un 70% para el sustento de la población mundial. Si

no ocurre este aumento, es probable que la escasez de alimentos se extienda por todo el mundo, aumentando los precios, las tasas de mortalidad y la pobreza. De allí la importancia de las granjas inteligentes. Las tecnologías emergentes aplicables a granjas inteligentes que se han desarrollado durante los últimos 10 años son:

- Sensores: Humedad, luz ultravioleta, humedad, temperatura, etc.
- Software: Soluciones de software y App, Backend y Frontend.
- Conectividad: WiFi, Zigbee, LoRa, Celular.
- Localización: GPS, satélite, triangulación.
- Robótica: cadenas de producción, tractores Autónomos, instalaciones de procesamiento.
- Análisis de datos: Deep Learning, Datamining, Big Data, IA.

Con este tipo de herramientas los agricultores pueden controlar la producción agrícola sin tener que estar presentes y así tomar decisiones estratégicas para mejorar la eficiencia y la producción. A continuación se describen los pilares sobre los que se fundamentan las granjas inteligentes. Ver Figura 2.

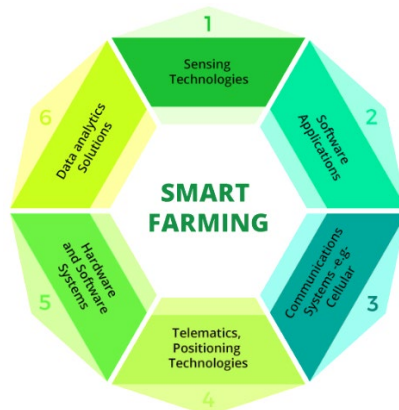


Figura 2. Pilares sobre los que se fundamentan las Granjas Inteligentes. Fuente (IoTforall., 2020).

## 1.2 Pilares de las granjas inteligentes

Los pilares sobre los que ubican las granjas inteligentes pueden ser observados desde una arquitectura de información y una arquitectura tecnológica.

### 1.2.1 Pilar de tecnologías de sensores

Este ha crecido en de forma exponencial y se debe a diferentes circunstancias, por ejemplo, la mejora en los protocolos de comunicaciones, disminución de costos de los sensores y accesibilidad a estos; en los sistemas agropecuarios los diferentes procesos pueden ser medidos y supervisados, existiendo diversas variables que deben ser monitoreadas como se puede observar en la Figura 2. La ventaja de las redes de sensores inalámbricos permite trabajar en la extensión de un cultivo que puede variar su tamaño y tipo.

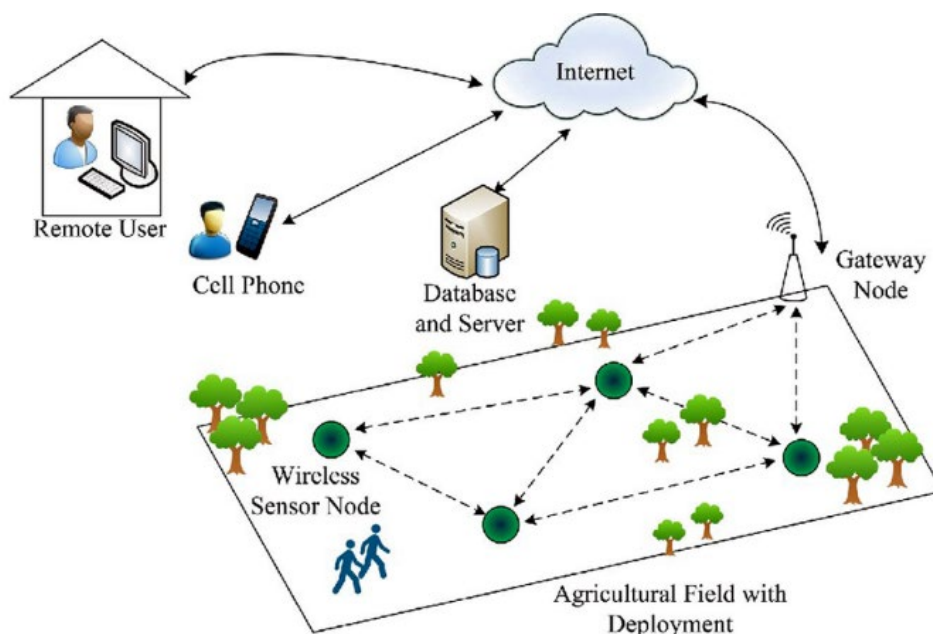


Figura 3. Sensores inteligentes para Granjas Inteligentes. Fuente: (Welsh, 2019).

### 1.2.2 Pilar de aplicaciones de software

Este pilar está creciendo, tradicionalmente las aplicaciones se enfocaban a la recolección, almacenamiento y presentación de datos, hoy en día la capacidad de almacenamiento ha cambiado y permite analizar grandes cantidades de información, y sobre todo diversa información la cual puede ser analizada por diferentes tipos de analítica.

### **1.2.3 Pilar de sistemas de comunicaciones**

Constituyen el elemento que permite dinamizar el flujo de información y sirven de apoyo para la solución de los problemas que tienen particularidades en el sector agropecuario como se observa en la Figura 4.



*Figura 4. Sistemas de comunicaciones y software para Granjas Inteligentes.*

### **1.2.4 Pilar de Redes telemáticas y sistemas de posicionamiento**

Este pilar se soporta en los sistemas de comunicaciones y da solución a la adaptación de los datos y la información dándole sentido a los datos, las redes telemáticas son fundamentales pues proveen todos los protocolos necesarios para realizar la transmisión de datos de forma coherente a través de las diferentes capas de los modelos TCP-IP

Los sistemas de posicionamiento GPS permiten conocer en tiempo real la ubicación de ciertos cultivos y la producción de estos, también permite conocer si se presenta algún tipo de plaga y como esta puede ser contenida en tiempo real.

### **1.2.5 Pilar de sistemas de hardware y software**

Es el núcleo que permite trabajar en campo para realizar el monitoreo, supervisión y automatización de los diferentes procesos, a nivel de hardware se tienen desarrollos a la medida de empresas líderes como Adafruit del sector de la IoT que venden sus productos especializados, pero los costos son altos. Una alternativa es recurrir al desarrollo de aplicaciones de tipo open hardware

como Arduino, Raspberry Pi y el uso de software libre como Linux y diferentes versiones. Ver Figura 5.

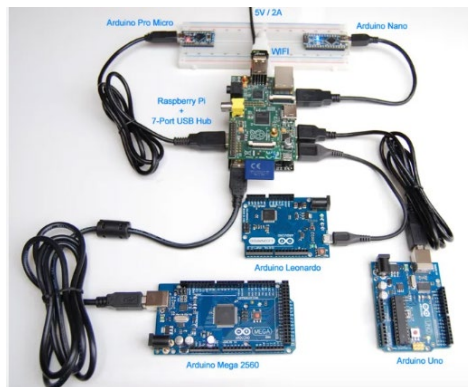


Figura 5. Integración de Raspberry Pi y Arduino. Fuente (PasanId, 2019).

### **1.2.6 Pilar de soluciones de analítica de datos**

Este pilar se apoya en las aplicaciones que permiten, a partir de las bodegas de datos, analizar el comportamiento de los sistemas para tomar decisiones mediante el uso de Inteligencia Artificial, el uso de Data Mining, Big Data o Machine Learning, son ejemplos de los procesos de ciencia de datos que se pueden usar para el análisis de grandes cantidades de datos.

De acuerdo a esta premisa y a la gran cantidad de información que envían los sensores es posible ver el comportamiento de los cultivos y su relación con el agro.

Una conexión de interés entre las Granjas Inteligentes y las Ciudades Inteligentes nos permite traslapar desde sus diferentes marcos de aplicación, las arquitecturas tecnológicas y de información que permiten concebir el uso de sistemas de geoposicionamiento y drones que permiten monitorear rendimientos, realizar muestreos de suelos, seguimiento de manejos de fertilidad, gestión de nutrientes automáticos, interconectados con sensores de temperatura, humedad, lúmenes, PH, entre otros, así como el uso de datos espaciales, analítica de datos, Internet de las cosas, tecnologías digitales, Big Data, Inteligencia Artificial, ciberseguridad, robots autónomos, sensores inalámbricos, realidad aumentada y simulación.

## Capítulo 2

### Cambio climático y su incidencia en el entorno rural

En este capítulo se presentan algunos aspectos relacionados con el cambio climático y la importancia de este en el sector del agro.

#### **2.1 Cambio climático**

El clima es un sistema complejo que interactúa con diferentes variables como olas de calor, sequías, inundaciones, tormentas y otras condiciones climáticas extremas, por lo que es necesario desde la ingeniería definir modelos que permitan comprender la dinámica de cada uno de los sistemas y la relación entre ellos (Olufemi, Okocha, & Olufemi, 2014).

La agricultura es uno de los factores vitales para el ser humano. Para la implementación de ésta, se han de tener en cuenta factores como: estado del suelo, clima, tipo de cultivo, recurso hídrico, entre otros. Otro de los aspectos importantes es el manejo de tecnologías y químicos para mejorar el tiempo de producción, cantidad y calidad, dentro de los que encontramos: Sistemas de riego de gran escala, maquinaria de arado y recolección, semillas

genéticamente modificadas, fertilizantes inorgánicos que aceleran la producción, pesticidas, etc.

Uno de los factores que afecta el agro es el cambio climático, como lo describe la FAO en 2009 “Los impactos del cambio climático en la agricultura y el bienestar humano incluyen los efectos biológicos en el rendimiento de los cultivos, las consecuencias del impacto sobre los resultados, incluyendo precios, producción y los impactos sobre el consumo per cápita de calorías y la malnutrición infantil (Nelson, 2009)”. Otras consecuencias son: tierra infértil, desperdicio de recursos naturales, contaminación, baja producción, enfermedades, disminución de la biodiversidad (Food and Agriculture Organization, 2015).

Para contrarrestar o disminuir estos factores, se diseñan distintas maneras de cultivar que no afectan los alimentos y ayudan a mejorar el medio ambiente. Por ejemplo, los alimentos orgánicos libres de sustancias químicas, o los cultivos, los cultivos verticales, hidropónicos, aeropónicos y acuapónicos, etc. En este tipo de cultivos se pueden controlar ciertas variables para mejorar la calidad y producción. Pero el problema de estos cultivos es la baja producción.

Es muy frecuente escuchar en las noticias que hay escasez de alimentos (Dehollain, 1995), no solo en Colombia sino a nivel mundial, esta situación se puede generar por varios motivos, algunos por causas naturales y otros por el impacto del hombre. A nivel mundial luego de ocurrir un desastre natural como por ejemplo el temblor del 2016 en Ecuador (Argudo, 2016) donde las vías de acceso a las ciudades se deterioraron casi por completo, originó que llevar alimentos a las ciudades afectadas se convirtiera en un procedimiento logístico complejo.

Después de una catástrofe es primordial suministrar alimento, agua y medicina para prevenir más pérdidas humanas, pero no solo los desastres naturales generan escasez de alimentos, por ejemplo, en Colombia son muy frecuentes los paros nacionales, entre los que se encuentran el camionero y campesino, cuando estas dos comunidades entran en huelga generan escasez de alimento y precios altos.

Las anteriores problemáticas que impactan la seguridad alimentaria de los territorios (Olufemi, Okocha, & Olufemi, 2014) se contrarrestan con una agricultura inteligente que mejora los procesos de producción, la competitividad, la calidad, y por ende disminución de la pobreza.

El impacto del cambio climático se evidencia en las sequías, enfermedades, plagas y otros tipos de perturbaciones que afectan no solamente la producción, si no que afecta de forma escalonada diferentes actividades en toda la cadena de valor, desde el cultivo, procesos logísticos de transporte entre otros. Uno de los procesos en la cadena alimentaria es la refrigeración que se usa para conservar los productos. Garantizar la cadena de frío es fundamental para la salud de los consumidores, el sistema de enfriamiento tiene altos consumos eléctricos, que también aportan al efecto negativo del cambio climático.

Otro efecto importante del cambio climático en los sistemas agropecuarios es la deforestación para su uso agrícola y el abandono de cultivos que afecta las capas de vegetación causando erosión, así mismo promueve la aparición de especies invasoras de vegetación que también es perjudicial. Los cambios de uso del suelo generan cambios que afectan el ambiente, comprendido las diferentes capas, desde la superficial hasta las raíces de las plantas que sujetan las capas superiores del suelo, que en caso de erosión pueden generar deslizamientos de masa, amenazando la vida de las personas y arriesgando la infraestructura de los cultivos (Olufemi, Okocha, & Olufemi, 2014).

La deforestación en zonas protegidas causa un gran impacto para la humanidad como la que eventualmente ocurre en el Amazonas, donde se han documentado zonas de pastoreo que eliminan zonas de bosque para uso extensivo de la ganadería.

Las variables del efecto del cambio climático hacen referencia al vapor de agua, el dióxido de carbono o CO<sub>2</sub>, metano, óxido nitroso y los halocarbonos, los anteriores se relacionan a las actividades humanas, esencialmente por la quema de combustibles fósiles, de vegetación, vertederos de basura, desechos

y animales en pastoreo, así como en productos químicos usados en fertilización, alimentación entre otros, todo lo anterior, evidencia la necesidad del uso de la tecnología para conocer y controlar procesos agropecuarios. Las granjas inteligentes buscan ser amigables con el ser humano, aunque el solo uso de las tecnologías no es suficiente debido a la baja capacidad del recurso humano en adaptarse y apropiarse a las últimas tecnologías, por lo que los planes de migración, actualización y cambio deben venir acompañados de planes de formación.

La relación de la agricultura y el clima tiene un efecto global pero se refleja en un momento y un lugar específico, elementos como la temperatura, la nubosidad, la humedad, la precipitación y los vientos afectan los cultivos, así como las tormentas eléctricas, los tornados y los monzones. La variabilidad climática se refiere a variaciones en el estado prevaleciente del clima en todas las escalas temporales (Olufemi, Okocha, & Olufemi, 2014), lo que dificulta los procesos de predicción y propone nuevos retos en la investigación científica para lograr nuevos modelos que actúen de forma coordinada entre diferentes fuentes de información para procesar algoritmos y notificar.

## Capítulo 3

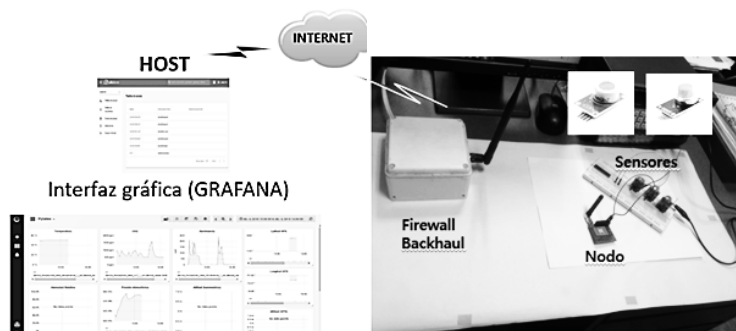
### IoT y sus aplicaciones en el agro

IoT se define como una red de dispositivos físicos que contienen software y sensores, los cuales obtienen información y comparten esta con otros dispositivos (González, 2017). IoT es una red heterogénea porque hace uso de diferentes dispositivos, para el manejo de redes, procesamiento de datos, capacidades de almacenamiento de datos y potencia de transmisión, entre otros. Por lo que necesita de diferentes protocolos de red (Atlam, 2013).

IoT es una red con protocolo de área extendida con cobertura hasta 15 Km, con línea de vista, de bajo consumo, que se usa en aplicaciones diversas en la banda de 2.4 GHz, sin licencia ISM (*Industrial, Scientific and Medical radio bands*). El protocolo estándar LoRa WAN, cuenta con tres capas: capa física o de transmisión, capa de acceso al medio MAC y la de aplicación, para la transmisión de información a una tasa de datos entre 0.3 y 50 Kbps.

Debido a su naturaleza, IoT puede abarcar una variedad de escenarios diversos, uno de ellos es su aplicación en el monitoreo de la calidad del aire en tiempo real o reportar información de las precipitaciones y caudal de los ríos en Colombia. En la Figura 6 se observa una red IoT de una estación móvil para

transmitir los datos hacia un servidor. La estación móvil se diseñó y construyó con un microchip de la familia PIC.



*Figura 6. Estación móvil conectada al servidor mediante red IoT*

El Cluster of European Research Projects (Vermesan, 2009) definió IoT en su Strategic Research Roadmap como: “una infraestructura de red global y dinámica con capacidad de auto configuración basada en protocolos de comunicación estandarizados e interoperables donde las cosas (things) físicas y virtuales tienen identidades, atributos físicos, personalidad virtual, y haciendo uso de interfaces inteligentes se integran perfectamente en la red de información”.

Por su parte, (Kosmides et al., 2015), (Fernández, Alonso, & Casanova, 2015) han señalado que toda la información que manejaban las computadoras incluida la Internet dependía casi completamente de los seres humanos (introducida por diversos medios) y que los seres humanos tienen limitaciones tanto en tiempo, exactitud y en la atención que esto involucra para capturar otros tipos de datos del mundo real. Fries (2011) describe IoT como el "Internet de las cosas que permite que las personas y las cosas se conecten en cualquier momento, en cualquier lugar, con cualquier cosa y cualquier persona, idealmente utilizando cualquier ruta / red y cualquier servicio".

Históricamente diferentes conceptos y tecnologías se han desarrollado los cuales se aproximan a IoT, conceptos como telemetría y sensores remotos entre otros, lo anterior se configura en una arquitectura de IoT que se vuelve dinámica al permitir ser al mismo tiempo transversal entre capas y horizontal entre dispositivos, protocolos y servicios, por lo que esta arquitectura de red ha crecido en tamaño, acceso y facilidad de comprensión generando nuevas

oportunidades y sobre todo nuevos escenarios de aplicación los cuales se han configurado en diferentes servicios, a continuación se presenta una breve descripción.

### 3.1 Arquitectura IoT

Un sistema IoT se ubica generalmente sobre los procesos, por lo que la información es generada por múltiples tipos de dispositivos, los cuales dependiendo del hardware y de su programación, procesan la información de diferentes maneras, para así transmitir a diferentes ubicaciones que pueden ser cercanos o lejanos y se conecta a diferentes aplicaciones.

El IoT World Forum (IWF) presentó un modelo de referencia de IoT en octubre de 2014 (Cisco Systems, 2014), el modelo propuesto se organiza en siete niveles, en la Figura 7 se observa el modelo de referencia de IoT, la información que recorre el modelo lo realiza de forma bidireccional.

El nivel uno es el físico, que contiene dispositivos y controladores que monitorean, supervisan y controlan objetos. Estos objetos representan las cosas en el IoT (Cisco Systems, 2014), en este modelo se incluyen dispositivos Edge computing. Los nodos de Edge son dispositivos que reciben datos de sensores y otras fuentes simples, teniendo una capacidad de procesamiento que le permite lanzar ciertos servicios para procesar, analizar y tomar decisiones en el lugar del proceso sin necesidad de recurrir al Cloud, esto permite no congestionar canales de comunicaciones, reprocesar operaciones y simplificar procesos.

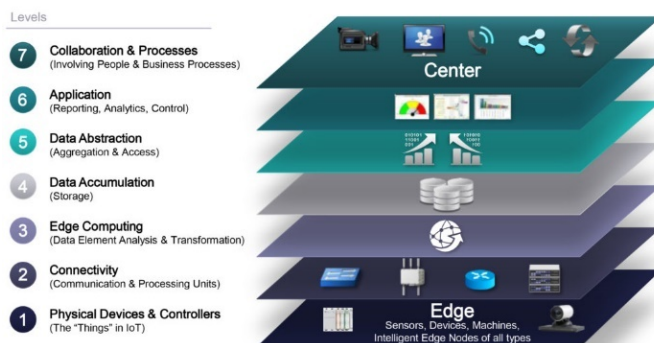


Figura 7. Foro mundial IoT modelo de referencia. Fuente (Cisco Systems, 2014).

El nivel dos, hace referencia a la conectividad para redes locales y área amplia para la comunicación con Internet donde se tienen diferentes dispositivos como: conmutadores, enrutadores, puertas de enlace y firewalls. Este nivel permite que los dispositivos se comuniquen entre sí y con aplicaciones en otras plataformas (Cisco Systems, 2014).

El nivel tres, hace referencia a Edge computing (Tuwanut, 2015) y a Fog computing, los cuales convierten el flujo de información para el almacenamiento y el procesamiento de medio y alto nivel. Esta capa tiene la característica que puede estar cerca al proceso lo que permite disminuir flujos de canal, pérdida de datos y falta de comunicación, por lo anterior este nivel es adecuado para sistemas de alertas tempranas.

El nivel cuatro es el almacenamiento de datos, los cuales son provenientes de diferentes dispositivos IoT. Estos datos son filtrados y procesados por la capa de Edge computing. El nivel cinco, es de abstracción y agregación de datos para que las aplicaciones puedan acceder a ellos de una manera más fácil y eficiente. El nivel seis, es de aplicación donde se produce la interpretación de la información. El nivel de colaboración y de procesos identifica a los usuarios que pueden comunicarse con IoT (Cisco Systems, 2014).

Para el proceso de estandarización diferentes empresas se han enfocado en diferentes áreas por lo que los principales aportes realizados por las organizaciones se destacan, la IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) en grupos de trabajo 802.15 y el protocolo 802.15.4, en la Tabla 1 se describen los principales aportes a los estándares.

*Tabla 1. Proceso de Estandarización de IoT. Fuente (González, 2013).*

| <b>Organización</b>                          | <b>Proyecto</b> | <b>Plataforma</b>                              | <b>Protocolo</b> |
|----------------------------------------------|-----------------|------------------------------------------------|------------------|
| Comité técnico M2METS                        | FlexWare        | Interdigital                                   | SCADA            |
| 3GPP TSG Service & System Aspect             | SIRENA          | Orange labs Home                               | Modbus           |
| TIA TR 50 Comité de Ingeniería               | SODA            | EDF R&D Smart Grids Experimental platform UpnP |                  |
| IETF                                         | UseNet          | Wuxi Instituto de las cosas China              | NAT-PMP          |
| Global ICT Forum estandarización de la India | Exalted         | Trangram Japón                                 | DPWS             |
| ITU                                          | AIM             | HPcanSe                                        | CoAP             |
| Open Mobile Alliance                         | eSENSE          | EMMON                                          | 6LoWPAN          |
| DMTF, M2M Standardization Task Force         | OpenWSN         | Alcatel Home Sensor Gateway prototype          | MQTT             |
| OMG                                          | Intel iris Net  | BOSP                                           | JXTA             |
| EPCGlobal                                    | Berkeley's WEBS | Intel Framework                                | Zigbee           |

### **3.2 Plataformas de Hardware**

Uno de los principales elementos de la expansión de IoT es la creación de tarjetas de desarrollo que permiten implementaciones de forma rápida mejorando el acceso de las personas a estos dispositivos a continuación se describen algunos:

1. TelosB: la plataforma de código abierto TelosB fue diseñada por la UC Berkeley para ofrecer capacidades de experimentación de última generación, para el desarrollo de investigaciones de Low Power o simplemente como plataforma de experimentación de redes de sensores inalámbricos (Postscapes, 2021).
2. Z1 de Zolertia: la plataforma Z1 ha sido desarrollada por la compañía Zolertia con base en Barcelona. Es una plataforma de desarrollo para redes de sensores inalámbricos con fines de investigación fundamentalmente. Sin embargo, el producto final puede ser usado también en entornos de producción ya que dispone de carcasa protectora (Postscapes, 2021).
3. OpenMote-CC2538: la plataforma OpenMote ha sido desarrollada por la empresa con el mismo nombre y con base en Granollers (España). Esta plataforma ha alcanzado el grado de madurez necesario para poder ser considerada una plataforma apta para entornos de producción (Postscapes, 2021).
4. @ANY de Adaptative Network Solutions: la compañía Adaptative Network Solutions con base en Saxoni (Alemania) dispone de una plataforma completa de soluciones basada en el estándar de comunicaciones 802.15.4 (Adaptative Network Solutions, 2014) y tecnologías tales como Zigbee y 6LowPAN. Dispone de dos gamas de soluciones, una para la banda de 2.4 GHz y otra con emisores en la banda inferior a 1 GHz, siendo su única diferencia el emisor de RF (Postscapes, 2021).
5. Panstamp: son pequeños módulos inalámbricos programables desde el IDE de Arduino. Cada módulo contiene una MCU ATmega328P y una interfaz de RF CC1101 de Texas Instruments, que proporciona la potencia de procesamiento y la conectividad necesaria para crear motas inalámbricas de baja potencia (Postscapes, 2021).
6. TinyDuino: el TinyCircuits TinyDuino es una placa Arduino compatible en un paquete ultra compacto. Imagínese las posibilidades de tener todo el poder de un Arduino Uno en un tamaño de menos de un cuarto (Postscapes, 2021).
7. Arduino Uno: Arduino es una plataforma electrónica de prototipos de código abierto basado en flexibilidad, hardware y software fácil de usar. Está

pensado para artistas, diseñadores, aficionados y cualquier persona interesada en la creación de objetos interactivos o entornos (Postscapes, 2021).

8. RFDuino: Arduino, microcontrolador compatible inalámbrico habilitado, bajo costo (Postscapes, 2021).
9. XinoRF: es una placa de desarrollo Electrónica compatible con Arduino UNO R3 de a bordo con un radio de datos 2 - wayCiseco SRF, que es compatible con la programación por el aire (Postscapes, 2021).
10. Ciseco: OpenKontrol Gateway: Es compatible con Wi-Fi, RF de baja potencia (muchos tipos), Ethernet y Bluetooth. Está diseñado para ser utilizado las 24 horas del día por lo que es muy baja potencia a tan sólo medio vatio (Postscapes, 2021).
11. Pinoccio: un microcontrolador para la Web inalámbrica con Wifi, batería Li-Po, y radio incorporada. (Postscapes, 2021).
12. Raspberry Pi: es una placa computadora desarrollado en el Reino Unido por la Fundación Raspberry Pi. La Raspberry Pi es un ordenador de tamaño de tarjeta de crédito que se conecta a su televisor y un teclado (Postscapes, 2021) Edge Computing.
13. Edge computing es un paradigma de computación distribuida que permite trabajar con datos descentralizados con dispositivos de red, diferentes redes y topologías, diferentes tipos y formatos de datos de las aplicaciones, existen cuatro elementos básicos que caracterizan al Edge computing: (ECC, 2017).
  - Computación en tiempo real.
  - Computación liviana y ágil.
  - Puertas de enlace inteligentes.
  - Sistemas distribuidos inteligentes.

La arquitectura de Edge computing presenta requerimientos particulares que se traducen en cuatro capas de funciones: (ECC, 2017).

- Capa de recursos básicos
- Capa de virtualización
- Capa de servicios de virtualización (Edge Virtualization Functions) EVF.
- Bases de datos.

La capa de recursos básicos contempla dos capas con dos elementos el primero son las redes definidas por software SDN que buscan la asociación de las políticas de red y la seguridad, el segundo elemento son las redes sensibles

al tiempo TSN como nuevo paradigma de desarrollo de conectividad de ethernet industrial, la segunda capa es la informática que busca a través de la computación heterogénea conectar diferentes tipos de instrucciones y arquitecturas, con datos estructurados y no estructurados, para el análisis de los datos se implementan sistemas inteligentes con aprendizaje profundo, redes neuronales, lógica difusa así como otros tipos de metodologías, otra capa trabaja el almacenamiento con series temporales para tener una escritura rápida, persistencia, consulta agregada multidimensional, precisión e integridad de los datos. (ECC, 2017).

La segunda capa es de virtualización para la arquitectura básica y la de host, la tercera capa es la de servicios de virtualización (Edge Virtualization Functions) EVF que tiene funciones de virtualización perimetral, servicios distribuidos de tejido de conectividad, análisis de datos, manejo de persistencia y seguridad, con las redes definidas por software se trabajan conexiones masivas, automatización de políticas, protección de servicios de flujo de datos y ciclo de vida de aplicaciones (ECC, 2017).

Una característica de esta arquitectura es la informática y el hardware heterogéneo que permite trabajar CPU, board simples, FPGA entre otros enfocándose en la optimización del procesamiento de la memoria, optimización de la programación de tareas y la cadena de herramientas para el desarrollo (ECC, 2017).

La última capa es la persistencia, en esta capa el almacenamiento de información depende del tipo de nodo Edge, si este nodo está muy cerca de las cosas la persistencia es pequeña, pero esta aumenta a medida que se acerca a una capa Fog o Cloud, dependiendo de la topología y la capacidad de conexión el almacenamiento puede ser distribuido y basado en prioridades, teniendo que estar acorde al modelado de datos para que la optimización de consultas sea ágil (ECC, 2017).

El tejido de servicio debe tener características como, anidamiento, dependencia y herencia entre servicios, entrada y salida de cada servicio, restricciones de servicio como QoS, seguridad y confiabilidad entre otros.

### **3.3 Nodos de Edge computing**

Los nodos de Edge tienden a confundirse con los nodos de Fog, hay que tener en cuenta que la capacidad de procesamiento de recursos externos es mayor en los nodos Fog, por tal motivo los nodos Edge están más cerca de las cosas con una capacidad de procesamiento menor, pero con la capacidad de realizar una analítica a medida de forma directa con la capa de cosas. Los nodos de Edge tienen tres elementos fundamentales:

- Redes
- Computación
- Aplicaciones

La función principal de la red se enfoca a la conexión del nodo a través de interfaces de red, por lo anterior debe manejar diferentes protocolos y contemplar el descubrimiento de topologías para lograr la rápida implementación y configuración de la red. Esta debe tener la capacidad de administración, control, mantenimiento predictivo, idealmente deben ser redes administradas por software SDN, todo esto genera inteligencia de borde para tener puertas de enlace inteligentes y generar colaboración en conexión para los datos y poder orquestar servicios para tener adaptación de protocolos de bus y conexión en tiempo real.

En las redes existe un elemento fundamental que es la seguridad de los datos para protección:

- Dispositivos
- La red
- Los datos
- Las aplicaciones

La computación heterogénea se debe a la necesidad de tener capacidad de cómputo cerca de los procesos con posibilidad de desplegar servicios de inteligencia artificial, la cual es necesaria para el análisis de los grandes volúmenes de información que se pueden adquirir en el proceso, los nodos Edge están en la capacidad de trabajar con diferentes tipos de conjuntos de instrucciones y diferentes arquitecturas lo cual permite optimizar las cargas de trabajo del hardware.

El almacenamiento de información depende del tipo de proceso, pero una nueva tendencia son las bases de datos cronológicos de series temporales, las cuales permite un preprocesamiento rápido y garantizan la integridad de la información, otro elemento de aplicaciones son los servicios por medio de virtualización donde en la arquitectura básica, las funciones como el hipervisor, se ejecutan directamente en la plataforma de hardware del sistema, y luego el sistema operativo y las funciones de virtualización se ejecutan bajo el hipervisor. En la arquitectura del host, las funciones de la capa de virtualización se ejecutan bajo el sistema operativo del host (ECC, 2017).

Los nodos de Edge computing usan diferentes tecnologías como redes definidas por software SDN, tecnologías estándar de Ethernet TSN, computación heterogénea HC, bases de datos temporales TSDB.

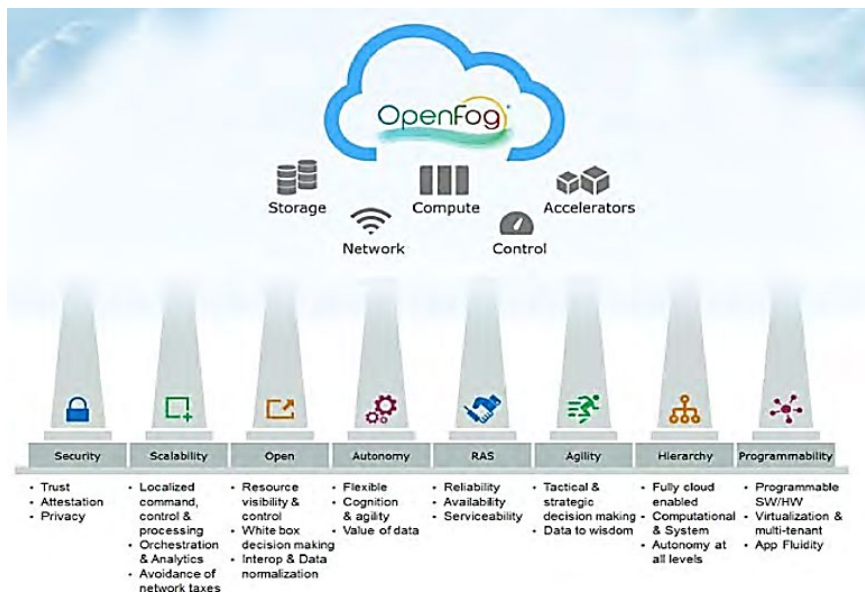
### **3.4 Fog Computing**

La arquitectura de referencia inicial fue desarrollada por el consorcio OpenFog (fundado por ARM, Cisco, Dell, Intel, Microsoft y la Universidad de Princeton) y en el año 2018 es aprobada por la IEEE en el estándar oficial (IEEE SA, 2018). La arquitectura tradicional se enfoca en la conexión en la nube y los diseñadores dan por hecho que siempre esta se encuentra, lo anterior en diferentes situaciones no puede ser correcto, por ejemplo la congestión de la red debido a la gran cantidad de datos tomados por redes IoT, lo que genera problemas de rendimiento, seguridad, ancho de banda, rendimiento, latencia, eficiencia y confiabilidad de la información, lo anterior teniendo en cuenta que la infraestructura y arquitectura de red siempre esté funcionando y exista comunicación, pero en otros contextos como las emergencias o desastres naturales, puede que las redes no existan, colapsen o funcionen de forma intermitente (OpenFog, 2017).

Fog computing es una arquitectura que busca tener una infraestructura y conectividad cerca de los procesos para garantizar el procesamiento, análisis e inteligencia en el borde de la red, se puede pensar que Fog computing es una extensión de la nube, pero evita la dependencia de esta, teniendo en cuenta que no se elimina del todo la conexión con la nube, esto debido al tipo de servicios que se desplieguen, los sistemas deben estar en la capacidad

de seleccionar a que arquitectura seleccionan para el flujo de datos (OpenFog, 2017).

Fog computing se basa en ocho pilares que son: seguridad, escalabilidad, recursos abiertos, autonomía, fiabilidad, disponibilidad y facilidad de servicio, agilidad, jerarquía y programabilidad. En la Figura 8 se observa la distribución de los pilares.



*Figura 8. Pilares de OpenFog. Fuente (OpenFog, 2017)*

Bajo la arquitectura de IoT en la Figura 9 del OpenFog se presentan dos escenarios, los cuales pueden cumplir las mismas tareas, cada uno puede tener un comportamiento emergente característico de los sistemas complejos, los cuales permiten al auto descubrimiento de los nodos del Fog para intercambiar información, procesos o servicios. Este tipo de escenarios son ideales para la toma de decisiones las cuales se dividen en eventos temporales de días, o en la operación que se encuentra cerca al proceso (OpenFog, 2017).

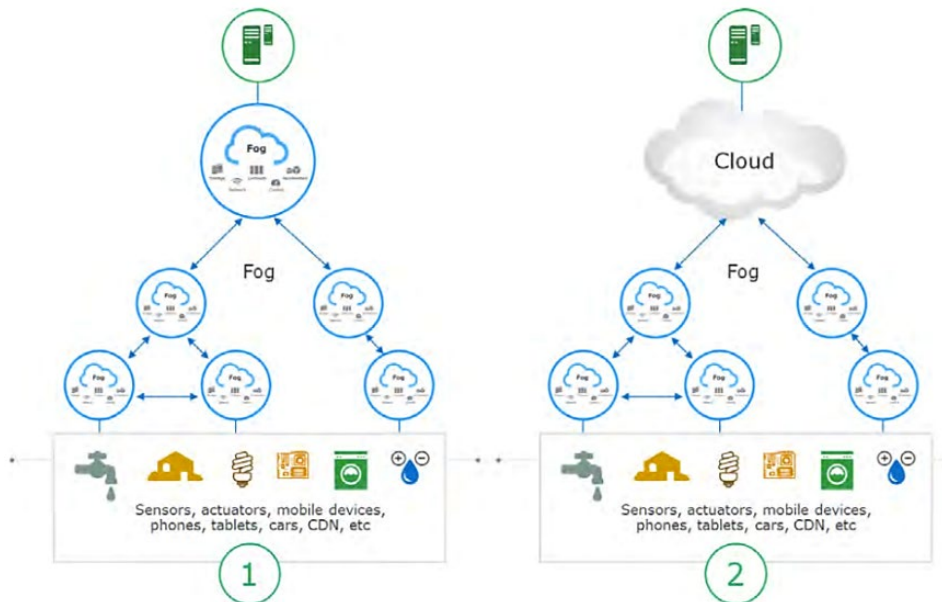


Figura 9. Jerarquía de Fog. Fuente (OpenFog, 2017)

En la Figura 10, se presentan de forma abstracta las capas, donde se incluye perspectivas, que se muestran en barras verticales grises a los lados de la descripción, son de esta forma debido a que deben cruzar todas las capas por lo que interactúan también entre ellas.

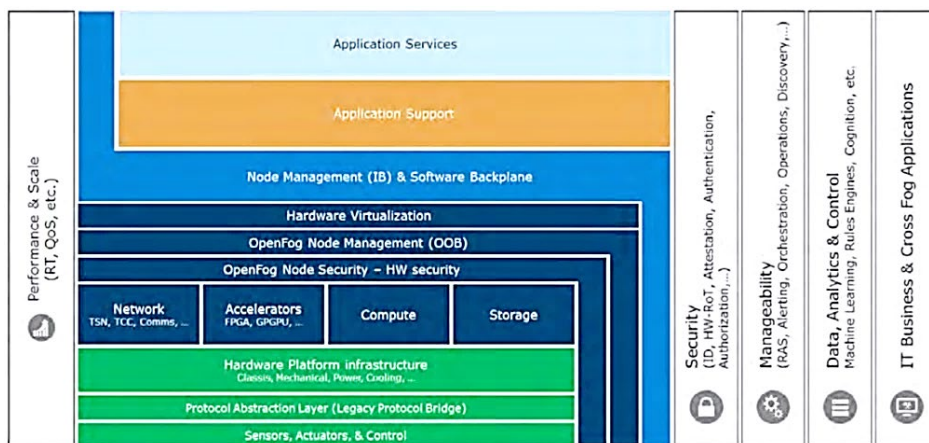


Figura 1. Descripción de la arquitectura. Fuente (OpenFog, 2017)

El rendimiento hace referencia a cumplir con una baja latencia, así como también manejar tiempos críticos, redes sensibles al tiempo, protocolos

de tiempo de red, etc. La seguridad de extremo a extremo es un factor crítico para garantizar la integridad de los dispositivos, esto incluye corrupción intencional y no intencional. La capacidad de administración es la gestión de la implementación del Fog, que incluyen RAS, DevOps, etc. El análisis y control de datos es la capacidad de los nodos Fog para ser autónomos, para analizar datos. La actuación y control debe ocurrir en el nivel o ubicación adecuados según el escenario. No siempre está en el límite físico, puede estar en un nivel superior. Las aplicaciones de negocios de TI generan un ecosistema para las aplicaciones donde operan, estas deben tener la capacidad de abarcar todos los niveles, por lo que los servicios de las aplicaciones también deben ser escalables según los escenarios, el proceso y el hardware disponible (OpenFog, 2017).

### **3.5 Cloud Computing**

La computación en la nube hace referencia a un conjunto de recursos y servicios que pueden ser usados a través de la red para ejecutar una carga de trabajo, la arquitectura de referencia de computación en la nube NIST define cinco actores principales: consumidor de nube, proveedor de nube, operador de nube, auditor de nube y agente de nube (Liu et al., 2011).

El consumidor de la nube mantiene una relación comercial con los proveedores de la nube y utiliza los recursos y servicios que le proveen, el proveedor es el responsable de poner un servicio a disposición de las partes interesadas, el auditor de la nube realiza una evaluación de los servicios, la operación de los sistemas, el rendimiento y la seguridad de la nube, el cloud bróker gestiona el uso, el rendimiento y la entrega de servicios en la nube y el cloud carrier proporciona conectividad y transporte de servicios en la nube de Cloud (Ferro, 2016).

El servicio de orquestación es la composición de componentes del sistema para apoyar las actividades de los proveedores de la nube en la disposición, coordinación y gestión de los recursos informáticos, el modelo abstracto es de

tres capas que representa la agrupación de tres tipos de componentes del sistema que los proveedores de la nube deben componer para brindar sus servicios. La primera capa es de servicio, así mismo se encuentran las interfaces de acceso, la segunda capa es la abstracción de recursos y control, contiene los componentes del sistema para el acceso a los recursos informáticos físicos a través de la abstracción de software. La capa tres contiene los recursos informáticos físicos, como recursos de hardware, redes, componentes de almacenamiento y otros elementos de infraestructura física (Zamora et al., 2018).

La gestión de servicios en la nube tiene las funciones relacionadas con el servicio que son necesarias para la administración y operación requeridas de la nube, como el soporte comercial, el aprovisionamiento y la configuración. Por otro lado, el soporte comercial es el conjunto de servicios del negocio que tratan con clientes y procesos de soporte, este contiene gestión de clientes, gestión de contratos, gestión de inventario, contabilidad y facturación e informes y auditoría.

Para comprender mejor el funcionamiento del Cloud, NIST propone una taxonomía de cuatro niveles para describir los conceptos clave sobre la computación en la nube, en la Figura 11 se observa la descripción:

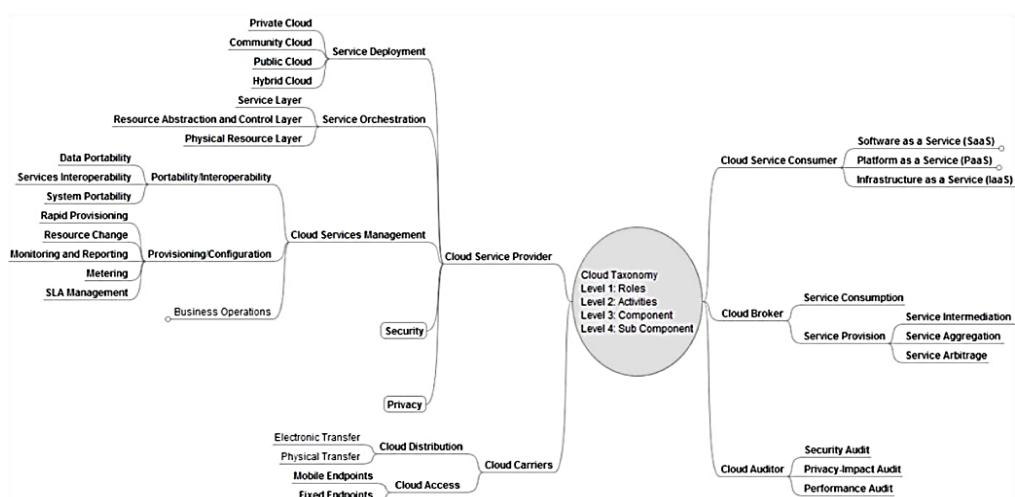


Figura 11. Taxonomía Cloud

### 3.6 Plataforma para desarrollar aplicaciones IoT

Existen múltiples plataformas de desarrollo tanto de software libre como privativo a continuación se describen las más conocidas:

- **Node-RED:** es de código abierto, permite la visualización de datos de dispositivos que se conectan, desarrollada por el departamento Emerging Technology de IBM. (BBVA, 2020).
- **Eclipse IoT:** plataforma que permite el desarrollo en Java de aplicaciones en un entorno IoT (BBVA, 2020).
- **OpenHUB:** plataforma para la integración de dispositivos (BBVA, 2020).
- **IoT SyS:** sistema de comunicación para IPv6, 6LoWPAN (BBVA, 2020).
- **Contiki:** es un sistema operativo de código abierto para IoT (BBVA, 2020).
- **RIOT:** sistema operativo para IoT RIOT (BBVA, 2020).
- **TinyOS:** sistema operativo para redes de sensores inalámbricas. (BBVA, 2020).
- **Brillo:** sistema operativo para IoT de Google (Foundation OpenJS, 2020).

### 3.7 Otras aplicaciones de IoT

#### 3.7.1 Manejo de tratamientos

Los sistemas de IoT se usan para el monitoreo de variables y el suministro de tratamientos, generalmente plaguicidas de origen químico que, si bien en muchas ocasiones no son mortales, pueden llegar a causar enfermedades, también puede repercutir en infecciones tanto en los consumidores como en los agricultores (OMS, 2016).

Los pesticidas orgánicos son aquellos que vienen de fuentes naturales. Estas fuentes naturales usualmente son plantas, como en el caso de piretrum (piretrinas) rotenonas o riania (insecticidas botánicos), o minerales como el ácido bórico, criolita o tierra diatomácea. La mayoría de los pesticidas orgánicos son insecticidas (Bellinger, 1999).

#### 3.7.2 Detección de plagas y enfermedades

Las plagas que afectan los cultivos causan enfermedades y alteración del funcionamiento de las plantas, se manifiestan por síntomas como pudriciones, manchas y deformaciones. Algunos de los agentes causales son: hongos, virus

y/o bacterias (Ben-Joseph, 2019). La dinámica de las plagas requiere conocer y entender sus diferentes formas, estados, cómo afectan y en qué medida a cada cultivo. El éxito de su control está en reconocerlas y saber cuándo y cómo controlarlas. Éste se puede realizar a través IoT para monitorear el ambiente y variables como temperatura y humedad relativa.

### **3.7.3 Sistema de riego**

Son las diferentes formas de suministrar el agua necesaria para el crecimiento las plantas en el momento justo. Se diferencian según la estructura, su forma de aplicación, ahorro del agua y efectividad.

#### **3.7.3.1 Riego por goteo**

Consiste en un conjunto de tubos interconectados con pequeños orificios que se sitúan al pie de las plantas por donde el agua va cayendo según la velocidad programada, abriendo o cerrando las válvulas de los agujeros. Su instalación es sencilla, acoplando un programador en la toma de agua principal y desplegando los diferentes tubos por el cultivo. Con este método, el agua no se desperdicia al entrar en contacto directo con las raíces, evitando así que se infiltre o se evapore. Además, es una opción económica (Twenergy, 2019) .

Puede instalarse en diversas condiciones topográficas y es muy versátil. La automatización del sistema de riego por goteo requiere de poca mano de obra tanto para su instalación como para su uso. Además, evita la proliferación de enfermedades al reducir el contacto directo del agua (humedad) con el follaje, tallos o frutos.



## Capítulo 4

### Redes de sensores inalámbricos para granjas inteligentes

Los procesos de monitoreo y supervisión para las actividades agropecuarias cubren diferentes variables, las cuales permiten conocer las actividades que se realizan. Dependiendo de estas actividades depende la tecnología, algunas variables de interés se describen a continuación:

#### **4.1 Variables edafoclimáticas**

Las variables edafoclimáticas se emplean en una variedad de climas diferentes para realizar plantaciones comerciales frutícolas, anudado a esto existe la necesidad de realizar estudios para predecir qué zonas sobresalen para un óptimo desarrollo del fruto (Solís, 2011). Así, (Trucíos et al., 2009) describen que las condiciones climáticas y edafológicas regulan las condiciones hidrológicas y la cobertura vegetal de una región. Las variables edafoclimáticas usadas para medir y controlar los cultivos son las siguientes:

##### **4.1.1 Humedad del ambiente**

Se refiere la presencia de vapor de agua en el aire. Aunque casi siempre se piensa en la atmósfera simplemente como una masa de aire, lo cierto es que el

vapor de agua juega un papel muy importante en su composición, incluso en las zonas áridas.

#### **4.1.2 Humedad del suelo**

Se denomina humedad del suelo a la cantidad de agua por volumen de tierra que hay en un terreno. Establecer el índice de humedad del suelo es de vital importancia para las actividades agrícolas.

#### **4.1.3 Luminosidad**

De toda la energía radiante del sol, las plantas solo aprovechan el 40% de la luz visible (radiación lumínica o luz), del rojo al violeta y es útil para realizar la fotosíntesis (Soria, 2012). La luz solar tiene gran importancia en la producción y reproducción de los cultivos, por ello agricultores, ingenieros y técnicos, deben considerar en sus técnicas la posición solar como uno de los elementos principales en el trazo de plantaciones.

#### **4.1.4 Evapotranspiración**

Es la suma de dos fenómenos que tiene lugar en la relación cultivo-suelo, la transpiración del cultivo y la evaporación del suelo, la misma constituye la pérdida fundamental de agua, a partir de la cual se calcula la necesidad de agua de los cultivos (Allen, 2006).

#### **4.1.5 Condensación**

Se denomina condensación al proceso físico que consiste en el paso de una sustancia en forma gaseosa a forma líquida. Este cambio de fase genera una cierta cantidad de energía llamada “calor latente” (Absorsistem, 2020).

#### **4.1.6 Precipitación**

Se entiende por precipitación a la caída de partículas líquidas o sólidas de agua. Es cualquier tipo de agua que cae sobre la superficie de la tierra (Geoenciclopedia, 2020).

#### **4.1.7 Presión atmosférica**

La presión en la atmósfera no es igual en todas partes. Fundamentalmente depende de la altura, siendo más alta cuanto más cerca del nivel del mar nos encontremos (Geoenciclopedia, 2020).

#### **4.1.8 Velocidad del viento (La escala de Beaufort)**

La escala de Beaufort es una medida empírica para la intensidad del viento, basada principalmente en el estado del mar, de sus olas y la fuerza del viento. Su nombre completo es escala de Beaufort de la fuerza de los vientos (Geoenciclopedia, 2020).

#### **4.1.9 Temperatura ambiente**

Relacionada con la temperatura en la atmósfera hace referencia al nivel de calor que tiene el aire en un determinado sitio y un momento específico.

### **4.2 Redes de sensores agroclimáticos**

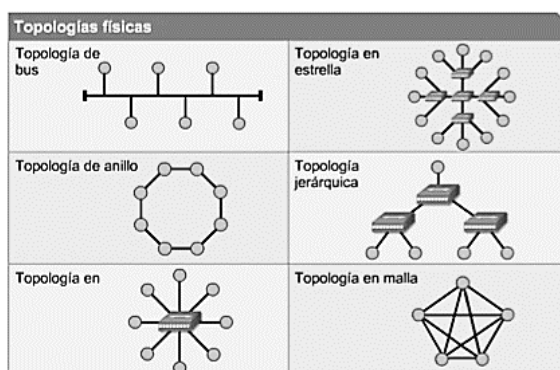
Las redes de sensores se pueden catalogar básicamente en dos tipos, redes con infraestructura y redes sin infraestructura, las primeras son redes muy usadas en el sector agropecuario debido a que garantizan la seguridad de la información. Las redes de sensores de este tipo requieren de una instalación especial debido a las condiciones ambientales y de los elementos de protección, los cuales deben resguardar contra la humedad.

Las redes de sensores para la agricultura generalmente presentan una baja carga de datos por lo que usan un bajo ancho de banda, trabajan paquetes pequeños que se intercambian con frecuencia entre un gran número de dispositivos que forman parte de la red y que muchas veces trabajan en tiempo real, la topología tradicional de comunicaciones es de maestro a esclavo y busca realizar la conexión a través de buses de campo, es de interés comprender que este es un tipo de arquitectura pero las problemáticas agropecuarias asociadas a la dificultad del acceso a la infraestructura y sobre todo a garantizar el acceso a las redes obligan a usar otro tipo de arquitecturas como IoT, Edge Computing y Fog computing.

El tipo de información que puede circular por las redes, indica el tipo de tecnología y red que se debe usar, en el caso de las redes con infraestructura de datos y control se pueden distinguir dos tipos de redes según la información que transporten:

- Redes basadas en comandos
- Redes basadas en estado.

En las redes basadas en comandos, la información es dada por una orden del nodo para el control del funcionamiento de otro nodo. En las redes orientadas al estado la funcionalidad de un nodo no depende de otro, cada uno envía mensajes en los que indicará a los demás nodos el estado en que se encuentra, por lo tanto, los nodos que reciben los mensajes modifican su estado en función de los nuevos requerimientos. Existen implementaciones que combinan ambos métodos, la configuración de los sensores puede ser realizada a través de diferentes topologías como se puede ver en la Figura 12.



*Figura 12. Clasificación de topologías de redes Cisco para uso rural.*

Al seleccionar una topología hay que definir el control de acceso al medio, que indica como los nodos accederán a la red. Buscando reducir o eliminar las colisiones y tiempo entre los diferentes paquetes de datos buscando maximizar la eficiencia de la red. En estas redes, los datos pueden ser generados por cualquier nodo, y se pueden direccionar de tres formas:

- **Unicast:** El paquete es enviado a un único nodo destino.
- **Multicast:** El paquete es enviado a un grupo de nodos simultáneamente.
- **Broadcast:** El paquete es enviado a todos los nodos de la red simultáneamente.

En este tipo de comunicación igual que en las demás, hay que tener en cuenta la seguridad de la red, que se puede observar desde la protección frente a los accesos no autorizados y protección frente a las fallas del sistema y averías. Aparentemente cuando se habla de sensores no se le da importancia a la información y control de estos, pero en los sistemas agropecuarios adquiere un gran significado porque la alteración de alguna variable puede causar la pérdida de la producción, impactando todo el proceso logístico que implica la pérdida, eliminación del material perdido, sustitución y pérdida del tiempo de la producción perdida, esto implica un costo y valor alto para una organización que en ciertos casos puede soportar una pérdida pero no más. Por lo anterior, se deben considerar todos los sistemas a controlar como críticos, por lo que se deben incluir equipos redundantes, y se deben considerar en las topologías diferentes áreas de instalación de sensores, a las difíciles condiciones de terreno el almacén debe considerar tener repuestos disponibles.

La seguridad también implica tener en cuenta la generación de las señales eléctricas, en especial en cultivos externos, para evitar pérdidas de datos. Se recomienda tener sistemas de regeneración como repetidores de red. La seguridad no solo va enfocada a la infraestructura y la información, también la de las personas, las condiciones de trabajo que presentan una alta humedad, además de alterar las condiciones de los equipos, también pueden causar daños en las personas.

Las redes con infraestructura presentan un conjunto de problemas en los proyectos del sector agropecuario, y uno de gran importancia es la distancia de comunicación, la cual se ve afectada por los diferentes obstáculos, así mismo como la sostenibilidad eléctrica.

### 4.3 Plataformas de comunicaciones

La convergencia de tecnologías permite combinar diferentes elementos para poder tener un control distribuido de los sistemas de monitoreo y control. En el medio de infraestructura se pueden comunicar por el mismo medio (cable UTP, Fibra Óptica o la interfaz RS-485), a su vez también se usan aplicaciones como SCADA, la cual da como ventaja la comunicación a grandes distancias.

**WAN:** Wide Area Network, por sus siglas en inglés, podemos considerar como WAN a todas aquellas redes de telecomunicación que unen grandes distancias ya sea entre ciudades, regiones o países. Unir dos puntos lejanos mediante una red WAN suele implicar tener que atravesar porciones de la red pertenecientes a varias compañías o estados, por lo que podríamos hablar de un tipo de red pública. Este es por tanto el rango superior llegando a comunicarse los dispositivos de un lado a otro del mundo (Valle, 2014).

**MAN:** Metropolitan Area Network, por sus siglas en inglés. El rango de este estándar está comprendido entre una red local y varias manzanas de una ciudad (o algunas ciudades juntas como máximo). Al contrario que las WAN estas redes pueden pertenecer a una sola organización, aunque es normal que se comparta entre varias para soportar mejor los gastos (Valle, 2014).

**LAN:** Local Area Network, por sus siglas en inglés. Las principales diferencias entre LAN y WAN son mucha menor área de cobertura y la ausencia de líneas de telecomunicación en leasing (son privadas). Se considera una LAN desde la red de una empresa hasta la de un hogar, y por lo tanto es una red que puede ser compartida (Valle, 2014).

**PAN:** Personal Area Network, por sus siglas en inglés. Estas redes de corto alcance cubren de varios centímetros a algunos metros, por lo tanto, cubre la menor proporción de espacio de todas las tecnologías mencionadas. Otra gran diferencia es que estas redes son privadas y personales no pudiendo ser compartida (Valle, 2014).

Las redes de sensores inalámbricos permiten enfrentar las problemáticas anteriores a costos relativamente bajos, permitiendo conectar diferentes dispositivos a distancia para el monitoreo o supervisión de diferentes variables,

la información que capturan estos nodos es transmitida de forma inalámbrica, esta característica permite diversificar el uso de los sensores, permitiendo escalar soluciones y realizar despliegues rápidos, aumentando la densidad de nodos de comunicaciones.

Las redes inalámbricas o en inglés Wireless Sensor Network, permiten además dotar de cierta autonomía y administración a la red, porque plantea escenarios de colaboración, la versatilidad de las WSN permite usar tecnologías como: WiFi, BlueTooth, Zigbee, GPRS, RF y LoRa. Ver Figura 13.

Un caso tradicional es la necesidad de tener un nodo especial que pueda recoger la información de varios sensores, a este nodo se le llama un Gateway, estos tienen un costo alto en comparación a los sensores, pero solucionan problemas como centralización de información para retransmitir, sirve como multiplexor de datos y también puede actuar como una estación de monitoreo independiente con ciertas capacidades que dependen de las características del hardware. Las redes de sensores inalámbricos son útiles en su topología, que en la generalidad de los sistemas agropecuarios usan redes de estrella, pero en los sistemas que incluyen animales se suele usar topología Mesh y topologías híbridas.

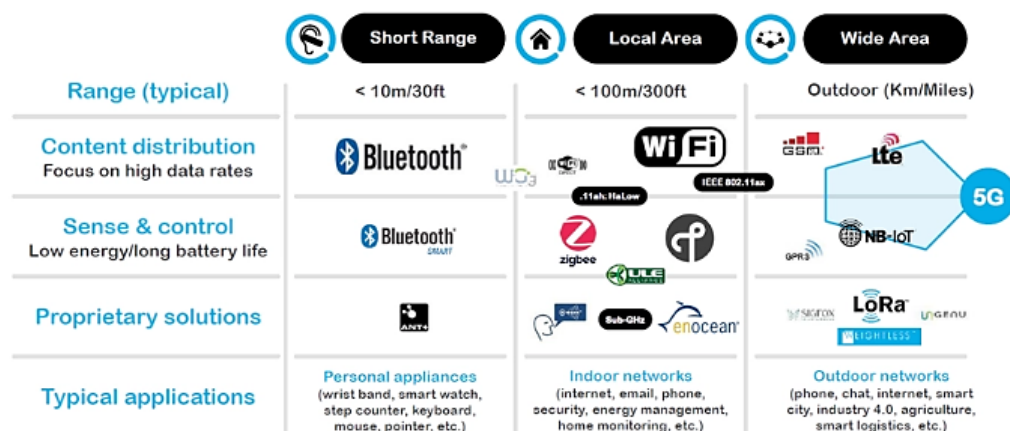


Figura 13. Redes de corto, mediano y largo alcance para IoT y Smart Farming. Fuente (Qorvo, 2020).



# Capítulo 5

## Automatización de granjas inteligentes

Un sistema automático de control permite monitorear variables como temperatura, luminosidad y humedad. Antes de abordar la automatización, veamos algunas definiciones de los sistemas de cultivo.

### **5.1 Sistemas de cultivo**

#### **5.1.1 Acuicultura**

Es la cría y reproducción de peces y otras especies acuáticas en un ambiente natural o artificial controlando las diferentes variables del agua como la temperatura, pH, hierro, amonio, biomasa, etapas de crecimiento, alimento, etapas de reproducción etc.

#### **5.1.2 Aeroponía**

En este sistema las plantas crecen en agujeros de láminas de termopor que tiene forma triangular y sirve para producir plantas que tengan hojas de poca altura, las raíces se encuentran suspendidas y encerradas por una cámara de aspersión, por lo cual las raíces se encuentran en oscuridad y total humedad (Malca, 2001). Y permite el mejor uso del agua, ya que se recicla la mayor parte, y no contamina mantos freáticos (Cortazzo, 2015).

### **5.1.3 Acuaponía**

Aprovecha al máximo el recurso hídrico en donde el objetivo principal es la cría de peces u otras especies acuáticas y vegetales. Suele recircularse el agua de los peces hacia las plantas y en sentido contrario, ya que los peces producen residuos y estos con ayuda de microbios producen fertilizantes para las plantas y las plantas a su vez filtran el agua de nuevo para los peces.

### **5.1.4 Hidroponía**

Se origina con la necesidad de producir alimentos por parte de poblaciones que habitaban en regiones sin tierras fértiles para cultivar, pero que contaban con fuentes de agua suficientes. De tal manera que la hidroponía es muy antigua. Hubo civilizaciones enteras que la usaron como medio de subsistencia, y existen datos históricos que sustentan la afirmación que los cultivos hidropónicos se conocían en diversas localizaciones geográficas como los Jardines Flotantes de los Aztecas, llamados chinampas. Las chinampas eran balsas construidas con cañas y bejucos, que flotaban en el Lago Tenochtitlán (México), estas se llenaban con lodo extraído del fondo poco profundo del lago, rico en materiales orgánicos que suministraba los nutrientes requeridos por las plantas. A comienzos de los años treinta, científicos de la Universidad de California, pusieron los ensayos de nutrición vegetal a escala comercial, denominado “Hidropónico” a este sistema de cultivo (EUROPE, 2014).

### **5.1.5 Cultivos NFT**

NFT – Técnica de la solución nutritiva recirculante. Los primeros sistemas NFT (Nutrient Flow Technique) se introdujeron en los años setenta. El primer sistema NFT fue desarrollado en Inglaterra por Allen Cooper. En los sistemas NFT se conduce continuamente una capa fina de agua de alimentación mediante gravedad a través de un sistema de tuberías por las raíces. El alimento que sale del medio radicular se recoge en un depósito de alimentación y se administra nuevamente a la planta, ver Figura 14.

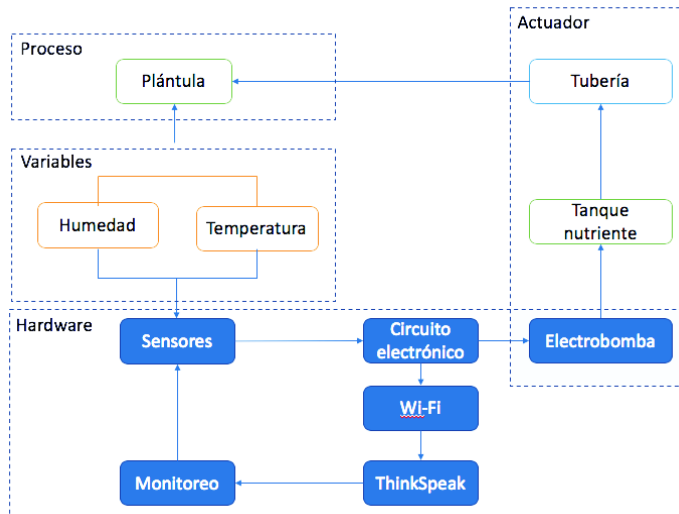


Figura 14. Proceso de cultivo NFT. Fuente: autores.

El agua representa una de las mayores ventajas del sistema, al ser mínimo el gasto de energía que debe realizar la planta en la absorción, pudiendo aprovechar ésta en otros procesos metabólicos. La renovación continua de la solución nutritiva en el entorno de la raíz permite un suministro adecuado de nutrientes minerales y oxígeno, siempre, claro está, que se realice un correcto manejo del sistema (Magán, 2019).

Los componentes del sistema NFT son: Tanque de la Solución Nutritiva, Electrobomba, Canales de Cultivo (Tuberías de PVC), Solución Nutritiva (Sánchez, 2013). Ventajas: Permite un control más preciso sobre la nutrición de la planta. Simplifica los sistemas de riego, porque elimina la esterilización del suelo y asegura una cierta uniformidad entre los nutrientes de la planta. Maximiza el contacto directo de las raíces con solución nutritiva, por lo que el crecimiento de los productos es acelerado.

Con NFT se cultiva: lechuga, rúcula, berros, perejil, cilantro, albahaca, orégano, tomate, tomate cherry, fresas, calabacín, col china, pimiento, melón, entre muchas otras especies (Sánchez, 2013).

## **5.2 Electrónica para el agro**

La Ingeniería Agrícola aparece con la creación de los primeros colegios de agricultura y artes mecánicas, en los Estados Unidos. En las postrimerías del siglo XIX más del 95% de la población norteamericana vivía en zonas rurales y poco a poco fueron emigrando a los grandes centros urbanos atraídos por el auge de la revolución industrial. Ante este nuevo hecho, la producción en el campo debía ser muy tecnificada para liberar mano de obra en el sector rural. En 1886 la Universidad de Nebraska, ofrecía en su Escuela de Agricultura el curso de Ingeniería Agrícola (Universidad Nacional de Colombia, 2015).

### **5.2.1 Agromática**

Se puede definir como el punto de contacto entre la agricultura y la Informática. Por sus características y necesidades, el productor agropecuario requiere herramientas que combinan conceptos de bases de datos, modelos de simulación y sistemas de soporte de decisiones con telemática (Greñón, 2015).

### **5.2.2 Agrónica**

Permite tener un conocimiento y control de los procesos más acabado y ajustado a las necesidades del agro (Soria, 2012). Se soporta en el procesamiento oportunos de datos e información para la toma de decisiones.

## Capítulo 6

### Fuentes naturales hídricas en la Región Andina

Colombia se encuentra distribuida en 6 regiones naturales; una de ellas es la Región Andina que se ubica en la parte central del país. Conformada por 17 departamentos es la más poblada con más de 34 millones de habitantes y a su vez es la más activa económicamente. Por ella pasan las 3 cordilleras (oriental, central y occidental).

Las evidencias del cambio climático en los ecosistemas de esta región han sido evidentes durante las últimas décadas, se ha observado una disminución en los glaciares e incremento en la temperatura ambiente de los páramos de aproximadamente  $+0.9^{\circ}\text{C}$  por década (Benjamin et al., 2018). Por otro lado, el aumento en la temperatura del aire durante el siglo XX ha sido alrededor de alrededor de  $+0.7$  a  $+0.8^{\circ}\text{C}$  y este impacto también se ha observado en un aumento en las lluvias (Cuesta et al., 2012).

El fenómeno anterior afecta los ecosistemas oro biomas andinos y altoandinos que son de alto valor en la regulación hídrica, y por lo tanto en el mantenimiento de agua de alta calidad (Rodríguez et al., 2006). En el rango altitudinal de los oro biomas andinos (2400–3300 m) se ubica la mayor población del país (27%), esto nos lleva a explicar el alto proceso de transformación que han sufrido los mismos durante los últimos años (IAvH. 2011), el aumento en el cambio climático causa que en los bosques de niebla se

produzca una fuerte reducción en las condiciones de nubosidad de bajo nivel, así como un incremento en los días soleados, esto logra afectar las condiciones micro climáticas que dan origen a una alta biodiversidad (Still, Foster, & Schneider, 2002), algunas proyecciones realizadas durante los últimos años, concluyen que si estos incrementos en la temperatura continúan, a 2050 estos ecosistemas y su biodiversidad se verían impactados negativamente, causando que el 44% de las aves de los Andes Colombianos se afecten sustancialmente y la producción hídrica también disminuya (Rojas, Sosa, & Ornelas, 2012).

El mayor proveedor de agua de los ecosistemas andinos es el oro bioma de páramo. Los páramos juegan un papel importante en la regulación y el balance hídrico de los ecosistemas aguas abajo, debido a sus condiciones edáficas. Los páramos actúan como esponjas que retienen grandes cantidades de agua y la liberan poco a poco durante la época de pluviosidad baja o sequía (Rodríguez et al., 2006).

En los últimos años se ha reportado que los páramos también han sufrido un impacto negativo con un incremento de aproximadamente  $+1^{\circ}\text{C}$  por década en sus temperaturas máximas (día), este registro evidencia que se han incrementado los días soleados. Lo que lleva a leves tendencias en las temperaturas mínimas en las horas de la noche y la madrugada y una mayor incidencia a heladas (Hofstede, et al., 2014), causando así también un impacto negativo en los cultivos que la población campesina ha sembrado en estos terrenos. El fenómeno del cambio climático causa una eventual modificación en los regímenes de lluvia y nubosidad, por lo que en algunos años se podrá observar la afectación a los ecosistemas de páramos que proveen especialmente agua (Cárdenas, 2016).

Colombia posee una precipitación total de 3000 mm-año, un volumen nacional neto precipitado de 2112 kilómetros cúbicos año y un caudal (58 l/s/km<sup>2</sup>) que es tres veces mayor que el promedio suramericano y seis veces mayor que la oferta hídrica específica promedio a nivel mundial (Vargas, 2015). En una de sus regiones se encuentra alojado el páramo más grande del mundo lo que lo lleva a consolidarse como una de las fuentes hídricas naturales más grandes del globo, ver Tabla 2.

Tabla 2. Cuadro de disponibilidad hídrica mundial. (Vargas, 2015).

| B.M/ONU m3/año persona | IDEAM  |
|------------------------|--------|
| Colombia               | 50.000 |
| Promedio Mundial       | 7.700  |
| América del Norte      | 16.300 |
| Europa                 | 4.700  |
| África                 | 6.500  |
| Asia                   | 3.400  |
| B.M/ONU m3/año persona | IDEAM  |
| Colombia               | 50.000 |
| Promedio Mundial       | 7.700  |
| América del Norte      | 16.300 |

Colombia posee 2.680.000 hectáreas de humedales y 743.000 cauces de aguas de 15.519 Km de longitud fluvial en un área territorial de 1.141.748 km, y un aumento significativo en su población que genera un deterioro ecosistémico (Vargas, 2015). Muchos lugares donde se encuentran dichas fuentes hídricas, también son sitios turísticos. El mal uso del territorio ha llevado a afectaciones por la ganadería y cultivos extensivos. Al respecto, la Contraloría General de la Nación estableció 6 puntos críticos respecto a las fuentes hídricas colombianas:

1. Alta presencia de sedimentos por deforestación y deterioro de los suelos.
2. Alta contaminación originada por aguas residuales domésticas.
3. Disposición inadecuada de basuras de origen doméstico.
4. Alta contaminación originada por el uso de plaguicidas.
5. Alta contaminación originada por aguas residuales industriales.
6. Disposición inadecuada de basuras de origen industrial.

## 6.1 Fuentes hídricas en la Región Andina

Estas fuentes están directamente relacionadas a la cantidad de páramos que existen en esta región, Colombia posee aproximadamente 82 páramos y más del 95% de estos se encuentran en la Región Andina, y proveen el 70% del agua; siendo el más importante el páramo del Sumapaz ubicado sobre la cordillera oriental en Cundinamarca, provincia del Sumapaz, posee una extensión de 333.420 hectáreas. En este mismo se encuentra ubicado el

Nevado del Sumapaz que tiene una altura de 4.306 msnm, también aloja una gran cantidad de lagunas de origen glaciar, algunas de ellas son: Laguna de Chisacá. Laguna La Guitarra. Laguna El Cajón y Laguna del Nevado (Sociedad Geográfica de Colombia, 2015).

Otro páramo que se destaca es el de Rabanal, estrechamente relacionado con el cauce del Río Bogotá. Le aporta recurso hídrico a las cuencas del río Orinoco a través del río Garagoa en el departamento de Boyacá siendo la segunda cuenca del río Magdalena a través del río Ubaté.

Por otro lado, en esta región se encuentran 8 de los 9 nevados lo que hace que se consolide como la zona más rica en ecosistemas y fuentes hídricas. Y se encuentran 18 embalses o represas que son la principal fuente de energía eléctrica del país y cuyas construcciones causan un impacto negativo en los ecosistemas. En los últimos años se han delimitado los territorios para proteger los ecosistemas de estos megaproyectos (Parques Naturales, 2016).

Estas fuentes de agua, permiten la generación hidroeléctrica en Colombia. De acuerdo con el informe presentado por la firma XM, operador del Sistema de Interconexión Nacional la oferta hidroeléctrica del país es del 68%, con 28 plantas hidroeléctricas de 20MW o mayor a esta cifra y 115 con capacidad menos a 20MW.

# Capítulo 7

## Estaciones meteorológicas

Las estaciones meteorológicas tienen como función registrar elementos meteorológicos para la observación de fenómenos naturales. Pueden denominarse de diferentes maneras según el objetivo que cumplan. Se tienen estaciones climatológicas para la determinación del clima de una región particular. Estaciones sinópticas para monitorización atmosférica a nivel mundial y en tiempo real y cuyos datos sirven para la elaboración del pronóstico del tiempo. Estaciones agrometeorológicas encargadas de la medición de magnitudes relacionadas con elementos meteorológicos y biológicos y utilizadas en agricultura y cuidado forestal. Existen también estaciones aeronáuticas para brindar información del clima a lo largo de una ruta aérea y finalmente, estaciones de observación especial que miden en la atmósfera variables como radiación solar, concentración de ozono o magnitudes eléctricas. Una estación meteorológica puede pertenecer a varias de las categorías anteriormente descritas, según el instrumental con el que se encuentre dotada.

### **7.1 Estaciones meteorológicas automáticas**

De acuerdo con (Organización Meteorológica Mundial, 2018) una estación meteorológica automática es aquella *“en la que se realizan y transmiten observaciones automáticamente”*, este tipo de estaciones sirven para aumentar

el número y la fiabilidad de las observaciones de superficie, ya que estas permiten reducir los errores humanos. Este tipo de estaciones está compuesto generalmente de tres partes: percepción de variables, procesamiento de información, y transmisión de datos (telemetría).

Las estaciones meteorológicas automáticas incluyen un conjunto de sensores básicos que constituyen el equipo mínimo requerido en una estación meteorológica convencional. Este conjunto de sensores está integrado por un barómetro (para medir la presión atmosférica), anemómetro (para medir la velocidad y dirección del viento), termómetro (para medir la temperatura del aire), higrómetro (para medir la humedad relativa del aire), pluviómetro (para medir las precipitaciones) y algún elemento para medir la radiación solar (usualmente un piranómetro). El resto de los elementos necesarios para otras aplicaciones (como para la medición de variables ambientales) son elementos sensores para la medición de parámetros del suelo o para la medición de la afectación de otros parámetros en los cultivos (medidores de radiación fotosintéticamente activa, de humedad en las hojas, de apertura de estomas en las hojas de las plantas, etc.). Algunas referencias de sensores son: sensor de humedad del suelo ADCOM SM1, sensor de nivel OTT RLS, sensor de precipitación Young 52202 (Orozco y Rodríguez, 2015).

Teniendo en cuenta que las estaciones meteorológicas tienen una alta probabilidad de terminar ubicadas en regiones remotas e incluso de difícil acceso, existen estaciones con enlaces satelitales y que utilizan las redes de comunicaciones móviles a través de tecnología GSM y GPRS (Orozco y Rodríguez, 2015).

Las últimas estaciones incluyen compatibilidad con redes Ethernet y soportan la pila de protocolos TCP/IP con lo que se habilita la transmisión a través de Internet, por ejemplo. Un aspecto llamativo es que varias de las soluciones comerciales incluyen una opción para utilizar la red telefónica pública conmutada (PSTN) o sistemas de telefonía digital (DSL) para la transmisión de datos.

Con el fin de establecer redes de sensores que no necesariamente deban estar ubicados junto a la estación, se contemplan protocolos de comunicaciones como RS232, RS485, Modbus y CAN. Todos ellos necesitan un entorno físico para la transmisión de información. La elección de la solución de comunicaciones va estrechamente relacionada con las necesidades del cliente y con la ubicación específica de la estación, que puede alentar o descartar algunas soluciones particulares.

La visualización es un aspecto importante ya que puede llegar a ser necesaria la monitorización in situ de alguna variable o parámetro, acción que puede dar lugar a una corrección inmediata. En ese tipo de situaciones es importante contar con un medio que muestre los datos de relevancia para el cliente. La mayoría de las estaciones tienen como medio de presentación de los datos, pantallas de cristal líquido (LCD) cuyas dimensiones van desde 16x2 (2 líneas de 16 caracteres) hasta pantallas LCD de 128x64 (128 píxeles de ancho y 64 píxeles de alto) que permiten el trazado de gráficas. Algunas soluciones más vistosas, incorporan pantallas táctiles, combinando en un solo dispositivo la función de presentación y captura de datos de la aplicación.

La captura de datos es una función complementaria a la de presentación, aunque no necesariamente van de la mano. Aun cuando la información acerca de la introducción de datos no esté disponible en la mayoría de las aplicaciones, es posible que esa introducción se pueda hacer mediante pulsadores e incluso mediante teclados alfanuméricos.

La memoria de las estaciones meteorológicas automáticas se expresa frecuentemente no en términos de bytes sino en términos de las muestras que puede almacenar. El tiempo en que tarde en llenarse depende del periodo de muestreo de la magnitud de interés (que puede ir de algunos segundos a algunos minutos); en la medida en que el periodo de muestreo aumente, mayor será el tiempo requerido para que la memoria se llene (Orozco y Rodríguez, 2015).

Con la posibilidad de transmitir los datos de manera remota hacia una estación central o hacia un servidor externo, el parámetro de la disponibilidad de memoria tiende a ser menos crítico, puesto que estos destinos deben

contar con la infraestructura adecuada en cuanto a capacidad de almacenamiento y procesamiento se refiere, lo cual deja la memoria local de la estación automática dimensionada según las situaciones críticas que se contemplen (almacenamiento en caso de que no pueda establecerse la comunicación remota) o simplemente, en miras de tener un registro de respaldo en el que pueden almacenarse datos correspondientes a grandes periodos de tiempo (desde algunos meses hasta completar el año). Los datos utilizados en los registros gráficos pueden limitarse temporalmente; es decir, pueden seleccionarse entre datos por hora, diarios y mensuales, para tener diferentes marcos de análisis temporal de las magnitudes estudiadas.

La mayoría de los sistemas permiten la exportación de los datos tomados en archivos tipo ASCII, es decir archivos de texto plano que pueden interpretarse fácilmente. Esos archivos pueden ser archivos separados por comas (.csv), archivos de código fuente e incluso archivos que pueden abrirse y trabajarse en una hoja de cálculo convencional. Aparte de archivos de texto plano, algunos sistemas permiten la creación de archivos HTML o XML, con miras a la posibilidad de ver los archivos en aplicaciones web convencionales a través de los navegadores corrientes o dentro de la misma aplicación.

Muchas de las posibilidades del software están ligadas directamente con el sistema de comunicaciones que utilice la estación para la descarga y transmisión de datos (en caso de requerirse); según esto, algunos pueden mostrar y procesar datos en tiempo real, ejecutar tareas correctivas o simplemente trabajar sobre los datos descargados.

Una de las características en este tipo de software es la determinación indirecta de parámetros relativos a la meteorología o relacionados con agricultura, a partir de los datos conocidos de primera mano (temperatura, humedad relativa, velocidad del viento, etc.). Dentro de esos parámetros determinados indirectamente, se encuentran el punto de rocío, evapotranspiración, índices de crecimiento, ráfagas de viento, entre otros.

Con la determinación de los parámetros indirectos mencionados anteriormente, pueden anticiparse situaciones climáticas que pueden impactar

una zona determinada. Eventos climatológicos como tormentas, nevadas o heladas son de gran impacto en cultivos de diferentes especies.

Algunos sistemas permiten la inclusión de alarmas para anticipar esos fenómenos y tomar las medidas pertinentes. Estas alarmas pueden enviarse a dispositivos móviles a través de correos electrónicos o mensajes de texto (SMS).

En este tipo de estaciones es importante que los datos se envíen de manera automática y la mayoría de estos sistemas representan una inversión considerable, por lo que muchos se empeñan en la producción de sistemas de bajo costo. En muchas ocasiones, bajo costo implica sacrificio en la precisión de los sensores y otras prestaciones del sistema.

Si bien en algunas aplicaciones el modelo mencionado anteriormente funciona sin problema, poner un sistema similar dentro de un cultivo de caña de azúcar, por ejemplo, puede ser poco práctico si se utilizan cables para comunicar los diferentes sensores ubicados sobre la extensión del cultivo (que podría llegar a ser muy grande). Contemplando situaciones similares y teniendo claro que muchas veces no pueden tenderse cables para incorporar los sensores al sistema de adquisición de datos, aparecen las redes de sensores inalámbricos (WSN, Wireless Sensor Network). En este tipo de redes, cada sensor está equipado con un sistema de adquisición de datos y el dato tomado, se envía a un equipo central en donde se almacena y/o procesa la información del sistema (Orozco y Rodriguez, 2015).

### **7.1.1 Sensores para estaciones meteorológicas**

Los instrumentos y sensores mencionados a continuación son utilizados para la medición de magnitudes relacionadas estrictamente con el clima y pueden encontrarse de manera genérica dentro de estaciones meteorológicas.

**Anemómetro:** permite medir la velocidad y dirección del viento. La dirección del viento señala de dónde viene y no hacia donde se dirige. Requiere de una veleta, para determinar la dirección de donde viene el viento. La

dirección se mide en el sentido contrario a las manecillas del reloj tomando como referencia el norte geográfico.

Según el principio utilizado para determinar la velocidad del viento, el anemómetro puede ser de varios tipos. Un primer anemómetro, conocido como anemómetro de rotación utiliza un sistema de cazoletas encargadas de girar en mayor o menor medida en función de la velocidad del viento. Existe también el anemómetro ultrasónico, que determina la velocidad del viento basado en el tiempo requerido para transmitir señales de sonido en direcciones opuestas, con la ventaja de no tener piezas móviles, por lo que se evita el desgaste y el mantenimiento asociado al sistema de cazoletas. El anemómetro de hilo caliente se basa en el principio de que la transferencia de calor por convección en un medio es función de su ventilación. Se utiliza un hilo de platino a 1.000°C (para garantizar independencia de la temperatura ambiente) y la velocidad del viento se determina midiendo la corriente necesaria para mantener el hilo a temperatura constante o la temperatura del hilo, cuando circula una corriente constante. El anemómetro ultrasónico se prefiere para aplicaciones de alta precisión y el anemómetro de hilo caliente se utiliza en situaciones en las que deben medirse velocidades de viento muy bajas. La velocidad del viento se mide en metros por segundo, kilómetros por hora o nudos. La dirección del viento se mide en grados.

**Pluviómetro:** es el instrumento para la medición de la cantidad de lluvia en un lugar. Existen varios tipos de pluviómetro, diferenciados por su forma de funcionamiento. Todos tienen en común un recipiente con un sistema que conduce el agua a un compartimiento especial en el que se realiza la medición. La medición puede hacerse de manera manual mediante la observación de una probeta graduada o de manera automática por medios electrónicos. Las unidades en las que debe interpretarse la lectura son milímetros de lluvia (mm). Un milímetro equivale a una precipitación de un litro de agua por metro cuadrado.

**Termómetros y sensores de temperatura:** dentro de una estación pueden encontrarse diversos termómetros, cada uno con fines particulares. Deben ubicarse en estructuras que impidan que sean afectados directamente por la

radiación solar, para lo que se utilizan casetas con ventilación mediante rejillas y de color blanco para reflejar la radiación solar. Algunos sirven para la medición de temperatura del aire, para registrar la máxima y mínima temperatura durante el día e incluso para determinar la humedad relativa.

**Higrómetros y sensores de humedad:** se utilizan para medir la humedad relativa del ambiente. Cuando se registra sobre el papel, se conoce como higrógrafos. Algunos de esos instrumentos en su versión analógica funcionan con cabellos humanos o pelos de camello como elemento sensible a la humedad. En dispositivos de estado sólido la medición de humedad se lleva a cabo mediante tres tipos de sensores diferenciados entre sí por su principio de funcionamiento: sensores capacitivos, sensores resistivos y sensores de conductividad térmica. Los sensores capacitivos (CHS) funcionan gracias a los cambios en la constante dieléctrica de un material (un polímero u óxido metálico) ubicado entre un par de electrodos, en presencia de un ambiente húmedo. Los sensores resistivos (RHS) basan su funcionamiento en el cambio de impedancia de un medio higroscópico (algún polímero conductor, sal o sustrato adecuado). Los sensores de conductancia térmica (TCHS) miden la diferencia entre la conductividad térmica del aire seco y del aire en presencia de vapor de agua. Su circuito está compuesto de dos termistores NTC conectados en una topología tipo puente.

**Barómetros:** son instrumentos para la medición de la presión atmosférica. Normalmente se encuentran barómetros de columna de mercurio que se dilata o contrae según el aumento o disminución de la presión. Para el registro de cambios de la presión atmosférica se utilizan instrumentos conocidos como barógrafos.

Para la medición de la presión atmosférica también es posible la utilización de sensores electrónicos. Puede hablarse en primer lugar de barómetros aneroides, que corresponden a elementos cuyo principio de funcionamiento no se basa en la dinámica de líquidos. Poseen una cápsula que se encuentra parcialmente llena de gas y un resorte que evita que la cápsula reacciona ante las diferencias de presión entre la ella y el exterior. Otros instrumentos se basan en la detección de desplazamientos en la frecuencia de resonancia

natural en elementos especialmente preparados, como cilindros de níquel con pared delgada o elementos piezo resistivos como el cristal de cuarzo.

**Medición de la radiación solar:** para la medición de radiación solar, inicialmente se tenían instrumentos complejos como el heliógrafo, encargado de la medición de la duración del brillo solar. El brillo solar es el intervalo de tiempo en el que el sol no es interferido por la nubosidad de la zona. Para determinarlo, se dispone de una lupa que concentra los rayos solares quemando un papel con una escala temporal definida para este fin. La banda de papel debe reemplazarse a diario y cambia su forma según la época del año. Actualmente se tienen dispositivos integrados especializados en la medición de la radiación solar en diferentes zonas del espectro. Por ejemplo, las plantas aprovechan la radiación entre los 400 nm hasta los 700 nm, rango denominado radiación fotosintéticamente activa (PAR, Photosynthetically Active Radiation). Una de las opciones para la medición de ese parámetro son los sensores fotométricos, que miden la radiación en el rango perceptible por el ojo humano. Otra opción para la medición de luz son las comúnmente conocidas fotoceldas o LDR (Light Dependent Resistor), que tienen la ventaja de ser baratas y de fácil consecución en el mercado, aunque son preferidas para la medición en espacios interiores. Para la medición de radiación fotosintéticamente activa existen también sensores cuánticos, que miden la densidad de flujo de fotones fotosintéticos (PPFD).

Existen también los piranómetros, que miden el total de la radiación solar. Se utilizan ampliamente en aplicaciones agrícolas, meteorológicas y de generación de energía eléctrica a partir de energía solar. El elemento sensor se fabrica de silicio y tiene dimensiones muy pequeñas. La salida del sensor es proporcional a la intensidad de la radiación incidente. A pesar de que el elemento sensor es pequeño, el dispositivo es pesado. Su precio es mayor respecto a los otros sensores, por su precisión, estabilidad y linealidad. Otros sensores utilizados para la medición de radiación solar son actinógrafos, piranómetros o pirheliógrafos.

## **7.2 Investigación sobre sistemas de medición medioambientales**

De acuerdo con Jadhav y Satao (2016), la necesidad de disponer de sistemas de medición de variables medioambientales que sean robustos, que funcionen sin ningún tipo de interrupción durante largos periodos de tiempo y que además reduzcan las tareas de mantenimiento, ha llevado a que se desarrollen sistemas multisensores que puedan supervisar y controlar dispositivos remotamente mediante la implementación de redes inalámbricas de sensores.

Las tecnologías más recurrentes para la interconexión inalámbrica de sensores y transmisión de información desde la estación meteorológica hacia el centro de monitoreo son: ZigBee, Wi-Fi, Bluetooth y GPRS. Cheng y Ho (2016) propusieron una red inalámbrica práctica de sensores (WSN) multicanal con el estándar ZigBee. La investigación se centró en mejorar el rendimiento de la red mediante el aumento de la relación de entrega de paquetes (PDR) con el uso de la tecnología TDM multicanal y el protocolo Cluster Tree. El estudio trató la interferencia que presenta ZigBee con la WLAN, y se desarrolló un método para evitarla, debido a que ambas transmitían a 2.4 GHz (Chen & Ho, 2016).

Estos sistemas pertenecen a una clasificación más general conocida por la sigla ESN, acrónimo de Environmental Sensor Networks y son utilizados, como su nombre lo indica para investigación y monitorización ambiental. Dentro de esa categoría pueden ubicarse los equipos como las estaciones meteorológicas, estaciones hidrológicas y de análisis de aguas, redes para detección y observación de plantas y animales.

Los sensores pueden ser tan variados como el tipo de magnitud o parámetro que quiera medirse o monitorizarse. Existen desde arreglos de cámaras fotográficas para la monitorización de cambios en la vegetación, sensores que analizan espectralmente la luz recibida (por ejemplo, los medidores de NDVI, Normalized Difference Vegetation Index) para determinar los estados de estrés vegetal, transmisores de VHF o dispositivos con GPS para el rastreo de animales, entre otros. Con esta variedad se abre la posibilidad de

integrar dispositivos y sensores para la creación de plataformas de múltiples sensores para análisis más completos y robustos.

### **7.2.1 Investigaciones realizadas en Colombia**

Los primeros trabajos (cerca al año 2001) se refieren a la instalación y puesta en marcha de estaciones climáticas y ambientales en la ciudad de Manizales. Ese proyecto particularmente contemplaba la medición de variables meteorológicas fundamentales (temperatura, humedad, velocidad y dirección del viento, precipitaciones y radiación solar) y la transmisión de los datos recolectados a una estación base ubicada en la Universidad Nacional.

Posteriormente se contempla la intervención de la Internet en el proceso de adquisición de datos, como solución a la medición en áreas remotas. Siguiendo la misma tendencia hay un par de trabajos enfocados a la telemetría, relacionados con sistemas de generación de energía eléctrica que requieren la transmisión de mediciones tomadas hacia estaciones concentradoras en las que se procesan y analizan. Es importante destacar la relevancia de la monitorización ambiental (actividad en glaciales y análisis hidrometeorológico en cuencas hídricas, por ejemplo) en la formulación y desarrollo de actividades de investigación en el área de interés de este estudio.

Los últimos trabajos realizados corresponden a la investigación de redes de sensores inalámbricas, enfocados hacia aspectos de procesamiento de datos, consumo energético y flexibilidad de las plataformas. Es igualmente relevante la aparición de un organismo no académico como Cenicaña, que realiza investigación relacionada con la tecnificación de cultivos estudiando estrategias para dar valor agregado a la información recolectada a través del sistema de posicionamiento global GPS. Cenicaña es uno de los pocos centros no académicos dedicado a actividades de investigación. Existen casos similares de gremios productores como: Cenipalma, Ceniflores o Ceniarrroz.

La actividad de investigación en estaciones meteorológicas universitarias la encontramos en la Universidad de Antioquia, Universidad Nacional sede Manizales y la Universidad de los Andes que registra los trabajos de investigación en redes de sensores inalámbricos.

En la Tabla 3 se observa la clasificación de las estaciones hidrometeorológicas que actualmente se encuentran activas dentro del Catálogo Nacional de Estaciones (CNE) del IDEAM, existen diferentes tipos de estaciones de superficie que el IDEAM categoriza dependiendo de sus variables y formas de medición, creando una red de estaciones de observación y registro de diferentes fenómenos atmosféricos.

Basado en la recopilación de datos hidrometeorológicos que se obtiene de la red de estaciones que se encuentran por todo el territorio nacional, el IDEAM genera información climática de interés para todo el país.

*Tabla 3. Clasificación de las estaciones hidrometeorológicas IDEAM.*

| <b>Categoría</b>        | <b>Sigla</b> | <b>Cantidad</b> |
|-------------------------|--------------|-----------------|
| Pluviometría            | PM           | 1166            |
| Linimétrica             | LM           | 308             |
| Climatológica Ordinaria | CO           | 269             |
| Linigráfica             | LG           | 350             |
| Hidrológica Automática  | HA           | 38              |
| Sinóptica Principal     | SP           | 42              |
| Climatológica Principal | CP           | 209             |
| Pluviográfica           | PG           | 123             |
| Mareográfica R          | MR           | 1               |
| Agrometeorológica       | AM           | 61              |
| Meteorológica Especial  | ME           | 36              |
| Sinóptica suplementaria | SS           | 7               |
| Radio Sonda             | RS           | 4               |
| Mareográfica            | MM           | 5               |
| Presión de Poros        | DEH          | 2               |
| <b>TOTAL:</b>           |              | 2621            |

### 7.3 Soluciones comerciales de estaciones meteorológicas automáticas

Las compañías agrupadas en la HMEI (Association of Hydro-Meteorological Equipment Industry) pueden ser de tamaño variable desde los más grandes fabricantes y proveedores hasta las pequeñas compañías. De los fabricantes de estaciones meteorológicas, los que tienen mayor presencia a nivel mundial son Campbell Scientific y Vaisala. La estación meteorológica Davis Vantage Pro2 es un equipo que se compone de un conjunto integrado de sensores para la visualización y registro automático de los datos a través de

una consola y un data logger que puede ser USB o mediante una dirección IP de red, a través de los cuales, usando el software Weatherlink y un PC, puede acceder y/o descargar la información (Davis Instruments, 2017), ver Figura 15.



Figura 15. Estación meteorológica Davids Vantage Pro2. Fuente: (Davis Instruments, 2017).

En el contexto nacional no existe una solución que no esté sobredimensionada o que tenga un balance adecuado entre las especificaciones técnicas y el precio. Es así que los sistemas comerciales de bajo y mediano costo son cerrados ya que trabajan solo con ciertos sensores y los datos son manipulables por software propietario únicamente y los abiertos son de muy alto costo, alta complejidad y en muchos casos sobredimensionados. Bajo este panorama, es pertinente la búsqueda del desarrollo de un modelo de estación meteorológica propio, que permita afianzar las características de productividad y competitividad de la empresa nacional en el mercado de la meteorología e investigación ambiental aplicada, y que sirva para el sector del agro.

Proveedores nacionales como Campbell Scientific, Davis Instruments y Spectrum con su serie Watchdog, tienen una fuerte presencia en el mercado nacional. Otro fabricante fuerte es Vaisala, ya que la empresa distribuidora ha ganado varios contratos oficiales para estaciones e instrumentos meteorológicos. Según la empresa beneficiaria, marcas como Sutron y Pessl también son frecuentes en el mercado local. La mayoría de las soluciones involucran estaciones completas. Las empresas del sector se ubican principalmente en Bogotá y Medellín.

Como ya se mencionó, en Colombia los dispositivos que realizan mediciones son de fabricación extranjera y alto costo; razón por lo

cual, la cantidad de puntos de medición son escasos con respecto a la extensión del país. Veamos algunas estaciones de la marca SUTRON 8310, OTT NetDL 100/500 y Unilog Com en las Figuras 16, 17 y 18.

| Sistema de Adquisición de datos: <b>SUTRON 8310</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fabricante :</b> Sutron                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | <b>País:</b> Estados Unidos                                                        |
| Empresa americana especializada en sistemas Hidrológicos, Meteorológicos y Oceánicos, proporciona los sistemas y productos para la recolección de datos en tiempo real para dicha tecnología, dentro de sus productos se encuentran: Registradores y Controladores, módulos de I/O, Sensores, comunicaciones y telemetría, software de administración de datos.            |                                                                                    |
| <b>Especificaciones:</b><br>- Analog Channels 8<br>- Input Voltage -0.1 to 5V<br>- Digital Inputs 6 (2 Bi-Directional)<br>- Digital Outputs 2 (Bi-Directional)<br>- Communication Ports 4<br>- RS-232, RS-485, USB, 2 SDI-12<br>- LCD Display Type 2x20<br>- Keypad Type 6 buttons<br>- SD Card Download data & read/write<br>- Ethernet Built-in<br>- GPRS Modem Built-in |  |
| Valor: <b>\$11.000.000 COP</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                    |

Fuente: [www.sutron.com](http://www.sutron.com)

Figura 16. Estación meteorológica SUTRON. Fuente: (Seba Hydrometrie, 2019).

| Sistema de Adquisición de datos: <b>OTT NetDL 100 y NetDL 500</b>                                                                                                                                                                                                                                            |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fabricante :</b> OTT                                                                                                                                                                                                                                                                                      | <b>País:</b> Alemania                                                                |
| Empresa alemana con más de 140 años de experiencia formada por tres empresas (OTT, Hydrolab, y Adcon Telemetría) especializada en brindar soluciones con productos para la medición de agua, registro de datos y telemetría, soluciones de software, meteorología y sistemas integrados.                     |                                                                                      |
| <b>Especificaciones:</b><br>Display and Jog shuttle<br>Communication interfaces:<br>- USB Host/Device<br>- 2 x RS-232 (full DB9)<br>- LAN 10Mbit, 10BaseT<br>Interface:<br>- SDI-12<br>- RS-485<br>- 4 x Impulse/Frequency/Status<br>- 2x Switching contact<br>- 4x analogue input<br>- Standard + GSM Modem |  |
| Valor: <b>\$15.000.000 COP</b>                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                      |

Fuente: [www.ott.com](http://www.ott.com)

Figura 17. Estación meteorológica OTT NetDL. Fuente: (Seba Hydrometrie, 2019).

| Sistema de Adquisición de datos: <b>Unilog Com</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |                                                                                    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fabricante :</b> SEBA                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | <b>País:</b> Alemania                                                              |
| Empresa alemana con más de 40 años de experiencia en la fabricación de modernos y avanzados instrumentos de control de medida para hidrología, meteorología y calidad de aguas.                                                                                                                                                                                            |                                                                                    |
| <b>Especificaciones:</b><br>- alimentación 5,5...20V.<br>- memoria serial flash con 4Mbyte<br>- display (3 líneas, 16 cifras)<br>- teclado con 3 botones<br><b>Interfaces:</b><br>- RS232, RS485, USB, LAN<br><b>Entradas:</b><br>- RS 485 (SHWP)<br>- SDI12<br>- arriba/abajo contador de fase, pulsos (lluvia)<br>- 2 entrada de contactos<br>- 8 entradas bi/Unipolares |  |
| Valor: <b>\$14.000.000 COP</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |                                                                                    |

Fuente: [www. www.seba-hydrometrie.com](http://www.seba-hydrometrie.com)

*Figura 18. Estación meteorológica Unilog Com. Fuente: (Seba Hydrometrie, 2019).*

## Capítulo 8

### Convertor de energía mecánica a energía eléctrica

Este capítulo presenta el diseño, simulación y construcción de un mecanismo convertor de energía mecánica a energía eléctrica para suministro de energía de pequeña señal para algunos sensores aprovechando el caudal del agua de los ríos. El diseño metodológico parte de identificar las características de caudal de algunos ríos, haciendo una medición, recopilación y análisis de datos. Con la información recopilada se identifica la ecuación de entrada del diseño, y con las especificaciones del generador la potencia generada esperada (ecuación de salida). Después del dimensionamiento de cada uno de los mecanismos, se simula su funcionamiento en SolidWorks, y se pasa a la implementación de dos prototipos. Los resultados obtenidos han sido generar de alrededor de 12v a 19v para el mecanismo de inducción magnética, y de 15v a 40v para el engranes mecánicos y la potencia entregada por los mecanismos que es de 15W y 12,5W respectivamente.

#### **8.1 Métodos de generación de energías limpias**

Uno de los métodos de generación de energías limpias y renovables es la conversión de energía mecánica a energía eléctrica. Sin embargo, para lograr una conversión apreciable, es fundamental tener en cuenta la fuente y las magnitudes de los parámetros de entrada del sistema mecánico. En este

contexto, es importante el mecanismo de engrane que genera mayor potencia eléctrica a la salida de un sistema, a partir del movimiento de rotación de las aspas de una microturbina hidro cinética.

Algunos de los trabajos de investigación hallados sobre conversión de energía no convencional, se exponen en las siguientes tablas:

*Tabla 4. Generador mediante una rueda magnética.*

| Tipo                                                                                                                               | Descripción                                                                                                                                                                       | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generador de energía eléctrica mediante una rueda magnética para uso en el sistema de transporte colectivo (Carrillo et al, 2019). | Sistema alternativo de generación de corriente eléctrica, mediante la construcción de un prototipo de rueda magnética, en torno a unas bobinas fijas, para producir electricidad. | El prototipo se construyó de madera, y se elaboraron bobinas con cable de cobre, que fueron colocadas en un disco de madera. Fueron ensamblados imanes de neodimio en ruedas de madera, todo esto con el fin de que exista un eje de rotación y pueda ser posible que los imanes tengan movimiento mientras que las bobinas permanecen estáticas. Con esto, fue posible producir una FEM inducida y producir energía eléctrica para ser almacenada y ocupada posteriormente. | Se ha desarrollado la estructura de madera en la cual se montarán las ruedas, la cual simulará al torniquete dónde se introducirá el sistema de imanes y bobinas. De la misma manera se han construido las Tablas con las circunferencias concéntricas donde se montarán las bobinas. Las ruedas de madera tienen ensamblados a los imanes. Se logró medir un voltaje de corriente alterna de 20V. |

*Tabla 5. Generador mediante un sistema de engranes mecánicos.*

| Tipo                                                                                                                            | Descripción                                                                                                                                                                                                    | Metodología                                                                                                                                                                                                                        | Resultados                                                                                                                                                          |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generador de energía eléctrica mediante un sistema de engranes mecánicos para uso en el sistema de transporte masivo en México. | Los ingenieros Márquez Chora y Tlatelpa Barrera del Instituto Politécnico Nacional de México hicieron un estudio de los torniquetes de salida del Sistema de Transporte Colectivo (STC) de la ciudad de México | En esta investigación se implementó un mecanismo mediante engranes para convertir la energía mecánica a eléctrica desde un torniquete. El diseño del mecanismo constó de un alternador, tren de engranes y transmisión por cadena. | Como resultado final se generó 28.4Kw, que para fines prácticos y de consumo, representas un aporte bajo, pero no por ello despreciable (Márquez & Tlatelpa, 2010). |

*Tabla 6. Generador mediante aperturas de puertas para uso doméstico.*

| Tipo                                     | Descripción                                                                                           | Metodología                                                                                  | Resultados                                                                  |
|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------|
| Generador mecánico de energía utilizando | El objetivo de este proyecto fue diseñar y fabricar un generador de energía eléctrica inducida por el | Para lograrlo, el diseño metodológico se dividió en dos fases para su desarrollo, la primera | El generador de energía se probó y fue capaz de generar electricidad con la |

|                                          |                                                                                                                                                                                       |                                                                                                                                                                               |                                                                                                                            |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| aperturas de puertas para uso doméstico. | movimiento de una puerta, que generara la energía necesaria para cargar un Smartphone y que su tamaño fuese ligero para ser instalado en el hogar (Azfanizam, Ikhwan, & Anuar, 2016). | fase es la instalación del circuito de carga en el cuerpo del generador de energía y la segunda fase se llevó a cabo soldadura del cuerpo principal del generador de energía. | tensión de 11.54V más que suficiente para cargar un teléfono. Requiere solamente una entrada mecánica baja para funcionar. |
|------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

*Tabla 7. Generador de imanes permanente de doble rotor con engranaje magnético.*

| Tipo                                                                   | Descripción                                                                                                                   | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Resultados                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generador de imanes permanente de doble rotor con engranaje magnético. | El objetivo fue diseñar e implementar el generador para recolectar la energía eólica directamente sin conversiones mecánicas. | Parte con la introducción del concepto de engranajes magnéticos giratorios para reducir los costes de mantenimiento mecánico, se han propuesto las máquinas de imanes permanentes de rotor externo con engranaje magnético para extraer la energía electromagnética directamente en vez de transportar energía mecánica coaxialmente mediante longitudes axiales relativamente largas. Se realizan evaluaciones detalladas en el diseño y la construcción de una máquina que es capaz de realizar extracciones de energía eólica y mareomotriz. | Se evaluaron sistemáticamente las direcciones y composiciones de magnetización de PM de rotor, las selecciones de devanado de estator y las características de operación del terminal. En base a los resultados evaluados, se propone un prototipo de generador compacto de 2,5kVA que se puede acoplar directamente a la fuente accionada mecánicamente sin engranajes mecánicos adicionales con un diseño completo y referencias operativas (Giménez & Gómez, 2011). |

*Tabla 8. Generador de energía eléctrica rotativa de base piezoeléctrica.*

| Tipo                                                                                                                                                         | Descripción                                                                                                                                                                                                                                                                                           | Metodología                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | Resultados                                                                                                                                                                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Generador de energía eléctrica rotativa de base piezoeléctrica para la recolección de energía a partir de un movimiento rotatorio altamente variable y bajo. | Generador de energía eléctrica basada en piezoeléctrico rotativo, mediante un engrane en forma de polígono y utilizando el par del eje de rotación con múltiples piezoeléctricos voladizos, todo esto con el fin de alimentar el circuito interno de control de una bicicleta estática para gimnasio. | El proceso de fabricación del generador consta de tres fases, donde la primera consiste en implantar un generador rotativo basado en piezoeléctrico, la segunda fase es examinar la relación entre la velocidad de rotación del eje y la energía eléctrica generada por el generador de energía, y, por último, realizar una simulación por elementos finitos. | El generador alcanza una potencia de salida de circuito abierto de 16mW (7,14 mW/mm <sup>3</sup> ) en una entrada de aproximadamente 300 RPM, esta energía generada puede servir como una fuente de CA (Sepúlveda, 2014). |

## **8.2 Principio de conservación de la energía, y transformación de una energía a otra**

En los procesos que intervienen los seres vivos, la cantidad de masa y energía se pueden considerar independientes entre sí; por tanto, se puede afirmar, que ambas se conservan de forma independiente, la energía ni se crea ni se destruye, únicamente se transforma de una forma a otra.

El proceso de la conversión de energía tiene dos métodos: el convencional y no convencional. Los métodos convencionales son todos aquellos que generan energía eléctrica a partir de los recursos naturales; mientras que, los no convencionales generan energía eléctrica a partir de fuentes renovables.

Un ejemplo de conversión de energía mediante el método convencional es el motor de un automóvil; en este se produce un cambio de energía química (contenida en la gasolina y liberada en su combustión) a energía cinética. Otras transformaciones de este tipo de energía son: al prender una lámpara, la energía eléctrica se transforma en energía luminosa; al enchufar una plancha, la energía eléctrica se transforma en energía calórica; al caminar o mover un brazo, la energía química se convierte en energía cinética.

En la conversión de energía mediante el método convencional, es necesario identificar las variables involucradas, esto con el fin de poderlas caracterizar y darles un valor numérico. En la conversión de energía mecánica a eléctrica, se pueden identificar dos tipos de variables que intervienen en el proceso: variables independientes y variables dependientes. Veámoslas aplicadas a una microturbina hidrocinética.

### **8.2.1 Variables Independientes:**

**Torque:** se define como el producto de la fuerza por la perpendicular que va del eje (punto de apoyo) a la fuerza (línea de acción de la fuerza). Variable indispensable para generar en el cuerpo un movimiento de rotación. Dependiendo del valor del torque, que es causado por el paso del caudal del agua a través de la microturbina hidrocinética, se cuenta con uno de los datos

para evaluar la potencia de entrada (fuente). Éste es uno de los insumos más importantes para diseñar el mecanismo para generar energía eléctrica.

**Velocidad de giro:** A partir del dato de la velocidad con la que gira la microturbina hidrocínética, cada vez que se vence su estado de reposo, es posible hallar la potencia inicial. La relación de la potencia de salida con la potencia inicial da el factor de multiplicación requerido en el mecanismo mecánico; de forma que se logre alcanzar las revoluciones por minuto necesarias para el alternador seleccionado.

**Revoluciones por minuto:** se define como la cantidad de vueltas que un cuerpo giratorio completa alrededor de su eje cada sesenta segundos, esta variable se utilizará tanto para la velocidad de giro de la microturbina hidrocínética como para la velocidad de giro del generador seleccionado.

**Fuerza Aplicada:** es la fuerza externa que actúa directamente sobre un cuerpo, es la fuerza del caudal del agua aplicado a las aspas de la microturbina hidrocínética para vencer el estado de reposo.

**Distancia:** es aquella comprendida entre el origen (extremo) del brazo y el punto en el cual el caudal aplica la fuerza mayor para vencer su estado de reposo. La importancia de esta variable radica en la obtención de la velocidad de giro de la microturbina hidrocínética, y por lo tanto en el torque generado, los cuales determinan la potencia generada.

### **8.2.2 Variables Dependientes:**

**Energía mecánica:** es la capacidad de movimiento o de transformación de un objeto, mediante alguna fuerza o proceso. Para el caso de esta investigación, es la energía producida al aplicar la fuerza del caudal sobre la microturbina hidrocínética.

**Energía eléctrica (mediante un generador o alternador):** Un generador es una máquina eléctrica rotativa que transforma energía mecánica en energía eléctrica; lo consigue gracias a la interacción de la parte móvil llamada rotor, y la parte estática denominada estator.

**Potencia de entrada (mecánica):** La potencia mecánica, se evidencia en la puesta en marcha de un mecanismo o el ejercicio de la fuerza física; depende de la fuerza del caudal, la velocidad de giro y el torque generado por la microturbina hidro cinética.

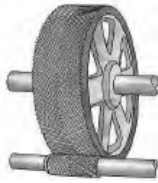
**Potencia de salida (eléctrica):** es aquella que se transfiere a un circuito eléctrico, después de su transformación.

### 8.3 Conversión mecánica a eléctrica mediante engranes mecánicos

Un engrane o engranaje es un mecanismo utilizado para transmitir potencia mecánica de un elemento a otro mediante movimientos giratorios o alternativos. Los engranes son ruedas dentadas de distintos tamaños que encajan entre sí, y a través de este complemento mecánico ocurre la trasmisión de movimiento hacia el resto de la maquinaria. Los engranes son empleados con frecuencia para transmitir movimiento desde el eje principal de un mecanismo, hasta las piezas complementarias situadas a cierta distancia de dicho eje. Este tipo de aplicaciones se puede observar en los motores. El engranaje principal o engranaje motor, es el encargado de transmitir el movimiento al resto de la estructura, a través del engranaje conducido. En la literatura se encuentran diversos tipos de engranes, veamos su clasificación en la Tabla 9:

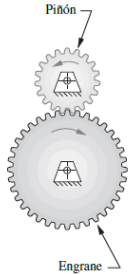
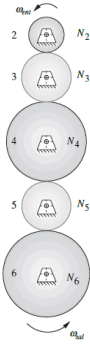
*Tabla 9. Tipos de engranes.*

| Tipo y características                                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Representación gráfica                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Engranes rectos:</b> son aquellos en los cuales los dientes son paralelos al eje de simetría del engrane. Se consideran los más simples y de menor costo de fabricación. Solo pueden conectarse si sus ejes de rotación son paralelos (Norton, el all, 2013).                                                               |  Una ilustración técnica de dos engranes rectos. Los engranes están montados en ejes paralelos. Los dientes de ambos engranes son rectos y paralelos a los ejes de rotación. Se muestran flechas de rotación opuestas.    |
| <b>Engranes helicoidales:</b> en este tipo de engranes sus dientes están a un ángulo $\phi$ con respecto al eje del engrane. En la figura se muestra un par de engranes helicoidales engranados con ejes paralelos y orientación opuesta; de igual manera se evidencia engranes helicoidales cruzados de la misma orientación. |  Una ilustración técnica de dos engranes helicoidales. Los engranes están montados en ejes paralelos. Los dientes están inclinados formando un ángulo con los ejes de rotación. Se muestran flechas de rotación opuestas. |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |                                                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Engranés cónicos:</b> Los dientes se encuentran ubicados sobre una superficie cónica; como se muestra en la figura la transmisión del movimiento se hace entre ejes no paralelos, aunque también se puede hacer entre ejes con ángulos mayores o menores de 90°.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                      |  |
| <p><b>Engranés espinales:</b> Se constituyen al unir cara a cara o adosar dos engranes helicoidales de idéntico paso y diámetro. La figura muestra las orientaciones opuestas y montadas sobre el mismo eje. Los dos conjuntos de dientes suelen formarse en la misma pieza base del engrane. La ventaja de este engrane con respecto a los helicoidales simples es la cancelación interna del empuje axial, pues en cada “mitad” helicoidal del engrane espinal se presenta una carga axial opuesta a la de la otra (Norton et al., 2013).</p> |  |

También existen trenes de engranes, algunos de ellos los encontramos en la Tabla 10.

Tabla 10. Tipos de trenes de engranes.

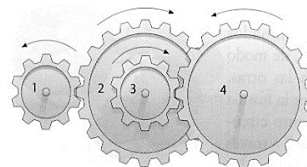
| Tipo y características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Representación gráfica                                                              |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| <p><b>Tren simple:</b> Es aquel en el que cada eje tiene sólo un engrane, es considerado el más básico. La figura muestra un tren simple de dos engranes. La relación de velocidad (algunas veces llamada relación de tren de engranes) del engranaje se encuentra desarrollando la ecuación 1.</p> $m_v = \left(-\frac{N_2}{N_3}\right)\left(-\frac{N_3}{N_4}\right)\left(-\frac{N_4}{N_5}\right)\left(-\frac{N_5}{N_6}\right) = +\frac{N_2}{N_6} \quad (1)$ |  |
| <p><b>Tren de engranes simple de cinco elementos en serie:</b> La expresión de la relación de velocidad para este tren simple está dada por la ecuación 2:</p> $m_v = \pm \frac{N_{entrada}}{N_{salida}} \quad (2)$                                                                                                                                                                                                                                           |  |
| <p><b>Tren compuesto:</b> Es aquel en el que, al menos, un eje tiene más de un engrane. Este tipo de tren de engranes se puede disponer en paralelo o en serie-paralelo, en vez de las conexiones en serie pura (tren de engranes simple). En</p>                                                                                                                                                                                                             |                                                                                     |

la figura se muestra un tren de tipo compuesto con cuatro engranes, dos de los cuales (3 y 4), están fijos sobre el mismo eje, por consiguiente, tienen la misma velocidad angular. La relación de velocidades del tren de engranes compuesto se expresa por la ecuación 3:

$$m_v = \left(-\frac{N_2}{N_3}\right)\left(-\frac{N_4}{N_5}\right) \quad (3)$$

La ecuación 3 puede generalizarse en la ecuación 4 para cualquier número de engranes en un tren compuesto.

$$m_v = \pm \frac{\text{producto del número de dientes en engranes impulsores}}{\text{producto del número de dientes de engranes impulsados}} \quad (4)$$



A continuación, se presenta la caracterización de engranes rectos en la Tabla 11.

Tabla 11. Caracterización de la nomenclatura de diente de engranes rectos.

| Características                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   | Representación gráfica |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <p>En la figura se muestran dos dientes de un engrane estándar. El círculo de paso y el círculo base se definen previamente. La altura total de un diente se establece como el adendo (que se suma) y el dedendo (que se resta), referidos al círculo de paso nominal. El dedendo es ligeramente mayor que el adendo y ello proporciona la holgura, que se mide entre el tope de un diente (círculo de adendo) y el fondo del espacio entre dientes del engrane conectado (círculo del dedendo). El espesor de diente es distancia medida sobre el círculo de paso, y el ancho del espacio es ligeramente mayor que el espesor del diente. La diferencia entre ambas dimensiones es el juego.</p> |                        |

## 8.4 Conversión mecánica a eléctrica mediante inducción magnética

A principios del siglo XIX, Oersted descubrió que la corriente eléctrica podía producir fenómenos magnéticos; también, Faraday y Henry

descubrieron que los fenómenos magnéticos podían producir corrientes eléctricas (al acercar un imán a un circuito se producía una corriente). Al interpretar estas observaciones Maxwell desarrolló la teoría del electromagnetismo que unifica ambos fenómenos (López & Losada, 1998).

Un imán, natural o no, es un cuerpo que atrae el hierro y otros materiales llamados ferromagnéticos; sin embargo, esta propiedad o fuerza atractiva no se representa por igual en todo el cuerpo, sino que se pone de manifiesto en sus extremos, a los cuales se les denominan “polos”. Todo imán presenta dos “polos” opuestos, por convenio se les llama “norte” y “sur”, y sucede que, al acercar dos imanes, las fuerzas que actúan son de tal naturaleza que los polos del mismo signo, Norte o Sur se repelen y los de signo contrario se atraen.

Otra característica de los imanes es que los polos no se pueden aislar, pues, al partir un imán, las dos partes resultantes son a su vez otro imán con sus respectivos polos, y esto se repite por más divisiones que se practiquen. Por esta razón el magnetismo es un fenómeno intrínsecamente dipolar (López & Losada, 1998). Los imanes se clasifican bajo distintos parámetros en los cuales se enfatizan su origen y capacidades magnéticas, como se muestra en la Figura 19.

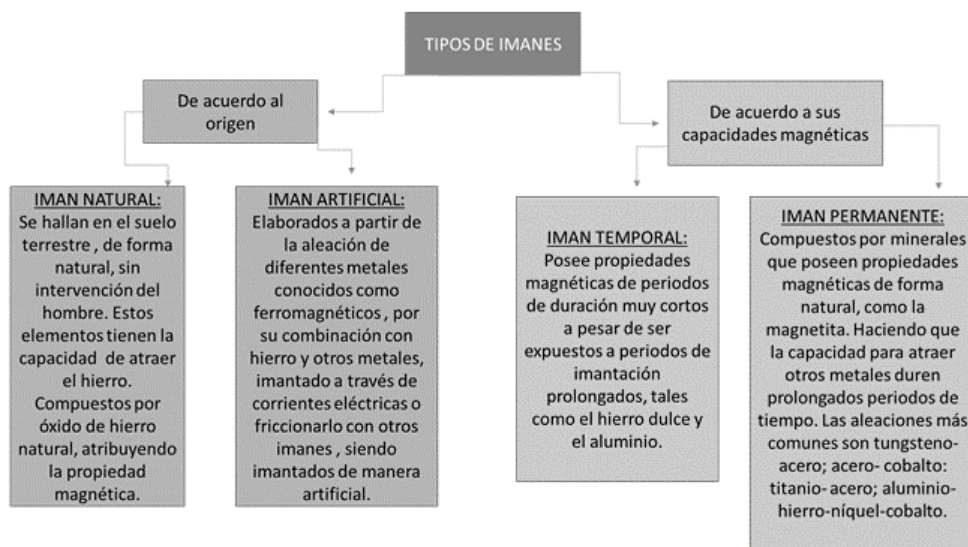


Figura 19. Tipos de imanes. Fuente autores.

**Imanes permanentes:** se definen como un material que puede ser imantado, y que es capaz de generar un campo magnético persistente. A diferencia de los imanes temporales, que generan un campo magnético sólo mientras está activa la fuerza o energía externa que lo genera (Rodríguez & León, 2016) . Los imanes permanentes pueden clasificarse en dos tipos: los naturales, como la magnetita, y los imanes artificiales.

Existen varios tipos de materiales de imanes permanentes como la ferrita, de bajo precio y baja energía, o los imanes de las tierras raras, de alto costo y alta energía que cuentan con una potencia que puede llegar a ser varias veces superior a la de otros imanes. Las tierras raras son unos elementos pertenecientes a la Tabla periódica. Aleaciones de estos elementos son las encargadas de producir los imanes permanentes de las tierras raras. Según el material químico que los componga, estos imanes se suelen dividir en:

**Imanes de neodimio (Nd-Fe-B):** Estos están compuestos por boro, hierro y neodimio, de allí sus rasgos metálicos. Se caracterizan por oxidarse con extrema facilidad por lo que son recubiertos con una capa de barniz, zinc o níquel.

**Imanes de samario cobalto (Sm-Co):** a diferencia de los anteriores, estos no se oxidan con tanta facilidad. Utilizados para aplicaciones que requieren un elevado rendimiento en ambientes de trabajo con altas temperaturas y tiene excelentes características térmicas (Rodríguez & León, 2016).

Hasta no hace mucho tiempo, el uso de los imanes permanentes en el campo de las máquinas eléctricas se reducía a la construcción de motores de baja potencia. Sin embargo, con la introducción de elementos magnéticos como el neodimio, hacia finales del siglo pasado, se diversificó la aplicación en una amplia gama de máquinas de aplicación industrial (Martín, 2012).

#### **8.4.1 Funcionamiento de imanes permanentes (Ley de Lorentz)**

La fuerza electromotriz (FEM) es aquella energía capaz de producir y mantener una diferencia de potencial, entre los terminales de un circuito abierto, o en su caso genera un flujo de corriente en un circuito cerrado. La

FEM o diferencia de potencial en dos extremos del conductor se rige bajo la relación matemática de la ecuación 5 (Mondragón et al., 2015).

$$FEM = (\vec{v} \times \vec{B}) * \vec{l} \quad (5)$$

En la Figura 20 se puede apreciar la dirección de los vectores, velocidad y campo magnético.

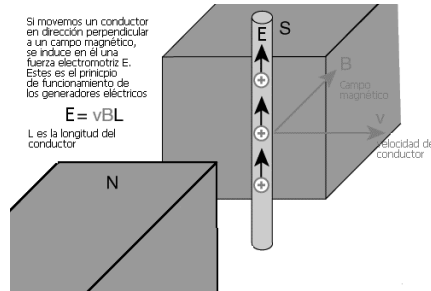


Figura 20. Imagen ilustrativa de la Ley de Lorentz.

En la Figura 21 se muestra las líneas convencionales de campo magnético de un imán, que salen del polo norte al polo Sur.

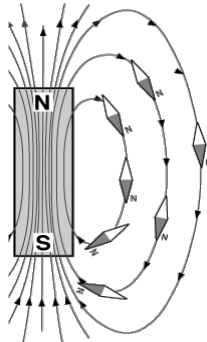


Figura 21. Líneas de campo de un imán.

### 8.4.2 Equivalencias

Como se muestra en la Figura 22 sí el segmento AB se mueve hacia la derecha. Por encima de un imán cuyo polo norte es la cara posterior de la hoja, y el polo sur está en la propia hoja. El campo magnético es perpendicular a la hoja de papel, y está dirigido hacia dentro; dónde, L es la longitud del segmento AB. El polo positivo de la  $\mathcal{E}$  es el extremo A del segmento y el polo negativo es

el extremo B. En un generador de imanes permanentes, no es el conductor el que se mueve en el campo magnético sino al contrario, los conductores que forman las espiras permanecen quietos y son los imanes los que se mueven (Funcionamiento de una generadora de imanes permanentes aplicando la expresión de Lorentz).

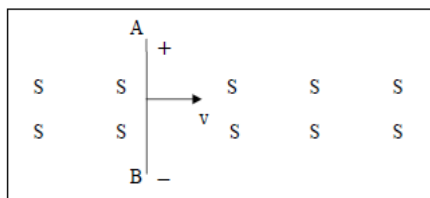


Figura 22. Desplazamiento del imán cuando segmento de conductor AB está en reposo, donde el polo sur sale del papel.

En las Figuras 23 y 24 se muestra el desplazamiento del imán, dependiendo de la posición del segmento conductor. El imán se mueve hacia la derecha, y el segmento está en reposo. Esta situación es equivalente, por movimiento relativo, a que el imán se encuentre en reposo y el conductor se mueva hacia la izquierda. Es por ello que, para mantener la polaridad de la FEM inducida en el segmento conductor, el polo Norte del imán está en la cara superior de la hoja de papel y el campo magnético sale del papel.

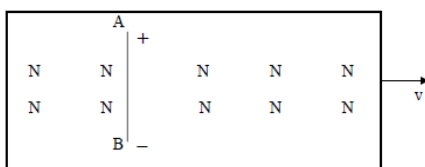


Figura 23. Desplazamiento del segmento de conductor AB con el imán estático, donde el polo norte sale del papel.

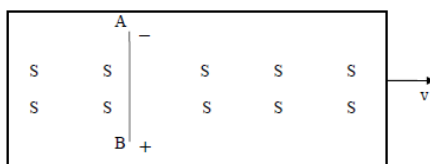
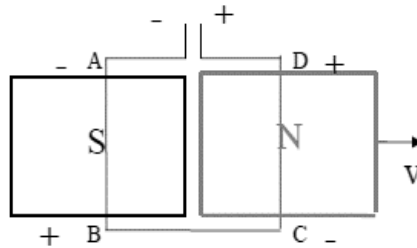


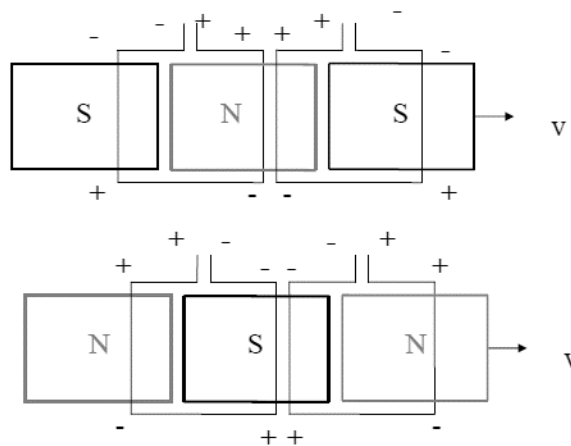
Figura 24. Desplazamiento del segmento de conductor AB con el imán estático, donde el polo sur sale del papel.

El efecto resultante es una espira con una tensión doble, debida a la suma de las tensiones de los dos segmentos. Cuando el primer imán haya pasado de largo, y el segundo imán este enfrentado al segmento DC, la polaridad de la espira será la contraria a la mostrada en la Figura 25.



*Figura 25. Polaridad de una espira cuando dos imanes de polos opuestos pasan enfrente.*

La separación entre las espiras es la misma que la separación entre los imanes. Las espiras contiguas tienen polaridades contrarias, como se muestra en la Figura 26.



*Figura 26. Polaridad de espiras cuando una hilera de polos magnéticos pasa al frente.*



# Capítulo 9

## Alternadores, generadores y motores AC-DC

Las máquinas de Corriente Directa (CD) se agrupan en generadores y motores: los generadores convierten la energía mecánica en energía eléctrica de CD; y los motores, convierten la energía eléctrica de CD en energía mecánica (Chapman, 2012). La mayoría de las máquinas de CD son semejantes a las máquinas de AC, en el sentido de que tienen voltajes y corrientes de AC dentro de ellas. Las máquinas de CD cuentan con una salida de CD simplemente porque hay un mecanismo que convierte los voltajes internos de AC en voltajes de CD en sus terminales. Debido a que a este mecanismo se le llama conmutador, a la maquinaria de CD también se le conoce como maquinaria de colector o de conmutación.

### **9.1 Alternador de corriente continua**

El funcionamiento de la máquina de CD se consigue a partir de la interacción de la parte estática o inmóvil llamado estator, y de la parte móvil denominada rotor. Cuando el generador está en funcionamiento, uno de los dos componentes genera un flujo magnético que actúa como inductor para que la otra parte transforme ese flujo magnético en electricidad actuando como inducido.

Las partes básicas de un alternador son: el estator, que alberga los conductores de la armadura; y un rotor, que provee el campo magnético necesario. El rotor o inductor de un alternador consta de una bobina de alambre enrollado en un carrete de hierro entre dos segmentos de hierro pesado que dispone de dedos entrelazados alrededor de su periferia. Algunos rotores tienen cuatro dedos y otras tienen hasta siete. Cada dedo forma un polo del campo magnético giratorio, ver Figura 27.



*Figura 27. Estator y rotor de un alternador de corriente continua.*

El rectificador de onda completa se compone de seis diodos de silicio de alta resistencia, tres de ellos se encuentran presionados en el extremo de la carcasa de anillos deslizantes, y los otros tres se ubican en un disipador de calor que está aislado eléctricamente de la carcasa.

## **9.2 Generadores de corriente continua y alterna**

Los generadores son máquinas que convierten la energía mecánica en eléctrica se le denomina también alternador o dínamo en función del tipo de corriente que produzcan. Funcionan de manera similar a los motores de corriente continua.

El funcionamiento de un generador se basa en la aplicación directa de la ley de inducción de Faraday. El generador está construido a partir de una bobina que gira en el campo magnético; de esta manera, una fuerza

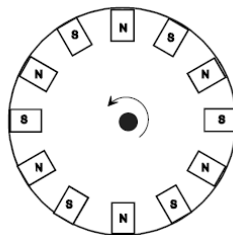
electromotriz se establece sobre la bobina como consecuencia de las variaciones del flujo mientras esta gira. Comúnmente los generadores de corriente continua reciben el nombre de dinamos.

El generador de corriente alterna es una máquina que consta de una espira rectangular que gira en un campo magnético uniforme; cuando la espira gira, el flujo del campo magnético a través de la espira cambia con el tiempo, y se produce una FEM. Las conexiones al circuito externo se hacen mediante escobillas estacionarias en contacto con los anillos.

### **9.3 Generadores de imanes permanentes**

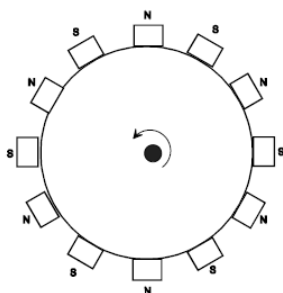
Un generador de imanes permanentes es una máquina síncrona en la que se sustituye el bobinado de excitación, normalmente en el rotor, por un sistema formado por imanes permanentes que suministran un campo de excitación constante. Existen diversos tipos de generadores de imanes permanentes: generadores de flujo axial: el eje de giro es paralelo al campo magnético de los imanes; generadores de flujo radial: el eje de giro es perpendicular al campo magnético de los imanes.

En los generadores de flujo axial como se muestra en la Figura 28, los imanes se disponen sobre un disco de hierro que gira alrededor de un eje perpendicular que pasa por su centro. Así pues, el campo magnético de los imanes es paralelo al eje de giro, y de ahí la frase “flujo axial” que realmente significa campo magnético paralelo al eje de giro.



*Figura 28. Flujo axial. Funcionamiento de un generador de imanes permanentes.*

En los generadores de flujo radial, Figura 29, los imanes se colocan sobre la superficie lateral de un cilindro que gira alrededor de su propio eje. En este caso el campo magnético de los imanes es perpendicular al eje de giro, y por tanto va en dirección radial, y de ahí la frase “flujo radial” que realmente significa campo magnético en dirección radial o perpendicular al eje de giro. (*Funcionamiento de una generadora de imanes permanentes aplicando la expresión de Lorentz*).



*Figura 29. Flujo radial. Funcionamiento de un generador de imanes permanentes.*

#### **9.4 FEM inducida en una espira de un generador de imanes permanentes**

El movimiento circular es uniforme, y el número de imanes es siempre par, con los polos magnéticos alternados. En este caso, y como se ha visto, la FEM inducida en una espira será justo el doble de la que induciría un solo imán, puesto que cada lado de la espira está siendo atacado por dos imanes de polos opuestos. De la ecuación 5 se obtiene la ecuación 6 que es la fuerza electromotriz inducida en una espira; en la ecuación 7 se define la velocidad lineal, y la ecuación 8 es la resultante de reemplazar la ecuación 7 en la ecuación 6, que a su vez se multiplica por un factor de  $\frac{1}{\sqrt{2}}$ , por representar un valor RMS. Finalmente, la ecuación 9 es la equivalencia de la velocidad angular en RPM; esta ecuación se reemplaza en la ecuación 8, para obtener la ecuación 10 (*Definición de fuerza electromotriz efectiva inducida en una espira, Funcionamiento de una generadora de imanes permanentes aplicando la expresión de Lorentz*).

$$fem = 2vBL \quad (6)$$

$$v = \omega * r \quad (7)$$

Por lo tanto:

$$fem = 2\omega rBL$$

$$fem = \frac{1}{\sqrt{2}} 2\omega rBL \quad (8)$$

Donde:

$$\omega = \frac{2\pi}{60} (\text{rpm}) \quad (9)$$

Por lo tanto:

$$fem_{ef} = 0.148(\text{rpms})rBL \quad (10)$$

## 9.5 FEM inducida en una serie de conductores paralelos debida a imanes móviles

Suponiendo que un conjunto de imanes de igual tamaño y equidistantes entre sí, con los polos alternados, se mueven con velocidad  $v$ , por delante de un conjunto de segmentos conductores paralelos y equiespaciados, como se muestra en la Figura 30.

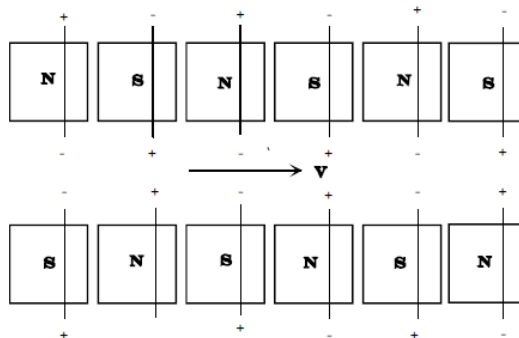


Figura 30. Polaridad de la FEM inducida a una serie de conductores, cuando existen imanes móviles.

La fuerza electromotriz inducida entre los extremos de todos los segmentos será la superposición de todos ellos; y como es la misma en cada

uno de los segmentos, la FEM total será la inducida en uno de ellos, por el número de segmentos, como se especifica en la ecuación número 11. Esta ecuación representa la fuerza electromotriz entre los extremos de los segmentos (Funcionamiento de una generadora de imanes permanentes aplicando la expresión de Lorentz).

$$fem = nvBl \quad (11)$$

Donde:

n: Número de segmentos.

l: Longitud de uno de ellos.

Si los imanes se mueven con un movimiento circular frente a los segmentos, la FEM inducida será la ecuación 12. La ecuación 13 es el valor eficaz de la FEM, en la cual la velocidad esta expresada en RPM. La ecuación 14 representa la fuerza electromotriz inducida entre los extremos de los segmentos con movimiento circular.

$$fem = \omega r B n l \quad (12)$$

$$fem = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{2}{60} (Rpm) r B n l \quad (13)$$

$$fem = 0.074 (Rpm) r B L \quad (14)$$

Donde:

r: Radio de giro de los imanes.

B: Campo magnético.

L: Longitud total de los n segmentos, esto es  $nl = L$ .

El efecto final se puede evidenciar en la Figura 31.

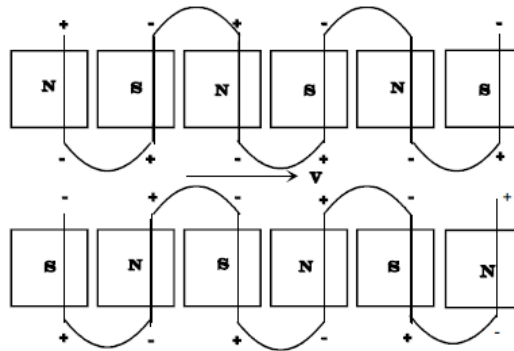


Figura 31. Polaridad de la FEM inducida a una serie de conductores, cuando existen imanes móviles.

## 9.6 Generador Síncrono de Imanes Permanentes

Este tipo de generador produce la inducción del estator mediante imanes que producen el campo magnético. El uso de este tipo de generador síncrono tiene como ventaja la eliminación de los anillos rozantes; además, que elimina las pérdidas en el devanado del rotor. Según la disposición de los imanes y la dirección del campo magnético generado, se distinguen entre varios tipos de generadores de imanes permanentes (Rodríguez & León, 2016).

## 9.7 Motor-generator magnético

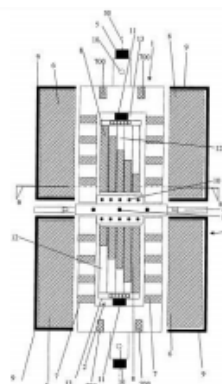
A pesar de que el desarrollo de este tipo de motores magnéticos aún no ha sido empleado en la industria, existen prototipos patentados como se pueden observar en la Tabla 12.

Tabla 12. Tipos de motor-generator magnético.

| Tipo y características                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | Representación gráfica |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|
| <b>Motor Panderev</b><br>Patentado en el año 2006, y que es uno de los motores magnéticos que provee energía magnética a partir de la fuerza de repulsión. Este motor puede ser implementado para generar energía eléctrica e inclusive, puede ser utilizado en vehículos, aeronaves o transporte marítimo (Vázquez, 2016). |                        |

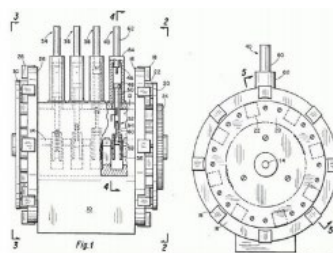
### **Motor Yildiz**

Inventado por Muammer Yildiz, de nacionalidad turca, quien realizó una demostración de un motor en el 2010 en la Universidad de Tecnología de Delft en los Países Bajos. Su motor magnético utiliza un mecanismo que proporciona un movimiento mecánico con base en la interacción entre dos campos magnéticos, uno fijo y otro móvil: estator y rotor (Vázquez, 2016).



### **Mach II**

Inventado por Troy G. Reed, quien en 1994 presentó un motor magnético en funcionamiento implementado en un vehículo, su funcionamiento es semejante a los anteriores, con base en imanes permanentes donde uno de ellos se encuentra fijo, y los otros giratorios; solo que, en su caso, el motor tiene un sistema similar a un motor estándar de combustión interna con un cigüeñal e inclusive tiene un volante de inercia. Es importante destacar que, según el artículo/patente de este motor todo el mecanismo es impulsado por la fuerza de repulsión de los imanes, sin utilizar batería o algún otro medio de propulsión (Vázquez, 2016).



# Capítulo 10

## Resultados

De acuerdo con lo planteado en los capítulos anteriores, se presentan los resultados del proyecto de investigación desarrollada en el Bosque de Paz ubicado en el corregimiento de Aquitania, municipio de San Francisco, Antioquia por el grupo LIDER de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas y el grupo ECITRÓNICA de la Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito; los aspectos abordados fueron: Diseño de una red de sensores IoT y el diseño e implementación de dos mecanismos de conversión de energía para suministro de energía.

El diseño metodológico consistió en la caracterización de la Región Andina, sus ríos y quebradas que pueden ser aprovechados en Granjas alejadas de la red eléctrica nacional, la identificación de cultivos, y la instalación de una central meteorológica marca Davis Pro 2 que genera la medición de las variables atmosféricas, las cuales son enviadas por Datos desde una Simcard Celular para ser procesadas en un servidor Web y presentadas al público que está interesado en conocer este tipo de mediciones.

### 10.1 Caracterización de las granjas

Se realizó la caracterización de la población en aspectos socio económicos con un equipo de profesionales de ciencias humanas quienes convivieron con la población desde el inicio del proyecto.

Se caracterizaron 13 agro parcelas de la zona mediante entrevistas a los campesinos para conocer su grado de escolaridad, manejo de teléfonos celulares y tecnología. En general, estas personas dominan funciones básicas de los Smartphone por lo que fue necesario realizar capacitaciones y se les doto de teléfonos a la comunidad.

Se hizo el levamiento de información de proyectos productivos mediante un trabajo conjunto con la población, para obtener información de sus proyectos productivos (Ver Figura 32) con el fin de integrarlos a la plataforma tipo Crowdfunding que permitirá divulgar los productos que se producen en la zona y acercar a los pequeños productores con inversionistas.

Se hizo un levantamiento de las condiciones fitosanitarias que se deben integrar al monitoreo manual, los procesos de siembra, abono, cuidado y monitoreo empírico del campesinado hacia los cultivos.

Se diseño una etiqueta NFC para marcación de cultivos y la instalación de tags NFC y códigos QR en cultivos de café, cacao y sachá inchi, que cumplieran con condiciones mínimas de cultivo como: buena distribución, iluminación, podas periódicas, abono, sistema de drenaje, cantidad de plantas y la posibilidad de encadenar el producto con proceso de emprendimiento. (Ver Figura 32).



*Figura 32. Etiqueta NFC para marcación de cultivos, caracterización de la comunidad, productos propios comercializables por la comunidad y muestra de un producto, cacao.*

## 10.2 Aspectos tecnológicos de aplicación de IoT

La instalación de la central meteorológica Davis Pro 2 y algunos sensores distribuidos en 5 cultivos del Bosque de Paz hace posible visualizar, a través de la plataforma web, gráficos que muestran el comportamiento de las variables ambientales que alteran el crecimiento de los cultivos. Las variables que se monitorean son: temperatura, humedad, presión, velocidad del viento, dirección del viento, precipitación, radiación solar, índice ultravioleta y punto de rocío, (ver Figura 33).

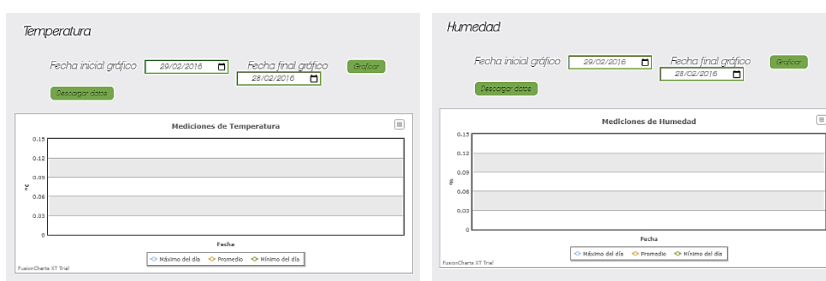


Figura 33. Gráficas de medición de las condiciones climáticas Temperatura y Humedad.

La plataforma web permite realizar el seguimiento y monitoreo, consolidar informes y reportar actividades inusuales automáticamente por medio de una interfaz de administración amigable con el usuario que le permita crear contenido interactivo con los visitantes del sitio web, ver Figuras 34, 35 y 36.

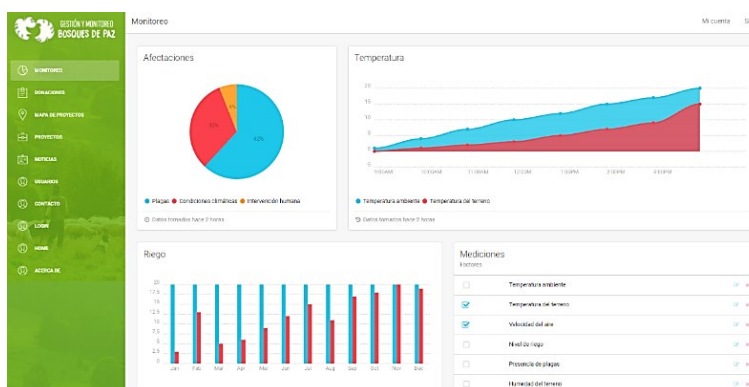


Figura 34. Gráficas de consolidación de mediciones.

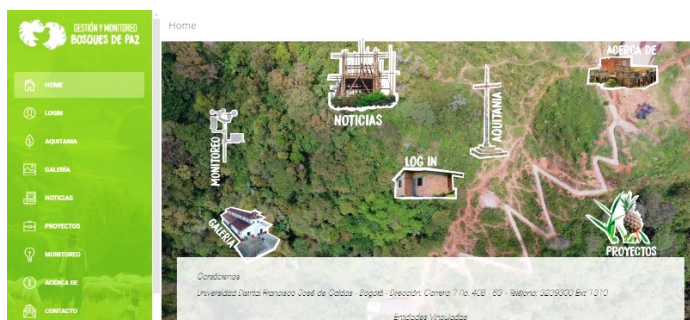


Figura 35. Vista de la Web desarrollada.



Figura 36. Vista del monitoreo en tiempo real de las condiciones climáticas.

Adicionalmente, la plataforma permite la creación de proyectos productivos de los habitantes de la zona con el fin de recaudar fondos bajo el modelo crowdfunding. El dinero se destina para incentivar el crecimiento de los proyectos de la zona, ver Figura 37.

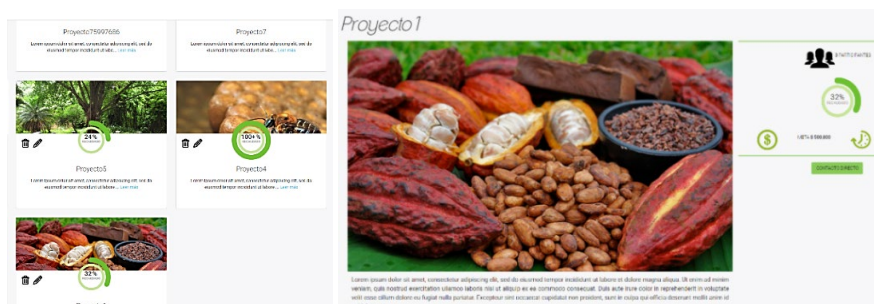


Figura 37. Vista de la Web donde se presentan los proyectos productivos.

El proyecto desarrolló una aplicación móvil para la gestión interna y externa de datos provenientes de la central meteorológica y sus sensores: esta

aplicación contiene secciones asociadas a la divulgación de noticias, proyectos y aspectos generales de Aquitania. Adicionalmente, los dueños de los cultivos pueden realizar un monitoreo manual de su cultivo acercando el celular a las etiquetas NFC distribuidas a lo largo del terreno. Al momento de realizar la lectura se despliega un formulario personalizado para el tipo de cultivo. Esta personalización consiste en mostrar opciones para los tipos de cultivo: café, sachá inchi y cacao, con el fin de que la experiencia del usuario sea amable y agradable, ver Figura 38.

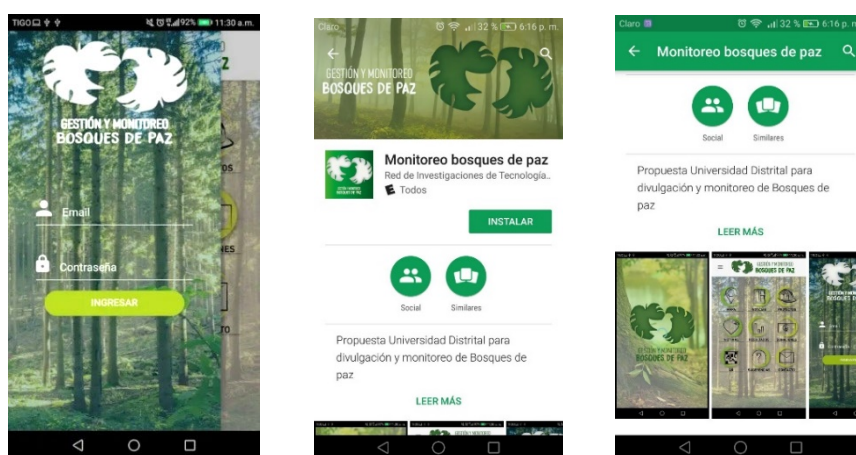


Figura 38. Vista del desarrollo de la aplicación para Smartphone.

### 10.3 Resultados de la generación hidroeléctrica limpia

El segundo grupo de actividades del proyecto se centró en el dimensionamiento, diseño, simulación, construcción, pruebas y ajustes de los mecanismos para conversión de energía mecánica a energía eléctrica, mediante engranes mecánicos a través de inducción magnética. En relación con la generación hidroeléctrica, se promedió el valor del torque generado por el flujo del caudal por las microturbinas cinéticas, y la velocidad de giro de éstas. Con estos datos se obtuvo la potencia, que se convirtió en el insumo fundamental para el diseño de los dos mecanismos de conversión de energía.

#### 10.3.1 Mediciones de tiempo y fuerza ejercida

Para las mediciones de tiempo y fuerza ejercida en las microturbinas cinéticas, se tuvo en cuenta los siguientes parámetros:

$t_{ijk}$ : Tiempo empleado de giro para una aspa de la microturbina cinética

$f_{ijk}$ : Fuerza del caudal requerido para vencer el estado de reposo de la microturbina cinética

Donde i es la distancia con la cual se tomó la medición, j es el tipo de movimiento del aspa de la microturbina cinética (e: entrada, s: salida) y k es el número de la medición como se observa en la Tabla 13.

Tabla 13. Mediciones realizadas en la microturbina cinética

| DISTANCIA D2 |                   |                   |                   |                    |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|--------------------|
| ENTRADA      |                   |                   | SALIDA            |                    |
| #            | TIEMPO            | FUERZA            | TIEMPO            | FUERZA             |
| 1            | $t_{2e1} = 1,25s$ | $f_{2e1} = 950gr$ | $t_{2s1} = 1,19s$ | $f_{2s1} = 1000gr$ |
| 2            | $t_{2e2} = 1,23s$ | $f_{2e2} = 880gr$ | $t_{2s2} = 1,43s$ | $f_{2s2} = 1000gr$ |
| 3            | $t_{2e3} = 1,18s$ | $f_{2s3} = 800gr$ | $t_{2s3} = 1,58s$ | $f_{2s3} = 850gr$  |

| DISTANCIA D3 |                   |                   |                   |                   |
|--------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|
| ENTRADA      |                   |                   | SALIDA            |                   |
| #            | TIEMPO            | FUERZA            | TIEMPO            | FUERZA            |
| 1            | $t_{3e1} = 1,13s$ | $f_{3e1} = 600gr$ | $t_{3s1} = 1,23s$ | $f_{3s1} = 600gr$ |
| 2            | $t_{3e2} = 1,16s$ | $f_{3e2} = 540gr$ | $t_{3s2} = 1,52s$ | $f_{3s2} = 650gr$ |
| 3            | $t_{3e3} = 1,24s$ | $f_{3s3} = 700gr$ | $t_{3s3} = 1,46s$ | $f_{3s3} = 550gr$ |

Con los datos de la Tabla 13 y la ecuación 15, se procedió a hallar el tiempo promedio de giro parcial del aspa, y con la ecuación 20 se obtuvo el tiempo total de giro.

$$t_{prom(1/3giro)} = \frac{t_{2e1} + t_{2e2} + t_{2e3} + t_{2s1} + t_{2s2} + t_{2s3} + t_{2s1} + t_{2e2} + t_{2e2} + t_{3s1} + t_{3s2} + t_{3s3}}{12} \quad (15)$$

$$t_{prom(1/3giro)} = \frac{1,25s + 1,23s + 1,18s + 1,19s + 1,43s + 1,58s + 1,13s + 1,16s + 1,24s + 1,23s + 1,52s + 1,46s}{12}$$

$$t_{prom(1/3giro)}: 1,3 s$$

$$t_{prom(1giro)} = t_{prom(1/3giro)} * 3 \quad (16)$$

$$t_{prom(1giro)} = 1,3s * 3$$

$$t_{prom(1giro)} = 3,9 s$$

Con la ecuación 17 se hizo la conversión de unidades, pasando de revoluciones por segundos a revoluciones por minuto.

$$v_{prom(1giro)} = \frac{1 \text{ revolución}}{3,9s} * \frac{60s}{1 \text{ minuto}} \quad (17)$$

$$v_{\text{prom(1giro)}} = 15,3846 \text{ rpm}$$

Posteriormente, se halló la fuerza ejercida en la microturbina cinética, mediante la ecuación 18.

$$\begin{aligned}
 f_{\text{prom}} &= 0.9 \left( \frac{f_{2e1} + f_{2e2} + f_{2e3} + f_{2s1} + f_{2s2} + f_{2s3}}{6} \right) \\
 &\quad + 0.1 \left( \frac{f_{3e1} + f_{3e2} + f_{3e3} + f_{3s1} + f_{3s2} + f_{3s3}}{6} \right) \quad (18) \\
 f_{\text{prom}} &= 0.9 \left( \frac{950\text{g} + 880\text{g} + 800\text{g} + 1000\text{g} + 1000\text{g} + 850\text{g}}{6} \right) \\
 &\quad + 0.1 \left( \frac{600\text{g} + 540\text{g} + 700\text{g} + 600\text{g} + 650\text{g} + 550\text{g}}{6} \right) \\
 f_{\text{prom}} &= 0,9(913,33\text{g}) + 0,1(606,67\text{g}) \\
 f_{\text{prom}} &= 882,67 \text{ g} \\
 f_{\text{prom}} &= 0,88267 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

También se requirió hacer conversión de unidades para la variable fuerza; pasando de kilogramos fuerza a Newton. Se aplicó la segunda ley de Newton, y se utilizó la ecuación 19.

$$\begin{aligned}
 F_{\text{Newton}} &= F_{\text{kgf}} * g \\
 F_{\text{Newton}} &= 0,88267 \text{ kg} * (9.80665 \text{ m/s}^2) \quad (19) \\
 F_{\text{Newton}} &= 8,65604 \text{ N}
 \end{aligned}$$

Se halló la velocidad calculada anteriormente en rad/s, como se muestra en la ecuación 20, y se obtuvo el radio de giro promedio del aspa de la microturbina cinética, con las ecuaciones 21 y 22, en rad/seg y m/seg respectivamente.

$$r_{\text{prom}} = 0,9(D2) + 0,1(D3) \quad (20)$$

$$r_{\text{prom}} = 0,9(0,37 \text{ m}) + 0,1(0,45 \text{ m})$$

$$r_{\text{prom}} = 0,333 \text{ m} + 0,045 \text{ m}$$

$$r_{\text{prom}} = 0,378 \text{ m}$$

$$w_1 = v_{\text{prom}} * \frac{2\pi}{60\text{s}} \quad (21)$$

$$w_1 = 15,3846 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60\text{s}}$$

$$w_1 = 1,6111 \text{ rad/s}$$

$$v_1 = w_1 * r_{\text{prom}} \quad (22)$$

$$v_1 = 1,6111 \text{ rad/s} * 0,378 \text{ m}$$

$$v_1 = 0,609 \text{ m/s}$$

Posteriormente se obtuvo el valor esperado de potencia con la ecuación 23. Esta potencia se expresó en watts.

$$P_1 = P_2 = F_{\text{Newton}} * v_1 \quad (23)$$

$$P_1 = P_2 = 8,65604 \text{ N} * 0,609 \text{ m/s}$$

$$P_1 = P_2 = 5,2715 \text{ W}$$

Por último, se determinó la velocidad de funcionamiento del dínamo que fue de 1200 RPM, por lo tanto:

$$v_2 = 1200 \text{ rpm} \quad (24)$$

$$w_2 = v_2 * \frac{2\pi}{60\text{s}} \quad (25)$$

$$w_2 = 1200 \text{ rpm} * \frac{2\pi}{60\text{s}}$$

$$w_2 = 125,6637 \text{ rad/s}$$

Para hallar el factor multiplicativo del mecanismo, se partió del principio de conservación de la energía (ecuación 26).

$$P_1 = P_2$$

$$\tau_1 w_1 = \tau_2 w_2 \quad (26)$$

Como el torque de entrada, obtenido por la ecuación 27, fue de 3,272Nm.

$$\tau_1 = \frac{P_1}{w_1} \quad (27)$$

$$\tau_1 = \frac{5,2715 \text{ W}}{1,6111 \text{ rad/s}}$$

$$\tau_1 = 3,272 \text{ Nm}$$

Se pasó a hallar el torque de salida del mecanismo con la ecuación 28.

$$\tau_2 = \frac{P_2}{w_2} \quad (28)$$

$$\tau_2 = \frac{5,2715 \text{ W}}{125,6637 \text{ rad/s}}$$

$$\tau_2 = 0,04195 \text{ Nm}$$

Finalmente, se halló la relación de velocidades que debía tener los dos mecanismos; para esto, se usó la ecuación 29:

$$r_t = \frac{w_1}{w_2} \quad (29)$$

$$r_t = \frac{1,6111 \text{ rad/s}}{125,6637 \text{ rad/s}}$$

$$r_t = 0,01282$$

La relación de velocidades se obtuvo con la ecuación 30, que no es otra que el inverso de la relación de torque.

$$r_v = \frac{1}{r_t} \quad (30)$$

$$r_v = \frac{1}{0,012821}$$

$$r_v = 78$$

Se concluye que la relación de velocidad mínima que debe tener el mecanismo para la generación de energía es de 1:78; por consiguiente, se requiere que, por un giro de la microturbina cinética, se logre como mínimo 78 vueltas en el dinamo (salida del mecanismo).

## 10.4 Engrane mecánico

El diseño del mecanismo se realizó respetando la disposición inicial de las aspas que conforman la microturbina cinética. Para esto se realizó un prototipo a escala en el laboratorio del flujo del caudal y la microturbina cinética. El mecanismo estuvo integrado por un tren de engranes compuesto, conformado por seis engranes, el eje que conecta a la salida de la transmisión es el eje del alternador, obteniendo de este modo el giro del rotor y, por consiguiente, la generación de energía eléctrica.

Las características del engrane principal fueron: Angulo de presión de  $20^\circ$ , Diámetro de paso 180mm, Módulo 2, Número de dientes igual a 105, Ancho de cara. Al estar en el mismo eje, la velocidad angular del primer engrane es la misma que la del trípode la microturbina cinética.

Se prosiguió a calcular el tren de engrane simple que permitiera aumentar la velocidad de entrada de 15,3846 RPM a más de 1200 RPM; para esto se recurrió a la ecuación 31, que relaciona el producto de número de dientes en engranes impulsores sobre engranes impulsados.

$$m_v = \pm \frac{\text{producto del número de dientes en engranes impulsores}}{\text{producto del número de dientes de engranes impulsados}} \quad (31)$$

Para proponer el número de dientes es importante conocer los números de dientes comerciales para el ángulo de presión que vamos a utilizar. Se determinaron 15 dientes para los engranes 2 y 4, 105 dientes para los engranes 1, 3 y 5, y 50 dientes para el engrane 6. Con estas especificaciones se obtuvo un valor de tren de 102,9.

$$m_v = \left(-\frac{N_1}{N_2}\right) \left(-\frac{N_3}{N_4}\right) \left(\frac{N_5}{N_6}\right) = \left(\frac{-105}{15}\right) \left(\frac{-105}{15}\right) \left(\frac{105}{50}\right) = 102,9$$

La relación la velocidad de salida está dada por la ecuación 32.

$$m_v = \frac{w_{salida}}{w_{entrada}} \quad (36) \rightarrow w_{salida} = m_v(w_{entrada}) = (102,9)(15,3846) = 1583,07 \text{ rpm} \quad (32)$$

Lo anterior cumple con la meta propuesta de lograr una velocidad de 1200 RPM. El diseño del tren de engranes fue el siguiente:

- El engrane 1 de 105 dientes; este engrane se encuentra ya instalado en la microturbina cinética.
- El engrane 2 de 15 dientes.
- El engrane 3 de 105 dientes.
- El engrane 4 de 15 dientes.
- El engrane 5 de 105 dientes.
- El engrane 6 de 50 dientes .

Los diámetros de paso de cada engrane se obtuvieron con la ecuación 33:

$$m = \frac{d}{N} \quad (33)$$

$$d = mN$$

Para los seis engranes, se dispuso lo siguiente:

$$d_1 = mN_1 = 2(105) = 300 \text{ mm} = d_3 = d_5$$

$$d_2 = mN_2 = 2(15) = 30 \text{ mm} = d_4$$

$$d_6 = mN_6 = 2(50) = 100 \text{ mm}$$

Para la selección del generador se tuvo en cuenta las siguientes consideraciones en el momento de escoger el dínamo: Disponibilidad de información (Data-sheet), Disponibilidad de la marca en el mercado de Bogotá. Mantenimiento disponible por parte de la empresa proveedora, y las dimensiones, y valores de voltaje y RPMS nominales. En Bogotá encontramos las siguientes empresas proveedoras de motores DC: BOSCH, MARELLI, SIEMENS, MAXON ECX, KAG y DE-LORENZO. Después del análisis de las características deseadas, se escogió la marca KAG, empresa alemana experta en la fabricación de motores DC.

Las dimensiones del dinamo deben corresponder con el espacio disponible en la microturbina cinética. Amperios y RPMS nominales determinan la curva característica de funcionamiento del dínamo: cantidad de corriente generada (amperios) a cierta velocidad de trabajo (RPM). Tomando en cuenta que el espacio disponible para el dínamo estaba confinado a 50mm x 60mm, se eligió el dínamo M63. En la Figura 39 se muestra algunas características de operación.

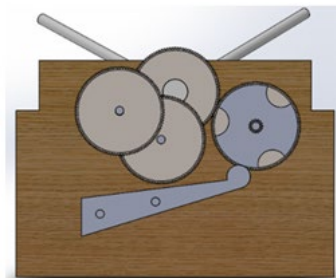
| <b>Standard types</b>                      |                                      |        |        |        |        |        |
|--------------------------------------------|--------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Types                                      | M63x25M63x25M63x40M63x40M63x60M63x60 |        |        |        |        |        |
| Part-No.                                   | 210950                               | 210961 | 210951 | 210962 | 220311 | 210963 |
| Nominal voltage [V <sub>DC</sub> ]         | 12                                   | 24     | 12     | 24     | 12     | 24     |
| Nominal torque [Ncm]                       | 14                                   | 14     | 18     | 18     | 22     | 30     |
| Nominal speed [1/min]                      | 3300                                 | 3250   | 2550   | 3050   | 3150   | 3000   |
| Nominal current [A]                        | 5.95                                 | 2.84   | 5.35   | 3.2    | 7.90   | 5.10   |
| Output power [W]                           | 48.4                                 | 48.0   | 48.1   | 57.5   | 72.6   | 94.2   |
| Rise of speed-characteristic [1/min / Ncm] | 39.3                                 | 30.9   | 19.4   | 19.4   | 15.9   | 13.3   |
| Torque constant [Ncm / A]                  | 2.8                                  | 6.0    | 3.8    | 6.4    | 3.1    | 6.5    |
| Rotor inertia [gcm <sup>2</sup> ]          | 596                                  | 596    | 792    | 792    | 1209   | 1209   |
| Weight [kg]                                | 1.16                                 | 1.16   | 1.46   | 1.46   | 1.73   | 1.73   |
| Length L [mm]                              | 95                                   | 95     | 110    | 110    | 130    | 130    |

Figura 39. Características de operación del motor DC tipo. Fuente (Kag Hannover, 2018).

#### 10.4.1 Motor dinamo M63X25

El principio de funcionamiento del mecanismo está supeditado a la microturbina cinética, es decir, cada vez que el aspa gire por el paso de caudal, alimenta al sistema de transmisión para generar en terminales del dínamo un

voltaje de salida. En la Figura 40 se muestra la primera sección del mecanismo y el tren de engranes compuesto.



*Figura 40. Simulación del mecanismo, vista superior y frontal.*

Para la implementación del sistema de engranes mecánico se usaron los siguientes materiales: 4 engranes de hierro de 105 dientes en su parte exterior y 15 dientes en su parte interior, 1 resorte, 1 palanca de freno, 1 rodamiento, 1 metro de tubo de PVC de  $\frac{1}{2}$  pulgada, 1 metro de espárrago, 1 sección empaque industrial (torneado), 1 dinamo (especificado anteriormente), tuercas, tornillos, bases de madera, estructura metálica, lubricante para los engranes.

Se construyó el prototipo del mecanismo de engranes mecánico y se hicieron pruebas de campo para realizar los ajustes y optimizar la energía generada. Se realizó la medición del torque requerido para vencer la fuerza de reposo de la microturbina cinética, ver Figura 41.



*Figura 41. Implementación del mecanismo.*

La velocidad promedio de la microturbina cinética fue de: 15,3846 RPM debido al paso controlado promedio de caudal, y la velocidad de salida del dínamo de 1583,07 RPM, como se muestra en la Tabla 14.

Tabla 14. Resumen de los valores del diseño del mecanismo.

| TIPO                                | VALOR            |
|-------------------------------------|------------------|
| Angulo de presión                   | 20°              |
| Diámetro de paso                    | 180mm            |
| Modulo                              | 2                |
| Velocidad de entrada                | 15,3646 RPM      |
| Velocidad de salida                 | 1583,07 RPM      |
| Relación de engranes                | 102,9            |
| Cantidad de dientes de los engranes | 105 y 15 dientes |
| Voltaje de operación                | 24V              |

Para el dimensionamiento del mecanismo, se tomó como referencia un aspa de una microturbina cinética prototipo. Como el torque del aspa era mayor al especificado en una microturbina cinética comercial, se decidió eliminar masa en los engranes del mecanismo, lo que redujo el torque, acercándose de este modo al torque del aspa de una microturbina cinética real.

## 10.5 Mecanismo de inducción magnética

Para el diseño del mecanismo por inducción magnética se tuvo en cuenta la velocidad de giro de la microturbina cinética, y el voltaje deseado de salida del mecanismo de 10v. Para el dimensionamiento del mecanismo, se partió de la caracterización del imán de neodimio: tamaño, remanencia, energía almacenada, cantidad de polos, número de imanes y su distribución dentro de la rueda; como también del cálculo y caracterización de las bobinas: número de vueltas, tamaño, calibre del conductor, área y material del núcleo. Con la ecuación 34 se diseñó el mecanismo

$$E = \frac{4.44 * N_s * f * \Phi * K_a * K_d}{1} \quad (34)$$

Dónde:

E: es la FEM en voltios

4.44: es una constante

Ns: es el número de espiras en serie

f: es la frecuencia

$\Phi$ : flujo magnético por polo en webers

Ka y Kd son constantes cuyo producto se toman como 1.

En el diseño se tuvo en cuenta los siguientes parámetros: Velocidad de rotación, Número de polos, Número de bobinas y características, selección de los imanes y la selección del conductor de las bobinas.

La velocidad magnética de giro, de un motor con imanes, está determinada por la siguiente formula.

$$f = \frac{n * p}{120} \quad (35)$$

Dónde:

$f$ : Frecuencia eléctrica, en Hz

$p$ : polos

$n$ : Velocidad magnética en Rev./min (velocidad de giro del rotor)

Con la ecuación 36 se obtuvo el perímetro de la rueda que iba a contener el mecanismo por inducción magnética.

$$L_{\text{perímetro}} = \#Polos * Anchura_{\text{imanes}} + (\#Polos - 1) * Separación_{\text{imanes}} \quad (36)$$

Despejando el  $\#Polos$

$$\begin{aligned} \#Polos &= \frac{L_{\text{perímetro}} + Separación_{\text{imanes}}}{Anchura_{\text{imanes}} + Separación_{\text{imanes}}} \\ \#Polos &= \frac{2\pi r + Separación_{\text{imanes}}}{Anchura_{\text{imanes}} + Separación_{\text{imanes}}} \end{aligned}$$

Para el cálculo del perímetro se tuvo en cuenta imanes de neodimio comerciales con un diámetro de 3cm, y se asumió una distancia de separación entre imanes de 7cm. El diámetro de la rueda que contenía los imanes fue 29cm, y el diámetro del círculo sobre el cual se ubicaron los imanes fue de 26cm; en consecuencia, se utilizó un radio  $r=13\text{cm}$ .

$$\begin{aligned} \#Polos &= \frac{2\pi * 13 + 7 \text{ cm}}{3 \text{ cm} + 7 \text{ cm}} \\ \#Polos &= 8,868 \end{aligned}$$

Para el buen funcionamiento del mecanismo se utilizó un número par de polos: se diseñó con 16 polos, 8 en cada cara de la rueda. De la ecuación 36 se obtuvo:

$$f = \frac{3,36 * 8}{120} = 0,224\text{Hz}$$

Los 16 polos implicaron 16 imanes de neodimio.

**Caracterización del imán:** Comercialmente se identificaron imanes de neodimio con las siguientes especificaciones: Ø y h (altura). Para el diseño del mecanismo se usaron imanes con la referencia N45. Se escogieron porque presentaban en su hoja de especificaciones (Tabla 15) mayor fuerza magnética, remanencia y tamaño (de los disponibles en el mercado).

Tabla 15. Especificaciones técnicas del imán.

| Código artículo          |  | S-30-03-N                |
|--------------------------|--|--------------------------|
| EAN                      |  | 7640155438223            |
| Material                 |  | NdFeB                    |
| Forma                    |  | Disco                    |
| Diámetro                 |  | 30 mm                    |
| Alto                     |  | 4 mm                     |
| Tolerancia               |  | +/-0,1 mm                |
| Sentido de magnetización |  | axial (paralelo al alto) |
| Revestimiento            |  | niquelado (Ni-Cu-Ni)     |

Para hallar el flujo magnético del imán, se recurrió a la ecuación 37 y a los datos técnicos de la Tabla 16.

Tabla 16. Características del grado del imán seleccionado propiedades magnéticas del imán de neodimio N45.

| GRADO DEL IMAN | REMANENCIA  |           | COERCITIVIDAD |         |     |       | PRODUCTO MÁXIMO ENERGÉTICO |         | TEMPERATURA |
|----------------|-------------|-----------|---------------|---------|-----|-------|----------------------------|---------|-------------|
|                | GAUSS       | TESLA     | Bhc           |         | lhc |       | (B*H) máx.                 |         | Max °C      |
|                |             |           | Koe           | K A/m   | Koe | K A/m | MGOe                       | KJ/M3   |             |
| N45            | 13200-13700 | 1,32-1,37 | 10,8-12,5     | 860-995 | ≥12 | ≥955  | 43-45                      | 342-358 | ≥80         |

$$\Phi = B \cdot S \cdot \sin \alpha \quad (37)$$

Donde,

$B = 1.32 \text{ T}$  (Valor de remanencia mínimo)

S es la sección del área del imán:  $\pi * \frac{d^2}{4}$

$\alpha=90$ , debido a que el flujo es perpendicular.

$$\Phi = 1.32 * \pi * \frac{d^2}{4} = 1.32 * \pi * \frac{0,03^2}{4} = 0.000933 \text{ Wb}$$

Para hallar la energía magnética se utilizó la ecuación 38.

$$W_m = w_m * V \quad (38)$$

Dónde:

$W_m$ : Energía magnética.

$w_m$ : Intensidad de la energía.

V: Volumen del Imán.

De la Tabla 16 se usó valor de producto máximo mínimo B\*H:

$$(B * H) = 342 \text{ kJ/m}^3 (\text{Valor de producto máximo mínimo})$$

$$w_m = \frac{B * H}{2} = \frac{342}{2} = 171 \text{K} \left[ \frac{\text{J}}{\text{m}^3} \right]$$

Remplazando los valores en la ecuación 42, se obtuvo:

$$W_m = 171 * \pi * \left( \frac{d}{2} \right)^2 * h$$

$$W_m = 171 * 1000 * \pi * \left( \frac{30 \times 10^{-3}}{2} \right)^2 * 0,004 = 0.4835 \text{ [J]}$$

Teniendo en cuenta que el sistema contaba con 16 imanes, la energía magnética total entregada:  $W_{mt}$  se halló con la ecuación 39.

$$W_{mt} = W_m * 16 \quad (39)$$

$$W_{mt} = (0.4835) * 16 = 7.736 \text{ [J]}$$

Potencia eléctrica que pueden producir los imanes que se mueven a una velocidad angular: la potencia del mecanismo se obtuvo con la ecuación 40.

$$P_{elec} = W_{mt} \cdot \omega \quad (40)$$

$$P_{elec} = 7.736 * 3,36 \text{ rpm} * \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} * \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ seg}} = 2.722 \text{ Watts}$$

Donde:

$P_{elec}$ : Potencia eléctrica en Watts

$\omega$ : es la velocidad angular en radianes por segundo

Para el diseño de las bobinas se partió de la potencia hallada arriba, de su valor de inductancia y dimensiones. Con la potencia se estimó la corriente, utilizando la ley de ohm (ecuación 41).

$$P = VI \quad (41)$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{2,722}{10} = 0,27 \text{ A}$$

Donde:

$P$ : Potencia eléctrica en vatios

$V$ : Diferencia de potencial en voltios

$I$ : Corriente en amperios

Otros parámetros que se tuvieron en cuenta fueron los siguientes:

$$\emptyset \text{ núcleo} = 1' = 2,54 \text{ cm}$$

Dado que la corriente estimada era de 0.27A, se seleccionó un conductor de cobre esmaltado de calibre 21, cuya capacidad de corriente era de 1.6A, que era suficiente para la corriente calculada y también se escogió debido a su maleabilidad para el arrollamiento.

La altura de las bobinas se escogió de 3cm. Para el núcleo se usaron láminas de transformadores, dispuestas en el núcleo de forma rectangular. El carrete fue fabricado con un núcleo de tubo PVC de 1 pulgada.

Ya que el espesor del cable escogido AWG21 era de 0,723mm, se diseñaron bobinas con una longitud de 4.2cm y núcleo de 2,54cm. Para obtener el número de vueltas se utilizó la ecuación 42.

$$\#vueltas = \frac{\text{altura bobina} \cdot \text{espesor bobina}}{\text{espesor cable}^2} \quad (42)$$

$$\#vueltas = 459.12 \text{ vueltas}$$

El diseño de la bobina se aproximó a 450 vueltas. A las bobinas se les insertaron láminas en su núcleo de forma cuadricular, para encausar las líneas de fuerza. En la Tabla 17 se observa la permeabilidad de algunos materiales. Para el diseño de la bobina, específicamente selección del núcleo, se escogió el material de mayor grado de permeabilidad.

Tabla 17. Permeabilidad relativa de los materiales. Permeabilidad y permitividad.

| Diamagnéticos  | Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ) |
|----------------|------------------------------------|
| Bismuto        | 0,99983                            |
| Plata          | 0,99998                            |
| Plomo          | 0,999983                           |
| Cobre          | 0,999991                           |
| Agua           | 0,999991                           |
| Paramagnéticos | Permeabilidad relativa ( $\mu_r$ ) |
| Aire Aluminio  | 1,0000004                          |
| Plata          | 1,00002                            |

Otros parámetros del diseño de las bobinas fueron:

N= Numero de vueltas=450

L= Longitud de la bobina =0.03 m=30mm

r= radio de núcleo de bobina=1 pulgada=25.4mm

A=Área del núcleo= 1.5 cm\* 2 cm=0,0003m<sup>2</sup>

I = Amperaje por bobina=0.2A

$\mu_r$  = Permeabilidad del material ferromagnético usado=7000

$\mu_0$  = Permeabilidad del vacío  $= 4\pi \cdot 10^{-7}$

La intensidad del campo magnético se halló con la ecuación 43.

$$H: \text{Intensidad de campo magnético} = \frac{NI}{L} \quad (43)$$

$$(\text{Ley de Amper}) = \frac{450 \cdot 0,2}{0,03} = 3000 \text{ Av/m}$$

Aunque la corriente calculada fue de 0.27 A, se descontó 0,07A por pérdidas debido al flujo disperso (no todo el flujo iba a ser concatenado por la bobina). Así que los cálculos en adelante se hicieron con 0.2 A.

Reemplazando la ecuación 43 en la ecuación 44, se obtuvo el flujo magnético con la ecuación 44.

$$B = \frac{\mu \cdot N \cdot I}{L} = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 7000 \cdot 3000 = 26,389 \text{ T} \quad (44)$$

Donde:

$$\mu = \mu_r \cdot \mu_0$$

Con el flujo magnético, se halla el flujo concatenado.

$$\Phi = B \cdot S \cdot \text{Sen}\alpha = 26,389 \cdot (0,0003) = 0,007916 \text{ Wb}$$

Para comprobar:

$$E = \frac{4.44 \cdot N_s \cdot f \cdot \Phi \cdot K_a \cdot K_d}{1} = \frac{4.44 \cdot 450 \cdot 2 \cdot 0,224 \cdot 26,389 \cdot 1}{1} = 7.08564 \text{ V}$$

El factor de 2 que multiplica la expresión es el efecto de las boinas de una cara que se conectan en serie con las de la otra cara, dicha conexión se realizó de tal manera de que se presentara superposición de FEM inducidas. La Tabla 18 resume las variables calculadas, para el diseño de las bobinas.

*Tabla 18. Resumen de parámetros calculados.*

| VALORES CALCULADOS                                        | Cantidad    |
|-----------------------------------------------------------|-------------|
| Número de polos por cara                                  | 8           |
| Frecuencia eléctrica                                      | 0,224 Hz    |
| Flujo en la cara de un imán                               | 0.000933 Wb |
| Energía magnética almacenada en un imán                   | 0,4835 J    |
| Energía magnética total almacenada                        | 7,736 J     |
| Potencia eléctrica producida por los imanes en movimiento | 2,722 watts |
| Corriente de las bobinas                                  | 0,2 A       |
| Calibre conductor                                         | 21 AWG      |

Para la implementación y evaluación del mecanismo magnético, se procedió a simularlo; para esto se usaron los siguientes materiales: 750 m de cable esmaltado calibre 21 AWG. Medio metro de tubo PVC de pulgada, 16 imanes de neodimio de 30mm de diámetro y altura de 3 mm, 2 tablas de madera de 40cmx 40 cm de 1 cm de grosor, medio metro de tubo PVC de media pulgada, 1 circunferencia de 29 cm de diámetro, pegamento epóxico, tornillos, tuercas, regletas, cable conductor, bases de madera, y láminas de núcleos de transformadores.

Después de la construcción de las ruedas, y de las bobinas con núcleo laminado, y de seleccionar los imanes, se ubicaron imanes y bobinas en las ruedas (3), se conectaron entre si las bobinas, y acoplaron las tres ruedas a un eje común. Y se procedió a simular en SolidWorks.

Una de las ruedas contenía el grupo de imanes, con las siguientes características: Diámetro imanes: 30mm, diámetro estructura de madera: 290mm, diámetro de circulo centro (eje)=1/2 pulgada, espesor imanes: 4mm, espesor madera= 3mm, bases circular pequeña, diámetro externo= 5cm, diámetro interno= 1 pulgada, y altura= 3cm. En la Figura 42 se puede apreciar la disposición de los imanes en la rueda.

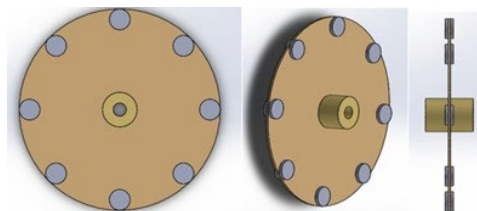
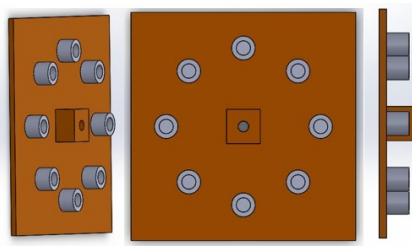


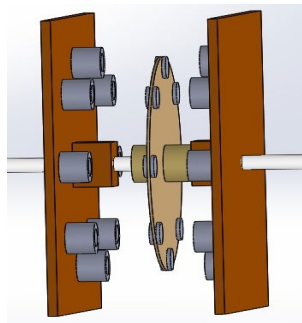
Figura 42. Estructura imanes en SolidWorks.

Las dos ruedas restantes contenían el grupo de bobinas, con las siguientes características: Diámetro núcleo de bobinados: 1 pulgada (25,4mm), estructura de madera: 40 cmx 40 cm, radio de circulo de disposición de las bobinas :16.5cm, diámetro total de las bobinas: 4.2 cm, diámetro de circulo centro (eje)= 1/2 pulgada, espesor madera= 1 cm, base cuadrada: lado: 50mm y altura: 40mm. En la Figura 43 se muestra la distribución de las bobinas en una de las ruedas.



*Figura 43. Estructura de las bobinas en SolidWorks.*

El eje común del mecanismo magnético consistió en un tubo de aluminio de 540mm. Para el montaje de las ruedas sobre el eje se guardó la siguiente distribución: Separación entre las caras de los discos: 7cm, disposición tubo: 1 extremo: 10cm y 2 extremo: 30cm. En la Figura 44 se muestra la integración de las partes en el sistema.



*Figura 44. Montaje final de las piezas mecanismo magnético SolidWorks.*

En la Figura 45 se muestra la ubicación definitiva de los imanes en la rueda (base circular de 29 cm de diámetro) en el proceso de construcción.



*Figura 45. Ubicación de los imanes espaciados cada 45°.*

*Construcción de las bobinas:* En la Figura 46 se muestran las bobinas sobre carretes de PVC de 1 pulgada con 450 vueltas, y el alambre de cobre esmaltado de calibre 21 utilizado en los embobinados.



Figura 46. Bobinas de cable de cobre esmaltado.

Las bobinas se dispusieron enfrentadas a las caras de los imanes para lograr mayor flujo inducido. En la Figura 47 se ve la estructura de madera (aún no se ha cortado en forma de rueda), con el rodamiento ya acoplado y las bobinas insertadas.

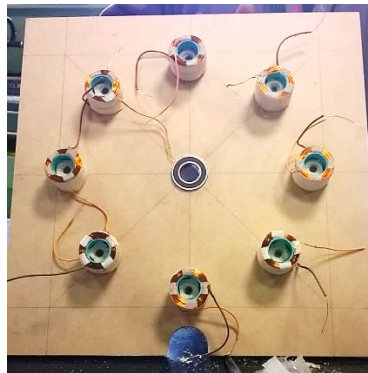


Figura 47. Estructura bobinas.

*Construcción de los núcleos de las bobinas:* se hicieron con láminas de hierro recicladas de transformadores en desuso, las cuales se cortaron en dimensiones de 1.5 x 2 cm, se agruparon y introdujeron como núcleo de la bobina. Ver Figura 48.

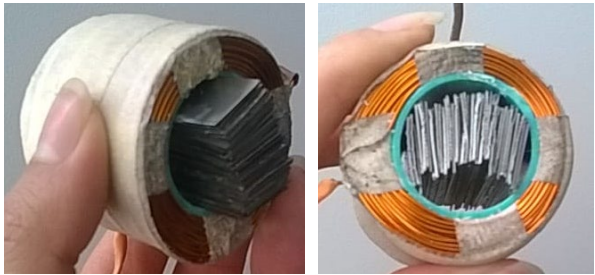


Figura 48. Bobinas con el núcleo incorporado.

La Figura 49 muestra el sistema de conversión de energía mediante inducción magnética ensamblando.

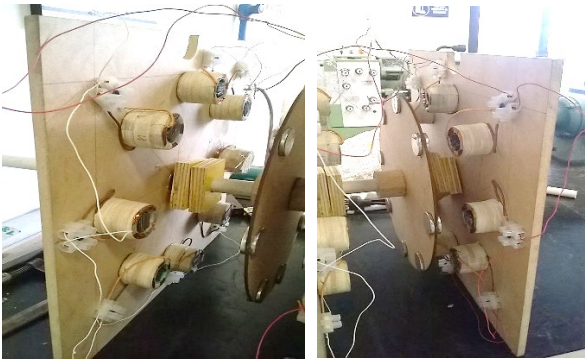


Figura 49. Ensamble total de las piezas del mecanismo magnético.

Con la puesta de funcionamiento del mecanismo, se mide el voltaje de salida en las bobinas. Para esta medición se consideraron diferentes conexiones entre las bobinas. Para facilitar la distinción de las polaridades de la bobina, y su futura interconexión, se dispuso de polaridades naranja y café como referencia para distinguir el sentido de enrollamiento. Se hicieron mediciones, primero de resistencia de inductancia y resistencia en las diferentes bobinas, obteniendo los valores promedios descritos en la Tabla 19.

Tabla 19. Caracterización de las pruebas en las bobinas.

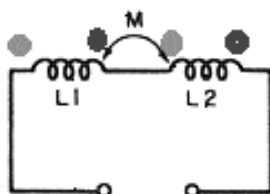
|                      |              |
|----------------------|--------------|
| RESISTENCIAS BOBINAS | 2.9 $\Omega$ |
| INDUCTANCIA BOBINAS  | 53 Mh        |

Para la interconexión de las bobinas se midió el voltaje bajo diferentes configuraciones (Tabla 20). Aquella interconexión que arrojará mayor salida de voltaje sería la escogida.

*Tabla 20. Datos de voltajes de salida con diferentes configuraciones de conexión en las bobinas.*

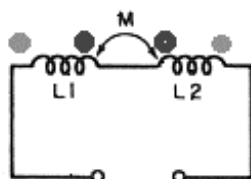
| Configuración/Voltaje (v)             | V <sub>PROM</sub> | V <sub>MÁX</sub> |
|---------------------------------------|-------------------|------------------|
| PARALELO (1-3-5-7)                    | 230 mv            | 353 mv           |
| PARALELO (2-4-6-8)                    | 230 mv            | 367 mv           |
| SERIE (9 A 16)                        | 100 mv            | 184 mv           |
| PARALELO (PARALELO 8 CON SERIE 9 A16) | 300 mv            | 353 mv           |
| PARALELO (9-11-13)                    | 480 mv            | 635 mv           |
| BOBINA 9                              | 631,4 mv          | 631,4 mv         |
| SERIE (9 Y 10)-NARANJA -NEGRO         | 205 mv            | 235 mv           |
| SERIE (9 Y 10)-NARANJA -NARANJA       | 584 mv            | 600 mv           |

En la configuración SERIE (1 A 8), SERIE (9 A 16), SERIE TOTAL CABLES DEL MISMO COLOR, de la Tabla 20, los cables fueron conectados intercaladamente, es decir el cable naranja de una bobina con el cable naranja del otro, el cable café con el café, y así sucesivamente. En esta configuración se obtuvo mayor salida de voltaje como se puede observar en la Figura 50 que muestra la conexión en serie normal (acoplamiento aditivo).



*Figura 50. Conexión serie entre dos bobinas.*

También se ensayó la interconexión de bobinas en serie, pero con las polaridades invertidas, como se muestra en la Figura 51. El voltaje de salida para esta conexión no dio buenos resultados (acoplamiento sustractivo).



*Figura 51. Conexión serie entre dos polos, con polos cambiados.*

Por último, se probó la configuración en paralelo como se muestra en la Figura 52. Los resultados tampoco fueron buenos (voltajes bajos).

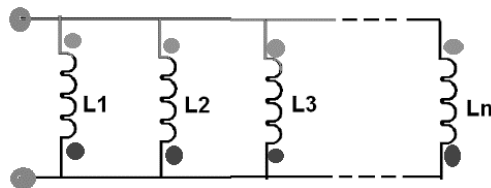


Figura 52. Conexión Paralelo de 4 bobinas.

La construcción del sistema de conversión de energía mediante inducción magnética finalizó con el aseguramiento de toda la estructura mediante la sujeción de las partes con tornillos, y su acople a una manivela que simulaba el efecto del aspa de una microturbina cinética, ver Figura 53.

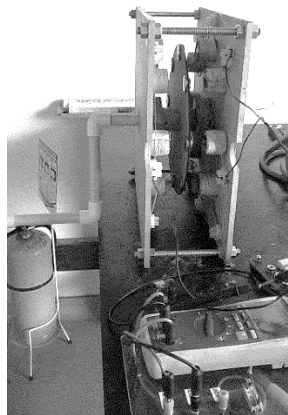


Figura 53. Prototipo magnético final, con manivela adicionada al eje.

La fase de ajustes permitió mejorar el mecanismo de conversión de energía mediante el rodamiento del eje para evitar pérdidas por fricción, y configuración serie de interconexión de bobinas para obtener la mayor FEM inducida.

## 10.6 Mediciones de fuerza y tiempo

Acoplado el mecanismo por engranes mecánico a la microturbina cinética, se hicieron varias pruebas, obteniendo un intervalo de 12v a 17v generados. Como evidencia se muestra en la Figura 54 el encendido de una bombilla LED de 12W, que se conectó como carga al mecanismo.



Figura 54. Resultados obtenidos del mecanismo de engranes mecánicos.

Las mediciones de fuerza y tiempo de giro del aspa cuando pasa caudal, permitieron hallar el intervalo de RPM de la microturbina cinética en operación: valor máximo de 3,8 RPM y mínimo de 2,56 RPM.

Por otro lado, el mecanismo por inducción magnética conectado a la microturbina cinética, generó un voltaje promedio de 5v. Cuando se probó con una velocidad de la microturbina cinética menor a 2,56 RPM se generó una tensión eléctrica de 2v, mientras con el incremento de las RPMs hasta 3,8 se alcanzó a generar 11v. En las pruebas en el laboratorio también se probó el mecanismo con velocidades superiores a 100RPM (mediante elemento externo: taladro) logrando tensiones generadas de 40v.

Para medir la potencia, se conectó la salida de las bobinas serie del mecanismo a un banco de resistencias, que variaba de 100  $\Omega$  hasta 500 $\Omega$ . La salida de voltaje antes y después de los ajustes se muestra en la Tabla 21.

Tabla 21. Salidas de voltaje por 2 métodos.

| VOLTAJE A LA SALIDA  | Torniquete | Taladro |
|----------------------|------------|---------|
| Mecanismo ajustado   | 2-11V      | 15-40V  |
| Mecanismo sin ajuste | 2-7V       | 15-34V  |

En la Tabla 22 se presenta la comparación de los resultados de voltajes generados mediante ambos mecanismos.

*Tabla 22. Resultados obtenidos para los dos mecanismos.*

| <b>MECANISMO MECANICO</b>                                          | <b>MECANISMO MAGNÉTICO</b>                                   |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Voltaje de salida para torniquete 3: 12-17v                        | Voltaje de salida para torniquete 3: 7-11v                   |
| Voltaje de salida para velocidades mayores a 3,8 RPM: 12-30v       | Voltaje de salida para velocidades mayores a 3,8 RPM: 15-40v |
| Potencia entregada: 12 W                                           | Potencia entregada: 1 W                                      |
| No requiere de mucho espacio                                       | Requiere de un gran espacio, debido al tamaño de las ruedas  |
| Presenta grandes pérdidas por fricción y masa del tren de engranes | Presenta menos pérdidas (por dispersión de flujo)            |
| El mayor costo monetario: engranes                                 | El mayor costo monetario: imanes                             |
| Genera Ruido                                                       | No genera ruido                                              |

## Conclusiones

La agricultura inteligente permite que las personas puedan exigir y conocer en tiempo real datos sobre la relación entre el gasto del agua usada en los cultivos, productos químicos utilizados, como y cuando fueron cosechados, de donde provienen y muchos aspectos más, por ende, que las granjas inteligentes son un factor revolucionario que debe implementarse lo antes posible. De acuerdo con esto, el uso y desarrollo tecnológico de sensores inalámbricos, sistemas de procesamiento en sitio, el IoT, la ciencia de datos y el Cloud computing ayudan a desarrollar la agricultura inteligente.

La Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) indica que para el 2050 es necesario incrementar la producción de alimentos en un 70% para el sustento de la población mundial. Si no ocurre este aumento en la producción agrícola, es muy probable que la escasez se extienda aumentando los precios y las tasas de mortalidad y pobreza. Por lo tanto, se destaca la importancia que tienen las granjas inteligentes como un aporte de solución a implementar frente a esta problemática futura en Colombia.

El uso de tecnologías emergentes como IoT facilita la adquisición, transmisión, almacenamiento y presentación de datos, y sirve de punto de partida para la integración de tecnologías como AUV o Drones, la robótica, la Inteligencia Artificial IA, esto en el contexto de competitividad, fortalece los

indicadores de eficiencia mejorando la calidad de los productos y la cadena de producción y logística a todo nivel.

Los resultados obtenidos de los mecanismos alternativos para la generación de energía eléctrica permiten concluir que el mecanismo mediante engranes mecánico generó mayor potencia frente a su similar por inducción magnética; también se pudo concluir que se pueden acoplar ambos mecanismos para aumentar la potencia entregada. Con esta investigación se promueve e incentiva el uso de energía renovable para aplicaciones en granjas inteligentes.

La convergencia tecnológica como pilar de la integración de sistemas permite en la actualidad generar soluciones innovadoras para diferentes problemáticas agropecuarias. Desde el punto de vista de la tecnología, problemas de conectividad, infraestructura y seguridad se enfrentan desde diferentes arquitecturas que logran garantizar que los procesos informáticos y de automatización se realicen.

Arquitecturas, software y hardware son asequibles a costos bajos y la diversidad permite seleccionar diferentes operadores, este conjunto de facilitadores conllevan a solución de actividades tecnológicas en los procesos como sistemas de monitoreo, control de clima, sistemas de riego entre otros, económicas y de fácil implementación, lo anterior tiene un alto impacto no solamente desde los procesos de negocios, también tiene un alto impacto social en comunidades con dificultades al acceso tecnológico y a la capacitación del recurso humano.

La diversidad de procesos de cultivo está creciendo en popularidad entre los campesinos rurales y los habitantes urbanos solventando problemas como la seguridad alimentaria y disminuyendo costos logísticos. La implementación de la automatización a escala, permite crear soluciones agrícolas que impactan indicadores de producción mejorando la calidad de los productos.

# Referencias bibliográficas

- Absorsistem. (2020). Principios básicos de la condensación. Obtenido de absorsistem: <https://www.absorsistem.com/tecnologia/condensacion/principios-basicos-de-la-condensacion>
- Agriculturers. (29 de 01 de 2015). Aprende sobre el sistema hidroponia NFT. Recuperado el 01 de 07 de 2020, de Agriculturers: <http://agriculturers.com/aprende-sobre-el-sistema-hidroponia-nft/>
- Allen, R. G. (2006). Evapotranspiración del cultivo. Roma: FAO.
- Argudo, J. F. (2016). El sismo del 16 de abril de 2016 (160416) en Guayaquil evidencias precedentes y recientes. Guayaquil: Argudo y asociados s.a.
- Atlam, G. A. (2013). Comparative Study on CBIR based on Color Feature. International Journal of Computer Applications, 9-15.
- Azfanizam, S., Ikhwan, M., & Anuar, M. (2016). Mechanical Design of Power Generator Using Door Openings for Household. International Conference on Advances in Electrical. Electronic and System Engineering, 14-16.
- BBVA. (2020). El Internet de las Cosas de código abierto: plataformas y aplicaciones para desarrolladores. Obtenido de Node Red: <https://bbvaopen4u.com/es/actualidad/el-internet-de-las-cosas-de-codigo-abierto-plataformas-y-aplicaciones-para>
- Bellinger, R. G. (1999). Pesticidas orgánicos y biopesticidas. The Home & Garden Information Center (HGIC) Clemson University. <https://hgic.clemson.edu/factsheet/pesticidas-organicos-y-biopesticidas/>
- Benjamin, S. K., Barnett, B. K., Adler, S., Fischer, G., & Cochran, T. (2018). Cities of the 21st Century. US: Smart Cities Survey.
- Ben-Joseph, E. (03 de 2019). Kidshealth. Recuperado el 28 de 06 de 2020, de Gérmenes: bacterias, virus, hongos y protozoos: <https://kidshealth.org/es/teens/care-about-germs-esp.html>

- Cárdenas, M. F. (2016). Ecohydrology of paramos in Colombia: Vulnerability to climate change and land use. Tesis de maestría. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Carrillo, J. A., Martínez, J. Á., Ayala, F., & López, C. A. (2019). Screening for Resistance to *Meloidogyne enterolobii* in *Capsicum annuum* Landraces From Mexico. *Plant Disease*, 1-30.
- Chapman, S. J. (2012). Máquinas Eléctricas. México D.F: Mc Graw Hill/Interamericana editores.
- Chen, C. H., & Ho, C. C. (2016). Implementation of multi-channel technology in ZigBee wireless sensor networks. *Informática e Ingeniería Eléctrica*, 498-508.
- Cisco Systems. (2014). The Internet of Things Reference Model. Washington: Cisco.
- Cortazzo, A. S. (2015). Hidroponia: una gota viva de esperanza. Uruguay: Ministerio de agricultura.
- Cuesta, F., Bustamante, M., Becerra Ramírez, M. T., & Postigo, J. C. (2012). Panorama andino de cambio climático: Vulnerabilidad y adaptación en los Andes Tropicales. Panorama andino de cambio climático: Vulnerabilidad y adaptación en los Andes Tropicales.
- Dehollain, P. (1995). Concepto y factores condicionantes de la seguridad alimentaria en hogares. *Agroalimentaria*, 338-340.
- ECC. (2017). Jointly issued by the Edge Computing Consortium (ECC) and Alliance of Industrial Internet (AII). Edge Computing Reference Architecture 2.0. <http://en.eccconsortium.net/Uploads/file/20180328/1522232376480704.pdf>
- EUROPE, G. H. (2014). GHE. Obtenido de General Hydroponics EUROPE : <https://www.yumpu.com/es/document/view/19568403/el-cultivo-hidroponico-ya-no-es-una-tecnologia-del-futuro>
- Fernández, M. R., Alonso, I. G., & Casanova, E. Z. (2016). Online identification of appliances from power consumption data collected by smart meters. *Pattern Analysis and Applications*, 19(2), 463-473.
- Ferro, R. (2016). Cloud Computing. Bogotá: Cámara Colombiana del Libro.
- Food and Agriculture Organization. (2015). Agricultura mundial: hacia los años 2015/2030. New York: FAO.
- Foundation OpenJS. (11 de 06 de 2020). Node Red. Recuperado el 27 de 06 de 2020, de Node Red: <https://nodered.org>
- Friess, P. G. (2011). Internet of Things Strategic Research Roadmap. *Internet Things-Global Technol*, 8-64.
- Geoenciclopedia. (2020). [www.geoenciclopedia.com](http://www.geoenciclopedia.com)
- Gimenez, J. M., & Gómez, J. C. (2011). Generación eólica empleando distintos tipos de generadores considerando su impacto en el sistema de potencia. *Dyna*, 95-104.

- González García, A. J. (2017). IoT: Dispositivos, Tecnologías de Transporte y Aplicaciones. Madrid: Universidad Oberta de Catalunya.
- González, D. R. (2013). Arquitectura y gestión de la IoT. Telemática.
- Gonzalez, R., Ferro, R., & Aguirre, E. (2020). Introducción a la investigación sobre desastres naturales y ciudades inteligentes. Bogotá: Universidad Distrital. <https://doctoradoingenieria.udistrital.edu.co/libro/IntrolInvestSobreDesastNaturCiudIntel>
- Grenón, D. A. (2015). Agromática: Aplicaciones Informáticas para el Sector Agropecuario. Santa Fe, Argentina: Universidad Nacional del Litoral. Obtenido de La génesis de la tecnología: <http://newcreacion.blogspot.com/>
- Hofstede, R., Calles, J., López, V., Polanco, R., Torres, F., Ulloa, J., & Cerra, M. (2014). Los Páramos Andinos ¿Qué sabemos? Estado de conocimiento sobre el impacto del cambio climático en el ecosistema páramo. UICN Ecuador.
- IAvH. (2011). Informe sobre el estado de los recursos naturales renovables y del ambiente, componente de biodiversidad, 2010-2011. Bogotá.
- IEEE SA. (14 de 06 de 2018). IEEE Standard for Adoption of OpenFog Reference Architecture for Fog Computing. Recuperado el 24 de 06 de 2020, de <https://standards.ieee.org/standard/1934-2018.html>
- IoTforall. (22 de 06 de 2020). Smart Farming: The Future of Agriculture. Recuperado el 16 de 07 de 2020, de <https://www.iotforall.com/smart-farming-future-of-agriculture/>
- Jadhav, P., & Satao, R. (2016). A Survey on Opportunistic Routing Protocols for Wireless Sensor Networks. Procedia Computer Science.
- Kosmides, P., Adamopoulou, E., Demestichas, K., Theologou, M., Anagnostou, M., & Rouskas, A. (2015). Socially aware heterogeneous wireless networks. Sensors, 15(6), 13705-13724.
- Liu, F., Tong, J., Mao, J., Bohn, R., Messina, J., Badger, L., & Leaf, D. (2011). NIST cloud computing reference architecture. NIST special publication, 500(2011), 1-28.
- López, J., & Losada, A. (1998). Evolución de técnicas de riego en el sudeste de España. Ingeniería del agua, 41-50.
- Magán, J. (2019). Recirculación de las soluciones nutritivas. Manejo y control microbiológico. Mexico: Infoagro Systems, S.L.
- Malca, O. (2001). [https://www.google.com/search?q=Seminario+de+Agro+Negocios+Lechugas+hidropo%CC%81nicas&client=safari&rls=en&sxsrf=ALeKk02HB\\_n8\\_zUVFLCTo5Puiag4SU8xAw:1595668620139&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=Rk9T05DnR-vDkM%252CMuOTT-K-iVPLQM%252C\\_&vet=1&usq=Al4\\_-kSZILa\\_](https://www.google.com/search?q=Seminario+de+Agro+Negocios+Lechugas+hidropo%CC%81nicas&client=safari&rls=en&sxsrf=ALeKk02HB_n8_zUVFLCTo5Puiag4SU8xAw:1595668620139&tbm=isch&source=iu&ictx=1&fir=Rk9T05DnR-vDkM%252CMuOTT-K-iVPLQM%252C_&vet=1&usq=Al4_-kSZILa_). Peru : Universidad del pacífico.
- Márquez, H., & Tlatelpa, J. P. (2010). Diseño de un mecanismo para la transformación de energía mecánica a eléctrica en un torniquete: Caso STC. Culhuacán: Unidad Culhuacán.

- Martín Castillo, J. C. (2012). Máquinas eléctricas. Madrid: Editex.
- Mondragón, V., Pineda, W., & Trejo, C. (2015). Generación de energía eléctrica por imanes de neodimio. México: Escuela superior DE Ingeniería Mecánica y eléctrica.
- Nelson, G. C. (2009). Cambio Climático. El impacto en la agricultura y los costos de adaptación. Washington: FAO.
- Norton, R. L., Ríos, M. Á., Osornio, C., & Acevedo, M. (2013). Diseño de maquinaria Síntesis y análisis de máquinas y mecanismos/ \$c. Mexico: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A.
- Olufemi, A., Okocha, R., & Olufemi, O. (2014). Global Climate Change. Journal of Geoscience and Environment Protection, 114-122.
- OMS. (05 de 2016). Organización mundial de la salud. Recuperado el 28 de 06 de 2020, de ¿Residuos de plaguicidas en los alimentos?: <https://www.who.int/features/qa/87/es/>
- OpenFog. (2017). OpenFog Consortium Architecture Working Group. OpenFog Reference Architecture for Fog Computing. USA. [https://site.ieee.org/denver-com/files/2017/06/OpenFog\\_Reference\\_Architecture\\_2\\_09\\_17-FINAL-1.pdf](https://site.ieee.org/denver-com/files/2017/06/OpenFog_Reference_Architecture_2_09_17-FINAL-1.pdf)
- Organización Meteorológica Mundial. (2018). Guía de prácticas climatológicas. Ginebra: METEOTERM.
- Orozco, A. F., Rodríguez, C. D. (2015). Diseño e implementación del prototipo de una estación meteorológica automática portátil, capaz de transmitir datos mediante tecnológica. Pasto : UDENAR.
- Parques Naturales. (2016). Parques naturales. <http://www.parquesnacionales.gov.co/portal/es/parques-nacionales/parque-nacional-natural-sumapaz/>
- Postscapes. (2021). IoT Hardware Guide. Obtenido de postscapes: <https://www.postscapes.com/internet-of-things-hardware/>
- Qorvo. (2020). IOT Controllers. Obtenido de <https://www.qorvo.com/products/iot-controllers>
- Rojas, O. R., Sosa, V., & Ornelas, J. (2012). Oreasting cloud forest in eastern and southern Mexico: conservation insights under future climate change scenarios. Biodiversity and Conservation, 2671-2690.
- Rodríguez, M. D., & León, M. J. (2016). Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica. Guayaquil: Análisis y aplicación de un generador de imanes permanentes para un sistema de energía eólica.
- Rodríguez, N., Armenteras, D., Morales, M., & Romero, M. (2006). Ecosistemas de los andes Colombianos. Bogotá.
- Sánchez, S. A. (2013). Automatización y control del sistema NFT para cultivos hidropónicos. Lima, Universidad Ricardo Palma.

- Sepúlveda, E. (2014). Diseño de un Colector de Energía Piezoeléctrico. Medellín: Universidad Nacional de Colombia.
- Sociedad geográfica de Colombia. (2015). Sociedad geográfica de Colombia. <http://www.sogeocol.com.co/documentos/Paramos.pdf>
- Solis, J. A. (2011). Caracterización Edafoclimática en regiones agrícolas. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Soria, J. A. (2012). Curso de hidroponía básica para principiantes. Barranquilla: Asohofrucol.
- Still, C. J., Foster, P. N., & Schneider, S. H. (2002). Simulating the effects of climate change on tropical montane cloud forests. *Nature*, 608-610.
- Trucíos Caciaño, R., Mojica Guerrero, A. S., Valenzuela Núñez, L. M., & González Barrios, J. L. (2009). Cambio en el uso de suelo en la cuenca del río Sextín. *Tecnociencia Chihuahua*, 121-130.
- Tuwanut, S. K. (2015). A survey on internet of things architecture, protocols, possible applications, security, privacy, real-world implementation and future trends. *IET*, 1-6.
- Twenergy. (2019). ¿Qué es riego por goteo?: <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/como-ahorrar-agua/que-es-el-riego-por-goteo-1708/>
- Universidad Nacional de Colombia. (2015). Proyecto educativo del programa de ingeniería agrícola sede Bogotá. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.
- Valle, D. B. (2014). IoT: tecnologías, usos, tendencias y desarrollo futuro. UoC. <http://openaccess.uoc.edu/webapps/02/bitstream/10609/40044/6/dbliznakoffTFMo115memoria.pdf>
- Vargas, N. (2015). IDEAM. Secretaría de ambiente de Bogotá: [http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/237324/Nelson+Vargas\\_IDEAM.pdf](http://ambientebogota.gov.co/documents/10157/237324/Nelson+Vargas_IDEAM.pdf)
- Vázquez, F. E. (2016). Diseño y simulación de un prototipo de motor-generator magnético de imanes permanentes. Guanajuato: Instituto Politécnico Nacional.
- Vermesan, O. (2009). Internet of Things Strategic Research Roadmap. *Internet of Things Strategic Research Roadmap*, 8-53.
- Zamora, F., Pallares, L., Díaz, Y., & Ferro, R. (2018). Mejora en el sistema de aprendizaje LMS articulado con aplicaciones de IoT. Bogotá: Ediciones Unisinu.

*La agricultura es uno de los sectores de mayor impacto por la emisión y absorción de Co<sub>2</sub>. La deforestación es una consecuencia negativa de las malas prácticas. Por tanto, la implementación de las granjas inteligentes es una alternativa innovadora en la mitigación del efecto del cambio climático y la reducción de la huella de Carbono en los procesos agrícolas.*



*No obstante, para lograrlo es necesario generar energía eléctrica, que no contamine la naturaleza y que permita alimentar todos los elementos constitutivos de las granjas inteligentes que se describen con detalle en sus diferentes capítulos.*

*Este libro aborda diferentes aspectos relacionados con la digitalización del agro al servicio del sector rural y agropecuario, por ser este sector esencial para el desarrollo de Colombia y sienta las bases de las futuras aplicaciones que se pueden implementar.*

ISBN: 978-958-49-4953-0



## Otros títulos de la colección

**Doctorado**  
en Ingeniería  
UNIVERSIDAD DISTRITAL "FRANCISCO JOSÉ DE CALDAS"

**ARQUITECTURAS DE RED NEURO-  
CONVOLUCIONAL PARA  
APLICACIONES DE ROBÓTICA  
ASISTENCIAL**

**DETECCIÓN Y CORRECCIÓN DE  
PROPAGACIONES ANÓMALAS EN  
RADARES METEREOLÓGICOS**

**GESTIÓN DE LA ENERGÍA: EL  
USUARIO DE ENERGÍA COMO  
PARTE ACTIVA DEL SISTEMA**

**GESTIÓN Y CIBERSEGURIDAD PARA  
MICRORREDES ELÉCTRICAS  
RESIDENCIALES**

**INTRODUCCION A LA  
INVESTIGACIÓN SOBRE DESASTRES  
NATURALES Y CIUDADES  
INTELIGENTES**

**RADIACIÓN-MATERIA: GEANT4  
HANDS ON!**

**INVESTIGACIÓN EN INGENIERÍA  
FUNDAMENTADA EN LA GESTIÓN  
DEL CONOCIMIENTO**

**LOS RECURSOS DISTRIBUIDOS DE  
BIOENERGÍA EN COLOMBIA**

**REDES NEURONALES  
CONVOLUCIONALES USANDO  
KERAS Y ACELERANDO CON GPU**