

**“DESARROLLO DEL MODELO FUNCIONAL DE UN SISTEMA DE GENERACIÓN ELÉCTRICA  
QUE APROVECHE LA ENERGÍA CINÉTICA DE LOS RÍOS”**

MANUELA AGUILAR LOPERA

MANUELA MONTOYA ALZATE

**PROYECTO DE GRADO**

**Presentado como requisito para optar al título de:**

**Ingeniero de diseño de producto**

**Asesor:**

ESTEBAN GONZÁLEZ POSADA

Ingeniero de Diseño de Producto

**UNIVERSIDAD EAFIT  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE DISEÑO DE PRODUCTO  
MEDELLÍN  
2010**

Nota de aceptación:

---

---

---

---

---

---

---

Firma del presidente del jurado

---

Firma del jurado

---

Firma del jurado

Medellín, Octubre 2010

## AGRADECIMIENTOS

Las autoras de este proyecto agradecen a todas las personas que de una u otra manera aportaron a la realización de este proyecto, desde su experiencia, su conocimiento, su apoyo y su enseñanza:

Nuestras familias que nos apoyaron en todo momento y creyeron siempre en el logro exitoso del proyecto.

A la Empresa De Lápices a Cohetes por su tiempo y conocimiento, por confiar en nosotras para el desarrollo de este proyecto.

Esteban González, Ingeniero de Diseño de Producto y asesor de este proyecto, por participación activa y el aporte de su conocimiento y experiencia.

José Fernando Martínez Ingeniero Mecánico y co-asesor de este proyecto, por sus conocimientos y apoyo a nivel metodológico.

Fernando Montoya, por creer en el proyecto y por el aporte de sus conocimientos en área eléctrica.

Santiago Orrego, Ingeniero Mecánico, por su tiempo y conocimientos en el área de mecánica de fluidos.

Juan Carlos Toro, Ingeniero electricista, por los aportes brindado desde su experiencia en el diseño de turbinas para la iniciación del proyecto.

Johan Alexander Gil, por creer en el proyecto, por su tiempo y apoyo incondicional.

Laboratorio de máquinas y herramientas, hidráulica, mecatrónica y física de la Universidad EAFIT y cada una de las personas que aportaron a la realización de los modelos y las pruebas.

A todas las personas y empresas que de alguna u otra manera aportaron a la realización de este proyecto.

## LISTA DE ANEXOS

**Anexo A.**

Análisis del estado del arte

**Anexo B.**

Análisis del contexto

**Anexo C.**

Consulta con expertos y entidades externas

**Anexo D**

Sesiones de lluvia de Ideas

**Anexo E.**

Método Analítico para estudio de turbinas hidráulicas

**Anexo F.**

Método Experimental

**Anexo G.**

Generadores Eléctricos

**Anexo H.**

Sistemas de transmisión

**Anexo I.**

Síntesis Formal a nivel de sistema

**Anexo J.**

Simulaciones Numéricas.

**Anexo K.**

Manual de Cálculo de transmisiones

**Anexo L.**

Síntesis funcional

**Anexo M.**

Cálculo de flotabilidad de los pontones.

**Anexo N.**

Planos técnicos para el producto

## CONTENIDO

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....</b>            | <b>14</b> |
| 1.1 ANTECEDENTES Y CONTEXTO .....                   | 14        |
| 1.2 JUSTIFICACIÓN.....                              | 19        |
| 1.2.1 Social.....                                   | 19        |
| 1.2.2 Económico .....                               | 20        |
| 1.2.3 Tecnológica .....                             | 20        |
| 1.2.4 Ambiental .....                               | 21        |
| 1.2.5 Académica .....                               | 21        |
| 1.2.6 Personal .....                                | 22        |
| 1.3 OBJETIVOS.....                                  | 22        |
| 1.3.1 Objetivo general .....                        | 22        |
| 1.3.2 Objetivos específicos .....                   | 23        |
| 1.4 ALCANCE.....                                    | 23        |
| 1.4.1 Limitaciones Económicas.....                  | 23        |
| 1.4.2 Evaluación de la viabilidad técnica .....     | 24        |
| 1.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE PRODUCTO .....    | 24        |
| <b>2. METODOLOGÍA PROYECTO DE GRADO .....</b>       | <b>26</b> |
| 2.1 PROCEDIMIENTO.....                              | 28        |
| 2.1.1 Fase 1: Explorar .....                        | 28        |
| 2.1.2 Fase 2: Desarrollar .....                     | 29        |
| 2.1.3 Fase 3: Implementar .....                     | 30        |
| 2.2 MÉTODOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS .....         | 31        |
| 2.2.1 Fase 1: Explorar .....                        | 31        |
| 2.2.2 Fase 2: Desarrollar .....                     | 40        |
| 2.2.3 Fase 3: implementar .....                     | 49        |
| <b>3. RESULTADOS .....</b>                          | <b>51</b> |
| 3.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO .....                  | 51        |
| 3.2 ANÁLISIS HIDROLÓGICO .....                      | 52        |
| 3.3 ESCENARIO DE CONSUMO .....                      | 53        |
| 3.4 MODELOS ANALÍTICOS BÁSICOS DEL SISTEMA .....    | 54        |
| 3.5 PRUEBAS DE LABORATORIO 1 (MODELOS SIMPLES)..... | 55        |
| 3.6 MATRIZ DE EVALUACIÓN .....                      | 56        |
| 3.7 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO .....                | 57        |
| 3.8 ANÁLISIS FUNCIONAL .....                        | 58        |
| 3.9 MATRIZ MORFOLÓGICA .....                        | 59        |
| 3.10 CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL SISTEMA ..... | 60        |
| 3.11 DISEÑO DEL ROTOR .....                         | 61        |

|           |   |            |
|-----------|---|------------|
| 3.11.1    | Modelo analítico del rotor .....  | 61         |
| 3.11.2    | Diseño de la pala .....   | 71         |
| 3.11.3    | Modelo funcional del rotor .....  | 77         |
| 3.11.4    | Pruebas del rotor diseñado- validación del modelo analítico .....                     | 77         |
| 3.12      | <b>SELECCIÓN DEL GENERADOR</b> .....  | 79         |
| 3.12.1    | Características principales(Windblue power, 2008): .....                              | 80         |
| 3.13      | <b>SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LA TRANSMISIÓN</b> .....                                    | 81         |
| 3.13.1    | Cálculo de la transmisión .....   | 83         |
| 3.14      | <b>DISEÑO DE LOS PONTONES</b> .....   | 85         |
| 3.15      | <b>ARQUITECTURA DE PRODUCTO</b> .....   | 86         |
| 3.16      | <b>ANÁLISIS FORMAL</b> .....  | 88         |
| 3.17      | <b>DISEÑO DEL SISTEMA DE SOPORTE</b> .....  | 90         |
| 3.17.1    | Chasis del sistema .....  | 90         |
| 3.17.2    | Cálculo de la flotabilidad.....   | 92         |
| 3.18      | <b>DISEÑO DEL SISTEMA DE ANCLAJE</b> .....  | 94         |
| 3.19      | <b>DISEÑO DE LA ESTACIÓN DE CONTROL</b> .....   | 97         |
| 3.20      | <b>MODELO 3D DEL SISTEMA</b> .....  | 99         |
| 3.21      | <b>FABRICACIÓN DEL MODELO PARA PRUEBAS</b> .....                                      | 99         |
| 3.22      | <b>ESTUDIO EXPERIMENTAL -PRUEBAS DE POTENCIA ELÉCTRICA</b> .....                      | 100        |
| 4.1       | <b>SISTEMA DE GENERACIÓN</b> .....  | 103        |
| 4.2       | <b>SISTEMA DE CONTROL</b> .....   | 106        |
| 4.3       | <b>SISTEMA DE ANCLAJE</b> .....   | 107        |
| 4.4       | <b>FICHA TÉCNICA DEL SISTEMA HIDROKINETICO DE GENERACIÓN ELECTRICA – RHIIOG</b> ..... | 108        |
| 4.4.1.    | SISTEMAS DE SUJECIÓN .....  | 108        |
| 4.5       | <b>PÓSTER 1: DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO</b> .....                                       | 109        |
| 4.6       | <b>PÓSTER 2: FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA</b> .....                                     | 110        |
| 4.7       | <b>PÓSTER 3: INSTALACIÓN DEL SISTEMA</b> .....  | 111        |
| <b>5.</b> | <b>EVALUACIÓN TECNICO –ECONÓMICA</b> .....  | <b>112</b> |
| 5.1       | <i>Evaluación técnica</i> .....   | 112        |
| 5.2       | <i>Evaluación económica</i> .....   | 116        |
| 5.2.1     | Sistemas similares (competidores en el mercado) .....                                 | 120        |
| 5.2.2     | Sistemas sustitutos .....   | 121        |
| 5.3       | <b>IMPACTO AMBIENTAL</b> .....  | 125        |
| <b>6.</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b> .....   | <b>127</b> |
| <b>7.</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....   | <b>134</b> |

## LISTA DE TABLAS

|  |    |
|--|----|
| Tabla 1. Demanda energética.....   | 15 |
| Tabla 2. Plantas generadoras de electricidad (productos sustitutos)..... | 15 |
| Tabla 3. Comparación de fuentes de energía al generar 5 kVA. ....        | 17 |
| Tabla 4. Clasificación de PCH. ....                                      | 17 |
| Tabla 5. Especificaciones para el producto. ....                         | 25 |
| Tabla 6. Matriz de correlación de objetivos. ....                        | 27 |
| Tabla 7. Productos similares.....  | 32 |
| Tabla 8. Guía de observación. ....                                       | 35 |
| Tabla 9. Modelo teórico de una turbina de acción. ....                   | 37 |
| Tabla 10. Modelo teórico de una turbina de reacción. ....                | 38 |
| Tabla 11. Matriz de componentes por diseñar o seleccionar. ....          | 43 |
| Tabla 12. Estado hidrológico de algunos ríos de Antioquia .....          | 52 |
| Tabla 13. Escenario de consumo de energía en las horas del día. ....     | 53 |
| Tabla 14. Demanda energética.....  | 53 |
| Tabla 15. Potencia en W que debe entregar el sistema.....                | 54 |
| Tabla 16. Análisis dimensional rotor de acción.....                      | 54 |
| Tabla 17. Análisis dimensional rotor de reacción.....                    | 54 |
| Tabla 18. Valores teóricos y experimentales de la prueba #1 .....        | 56 |
| Tabla 19. Descripción de los criterios de evaluación. ....               | 56 |
| Tabla 20. Matriz de evaluación.....                                      | 57 |
| Tabla 21. Especificaciones en orden de importancia .....                 | 57 |
| Tabla 22. Riesgos por condiciones de operación para el sistema. ....     | 61 |
| Tabla 23. Valores de entrada del modelo analítico.....                   | 65 |
| Tabla 24. Dimensiones del rotor. ....                                    | 66 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 25. Estimación de la longitud del rotor. ....                                       | 66  |
| Tabla 26. Eficiencias del sistema. ....   | 67  |
| Tabla 27. Análisis dimensional del rotor en movimiento. ....                              | 68  |
| Tabla 28. Prueba #2- Número de palas .....  | 72  |
| Tabla 29. Modelos CAD para simulaciones CAE .....   | 73  |
| Tabla 30. Resultados de las simulaciones. ....  | 74  |
| Tabla 31. Datos experimentales Prueba de campo # 3 .....                                  | 78  |
| Tabla 32. Datos de entrada- modelo analítico .....  | 78  |
| Tabla 33. Validación del modelo teórico .....   | 78  |
| Tabla 34. Parámetros del rotor diseñado.....  | 79  |
| Tabla 35. Resultados de la prueba eléctrica sobre generador final. ....                   | 81  |
| Tabla 36. Cálculo del torque para la potencia y las rpm del generador. ....               | 81  |
| Tabla 37. Cálculo de las rpm y torque del rotor, con un factor de multiplicación de 20.82 |     |
| Tabla 38. Cálculo del peso total del sistema. ....  | 92  |
| Tabla 39. Cálculo de flotabilidad. ....   | 93  |
| Tabla 40. Escenario de fuerzas. ....  | 95  |
| Tabla 41. Secciones analizadas. ....  | 95  |
| Tabla 42. Características de las opciones simuladas.....                                  | 96  |
| Tabla 43. Resultados de las reacciones. ....  | 96  |
| Tabla 44. Resultados de los desplazamientos. ....   | 96  |
| Tabla 45. Esfuerzo en la placa del poste. ....  | 97  |
| Tabla 46. Parámetros iniciales del motor y reductor. ....                                 | 101 |
| Tabla 47. Mediciones de la transmisión.....   | 101 |
| Tabla 48. Mediciones del rotor en operación. ....   | 102 |
| Tabla 49. Mediciones del generador en operación.....                                      | 102 |

|  |     |
|--|-----|
| Tabla 50. Subsistema: sistema flotante.....                                      | 104 |
| Tabla 51. Subensamble: rotor. ....   | 105 |
| Tabla 52. Subensamble: Chasis. ....  | 105 |
| Tabla 53. Subsistema: Sistema de control.....                                    | 106 |
| Tabla 54. Subsistema: Sistema de anclaje.....                                    | 107 |
| Tabla 6. Ficha técnica del sistema. ....   | 108 |
| Tabla 56. Matriz de los componentes del sistema .....                            | 112 |
| Tabla 57. Valores de potencia .....  | 115 |
| Tabla 58. Escenario de consumo anual. ....                                       | 116 |
| Tabla 59. Potencia generada .....  | 117 |
| Tabla 60. Valor presente neto para diferentes periodos de utilización.....       | 117 |
| Tabla 61. Valor presente neto para cada periodo.....                             | 118 |
| Tabla 62. Costo W instalado y costo del kW de operación - RHIOG .....            | 119 |
| Tabla 63. Comparación entre sistemas similares .....                             | 120 |
| Tabla 64. Especificaciones de planta eléctrica a gasolina .....                  | 122 |
| Tabla 65. Flujo de caja de utilización de planta eléctrica.....                  | 123 |
| Tabla 66. Costo W instalado y costo del kW de operación – Planta eléctrica. .... | 123 |
| Tabla 67. Normatividad Ambiental Colombiana relacionada con el proyecto. ....    | 125 |

## LISTA DE ILUSTRACIONES

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 1. Metodología implementada.....                                  | 26 |
| Ilustración 2. Fase Explorar.....   | 28 |
| Ilustración 3. Fase Desarrollar .....   | 29 |
| Ilustración 4. Fase de implementación.....                                    | 30 |
| Ilustración 5. Matriz del estado del arte .....                               | 31 |
| Ilustración 6. Clasificación de las turbinas hidrocinéticas.....              | 33 |
| Ilustración 7. Clasificación Turbinas Hidráulicas .....                       | 34 |
| Ilustración 8. Situación de habitantes de ZNI de Santa Fe de Antioquia. ....  | 36 |
| Ilustración 9. Pruebas de laboratorio # 1 .....                               | 38 |
| Ilustración 10. Caja negra. ....  | 41 |
| Ilustración 11. Estructura funcional .....                                    | 41 |
| Ilustración 12. Fotografía lluvia de ideas.....                               | 42 |
| Ilustración 13. Ejemplo simulación CAE - Ansys.....                           | 45 |
| Ilustración 14. Fotografías del freno Proney construido.....                  | 46 |
| Ilustración 15. Prueba # 3 – Río Buey .....                                   | 46 |
| Ilustración 16. Definición de línea de flotabilidad – Volumen sumergido ..... | 48 |
| Ilustración 17. Condiciones de frontera para el análisis. ....                | 48 |
| Ilustración 18. Fotografía modelo funcional. ....                             | 49 |
| Ilustración 19. Extracto de Matriz de evaluación técnica .....                | 50 |
| Ilustración 20. Síntesis gráfica de los resultados.....                       | 51 |
| Ilustración 21. Análisis del contexto.....                                    | 52 |
| Ilustración 22. Escenario de consumo de energía diario. ....                  | 53 |
| Ilustración 23. Prueba 1 – Modelo A y Modelo B.....                           | 55 |
| Ilustración 24. Prueba 1 – Modelo A .....                                     | 55 |

|   |    |
|---|----|
| Ilustración 25. Prueba 1 – Modelo B .....                             | 55 |
| Ilustración 26. Estructura Funcional.....                             | 58 |
| Ilustración 27. Estructura de componentes. ....                       | 59 |
| Ilustración 28. Matriz morfológica. ....                              | 59 |
| Ilustración 30. Triangulo de velocidades del rotor diseñado .....     | 62 |
| Ilustración 31. Potencia en el rotor .....                            | 63 |
| Ilustración 32. Fragmento de la estructura de componentes.....        | 63 |
| Ilustración 33. Dimensiones del rotor .....                           | 65 |
| Ilustración 34. Estructura funcional con expresiones analíticas. .... | 71 |
| Ilustración 35. Prueba #2. Palas del rotor de acción.....             | 71 |
| Ilustración 36. Modelo del volumen de control .....                   | 73 |
| Ilustración 37. Imágenes de Simulación CAE.....                       | 75 |
| Ilustración 38. Perfil de la pala .....                               | 75 |
| Ilustración 39. Vista en explosión del rotor.....                     | 76 |
| Ilustración 40. Diseño final del rotor.....                           | 76 |
| Ilustración 41. Modelo funcional del rotor. ....                      | 77 |
| Ilustración 42. Curvas de potencia del rotor.....                     | 79 |
| Ilustración 43. Alternador modificado DC-520.....                     | 80 |
| Ilustración 44. Tren de poleas. ....                                  | 83 |
| Ilustración 45. Transmisión elegida-Tren de poleas.....               | 84 |
| Ilustración 46. Sketch de los pontones.....                           | 86 |
| Ilustración 47. Collage de arquitecturas de producto.....             | 87 |
| Ilustración 48. Collage de la emoción.....                            | 88 |
| Ilustración 49. Collages: Referente formal-Usabilidad.....            | 89 |
| Ilustración 50. Exploración formal - Colores y texturas .....         | 89 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 51. Alternativa final. ....   | 90  |
| Ilustración 52. Chasis del sistema.....   | 91  |
| Ilustración 53. Deformación y esfuerzo máximo.....  | 91  |
| Ilustración 54. Modelo 3d diseño del pontón .....   | 92  |
| Ilustración 55. Línea de flotabilidad. ....   | 93  |
| Ilustración 56. Cálculo del volumen sumergido. ....   | 93  |
| Ilustración 57. Modelación 3D sistema de anclaje.....                                       | 94  |
| Ilustración 58. Análisis estructural. ....  | 95  |
| Ilustración 59. Esquema de la estación de control. Ilustración 60.Estación de control. .... | 98  |
| Ilustración 61. Alternativa final. ....   | 99  |
| Ilustración 62. Fotografía modelo funcional. ....   | 99  |
| Ilustración 63. Montaje de la prueba del generador. ....                                    | 100 |
| Ilustración 64. Sub-sistemas de RHIOG .....   | 103 |
| Ilustración 65. Vista en explosión y dimensiones generales del sistema flotante.....        | 104 |
| Ilustración 66. Vista en explosión y dimensiones generales del rotor.....                   | 105 |
| Ilustración 67. Vista en explosión y dimensiones generales del Chasis.....                  | 105 |
| Ilustración 68. Vista en explosión y dimensiones generales del Sistema de control.....      | 106 |
| Ilustración 69. Vista en explosión y dimensiones generales del Sistema de Anclaje.....      | 107 |
| Ilustración 70. Sistemas de sujeción.....   | 108 |
| Ilustración 71. Poster descripción del sistema. ....  | 109 |
| Ilustración 72. Poster funcionamiento del sistema.....                                      | 110 |
| Ilustración 73.Poster instalación del sistema. ....   | 111 |
| Ilustración 74. Porcentaje de cada componente sobre del costo total .....                   | 115 |
| Ilustración 75. Valores de potencia- transformación de energía.....                         | 116 |
| Ilustración 76. Valor presente neto acumulado -RHIOG.....                                   | 118 |

|   |     |
|---|-----|
| Ilustración 77. Valor por consumo diario -RHIOG .....       | 120 |
| Ilustración 78. Comparación entre productos similares ..... | 121 |
| Ilustración 79. Planta eléctrica Vs RHIOG.....              | 124 |

## 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

### 1.1 ANTECEDENTES Y CONTEXTO

En Colombia el 60% del territorio está conformado por zonas no interconectadas (ZNI). El artículo 11 de la Ley 143 de 1994 define las zonas no interconectadas como el “área geográfica donde no se presta servicio público de electricidad a través del Sistema Interconectado Nacional”. Dichas zonas, en las cuales reside el 20% de la población nacional, están conformadas por poblaciones aisladas geográficamente de los asentamientos urbanos más importantes y no disponen de un servicio de suministro de energía confiable o carecen de éste (Jaramillo & Raigosa, 2008).

Las principales razones de la existencia de zonas no interconectadas en el territorio nacional son la dificultad de conexión debido a la ubicación geográfica de las mismas, la presencia de entes al margen de la ley y la falta de recursos del estado (CREG , 2004). Además, la densidad poblacional en estas zonas es muy baja y el consumo de energía se da en pequeñas escalas, de manera que el suministro de energía mediante el sistema interconectado no resulta económicamente viable (Maldonado, 2005).

La mayor parte de la energía requerida en las ZNI es consumida en los hogares, siendo menor la participación de usos comerciales, industriales o institucionales (Ministerio del Medio ambiente, 2002). En los hogares se requiere energía para satisfacer necesidades tales como la cocción, iluminación, conservación de alimentos, recreación y comodidades (comunicación, conectividad y entretenimiento) (Dávila, Vilar, Villanueva, & Quiroz, 2010).

Actualmente en las ZNI las necesidades de cocción e iluminación se han resuelto a partir del uso de leña, velas, mecheros y linternas de baterías (Jaramillo & Raigosa, 2008). Sin embargo las necesidades de conservación de alimentos, comunicación y conectividad sólo

pueden ser satisfechas por medio de energía eléctrica, siendo ésta la fuente para recargar baterías de celulares (principal medio de comunicación) y conectar televisores, radios y computadores (Dávila, Vilar, Villanueva, & Quiroz, 2010).

Para la satisfacción de las anteriores necesidades se requieren, de acuerdo con el escenario planteado en la tabla 1 y que corresponde al consumo en un hogar promedio de una ZNI, aproximadamente 270 W.

**Tabla 1.** Demanda energética.

| Aparato      | Consumo en potencia (W) | Tiempo de consumo (h) | W/día | kW/día | kW/mes |
|--------------|-------------------------|-----------------------|-------|--------|--------|
| TV           | 100                     | 6                     | 600   | 0,6    | 18     |
| Radio        | 50                      | 10                    | 500   | 0,5    | 15     |
| 2 Bombillos  | 120                     | 4                     | 480   | 0,48   | 14,4   |
| Celular      | 2                       | 4                     | 8     | 0,008  | 0,24   |
| <b>Total</b> | <b>272</b>              |                       | 1588  | 1,588  | 47,64  |

**Fuente.** Elaboración Propia.

Sin embargo, en estas zonas la disponibilidad de equipos para suministro de energía con estos fines es bastante baja, debido a problemas técnicos y en especial económicos (bajos recursos). En ocasiones se utilizan de plantas generadoras de electricidad, para las cuales se transporta diesel o gasolina, con costos elevados de inversión inicial (Ver Tabla 2) y mantenimiento, razón por la cual sólo unos pocos hacen uso de esto (Jaramillo & Raigosa, 2008).

**Tabla 2.** Plantas generadoras de electricidad (productos sustitutos)

| PRODUCTOS SUSTITUTOS                 |                     |                     |                         |           |                |
|--------------------------------------|---------------------|---------------------|-------------------------|-----------|----------------|
| MODELO                               | POTENCIA NOMINAL(W) | CONSUMO COMB. (l/h) | DIMENSIONES LxANxAL(mm) | PESO (kg) | Precio (pesos) |
| <b>Plantas eléctricas a gasolina</b> |                     |                     |                         |           |                |
| ET950                                | 800                 | 0.84                | 366x308x376             | 20,3      | 862.000        |
| EF1000IS                             | 800                 | 0.58                | 450x240x380             | 12,7      | 3'320.000      |
| EF1600D                              | 1400                | 0.89                | 510x415x425             | 38        | 3'970.000      |
| ***EF2400IS                          | 2000                | 1.2                 | 527x419x461             | 32        | 4'680.000      |
| <b>Plantas eléctricas a Diesel</b>   |                     |                     |                         |           |                |
| HS4500                               | 4,5                 | 1,8                 | 70x50x52                | 65        | -              |
| HS4500E *                            | 4,5                 | 1,8                 | 70x50x52                | 66        | -              |

**Fuente.** Eduardoño, 2009

Considerando que la cobertura de energía es un factor fundamental para potenciar el desarrollo del país (Boletín informativo: EPM, 2008), tanto el sector público como privado han desarrollado diversas estrategias para el mejoramiento de las condiciones actuales. Estas estrategias pueden visualizarse en el Plan Energético Nacional (PEN) 2006-2025 y el Plan Estratégico Visión Colombia 2019 y 2032.

Aparte de los anteriores planes, se han creado organismos públicos que velan y regulan la planeación, evaluación y ejecución de proyectos relacionados con las políticas de interconexión eléctrica tales como el Fondo de Apoyo Financiero para la Energización de las Zonas No Interconectadas (FAZNI); el Instituto de Planificación y promoción de Soluciones Energéticas para las zonas no Interconectadas (IPSE); la Unidad de Planeación Minero Energética (UPME) y la Comisión de regulación de energía y gas (CREG).

Así mismo, existen iniciativas del sector privado a nivel regional, tales como el Plan de Electrificación Rural “Antioquia Iluminada”, el cual posibilitará incrementar de manera sustancial la cobertura del servicio de energía eléctrica en el Departamento, de un 79.9 por ciento, a un 94.6 por ciento al cierre de 2011 (Boletín informativo: EPM, 2008). No en vano, para mayo de 2010, 11.325 viviendas rurales fueron conectadas al sistema eléctrico y cerca de 43.000 familias fueron vinculadas al sistema energía prepago (EPM, 2010).

Para el caso de Antioquia, a diciembre de 2007, el porcentaje de cobertura rural era del 80 por ciento. Según los estimativos a 2008, existen cerca de 60 mil viviendas rurales sin electrificar en el Departamento, siendo el Bajo Cauca, Urabá, Norte y Magdalena Medio las que presentan una menor cobertura (Boletín informativo: EPM, 2008), así como bajos índices de condiciones de vida (SIGOT, 2009).

De esta manera, existen altas posibilidades de satisfacer los requerimientos de energía eléctrica en las ZNI en la medida que se utilicen eficientemente los recursos renovables de la zona, tales como: energía solar, eólica, térmica, hidráulica, entre otras. (Jaramillo &

Raigosa, 2008). En el caso de las ZNI de Antioquia el aprovechamiento de los recursos hídricos presenta ventajas sobre los demás recursos, dentro las principales razones se encuentran: el alto índice de recursos hídricos en las zona (CORANTIOQUIA, 2009) , menor costo de kilovatio instalado frente a otros recursos (Ver Tabla 3), experiencia en la región en generación hidroeléctrica (PLANEA, 2010) y alto impacto ambiental positivo en la medida que se motiva la preservación de la cuenca (CORANTIOQUIA, 2009).

**Tabla 3.** Comparación de fuentes de energía al generar 5 kVA.

| <b>FUENTE ALTERNATIVA</b>       | <b>SOLAR</b>                     | <b>EÓLICA</b>                            | <b>TURBINA HYDROVOLTS</b>          |
|---------------------------------|----------------------------------|--|------------------------------------|
| <b>Costo (USD/kW instalado)</b> | \$ 9 - \$10                      | \$ 5 - \$ 6                              | \$ 1 - \$ 2                        |
| <b>Potencia de Salida</b>       | 720 (5kWh x 6 hrs x 24 días/mes) | 840 (12 mph @4 kW x 7 hrs x 30 días/mes) | 3360 (5kWh x 24 hrs x 28 días/mes) |
| <b>Tiempo de Instalación</b>    | 1 - 2 semanas                    | 1 semana                                 | 2 horas                            |

**Fuente.** Hydrovolts 2009.

Con relación al aprovechamiento de recursos renovables existen tendencias tales como la generación de pequeñas potencias, descentralización, autonomía del sistema, utilización baja o nula de combustible y cero emisiones. Así mismo, en cuanto a fuentes hidroenergéticas, se ha venido conociendo términos como: pequeñas centrales hidroeléctricas (PCH), nano generación hidroeléctrica (NanoGHE) (ver Tabla 4),, tecnologías de corriente de agua (WCT) (Verdant Power Canada, 2006), Turbinas hidrocinéticas (THC) (Maldonado, 2005)

**Tabla 4.** Clasificación de PCH.

| <b>Tipo de proyecto</b> | <b>Potencia (kW)</b> | <b>Costos de inversión (USD/kW)</b> | <b>Componentes principales</b>                           | <b>Usos- Aplicaciones</b>  |
|-------------------------|----------------------|-------------------------------------|--|--|
| <b>Nano turbinas</b>    | menos de 1           | 3000-5000                           | Turbinas, generadores eléctricos                         | Para uso familiar y aplicaciones mecánicas   |
| <b>Micro-hidros</b>     | 1-100                | 3000-5000                           | Turbinas, regulador de velocidad, generadores eléctricos | Para una red eléctrica comunal (sistema aislado)   |
| <b>Mini-hidro</b>       | 100 - 1000           | 1500-2000                           | Obras de derivación Canal, Embalse,                      | Para varia comunidades dentro de un radio de 10 a 40 km, y/o conexión a la red nacional. |

|                    |          |   |  |
|--------------------|----------|---|--|
| Pequeñas centrales | 1 - 5 MW | vertedor y descarga fondo, sala de máquinas, equipo electromecánico, transmisión. | Para una pequeña ciudad y comunidades aledañas, además de conexión a la red. |
|--------------------|----------|---|--|

**Fuente.** Manuales sobre energía renovable: Hidráulica a pequeña escala, 2002

La nano-pico generación hidroeléctrica (NanoGHE) hace referencia sistemas descentralizados que generan energía eléctrica en pequeñas potencias, no necesita de grandes obras civiles ni mecánicas para funcionar, lo cual trae grandes beneficios en cuanto a la reducción de costos frente a otras formas convencionales para generar electricidad.

Las tecnologías hidrocínicas (THC) convierten energía cinética de los flujos de agua en energía eléctrica, potencia mecánica u otras formas de energía; no requieren de grandes obras civiles ya que utilizan la energía cinética disponible en canales de flujos de agua y no necesitan cambios en la altura de agua para operar. Generalmente, en las TCH se hacen aplicaciones de rotores como el caso de las turbinas eólicas sumergidas, las ruedas hidráulicas, la turbina de río entre otras (Maldonado, Francisco 2005).

Entre las organizaciones y universidades que han hecho avances significativos en el desarrollo de tecnologías hidrocínicas se resaltan: Soluciones Prácticas ITDG (Perú), Hydrovolts (Estados Unidos de América), Verdant Power (Canadá), y un caso de aplicación para ZNI: “Cálculo y diseño de un prototipo de una turbina de río” desarrollada por Francisco Maldonado Quispe, Universidad Nacional Mayor de San Marcos (Lima-Perú, 2005).

Es así como la implementación de las tecnologías hidrocínicas y la nano-generación de energía eléctrica constituyen alternativas para el desarrollo de las zonas no interconectada. Esto debido a que se ajustan a los requerimientos de generación de

energía eléctrica particulares de las ZNI tales como: el aprovechamiento de los recursos disponibles, los bajos costos de operación, la baja demanda de energía, la baja complejidad de las obras civiles requeridas, entre otras.

En el contexto nacional, diferentes entidades como la Universidad EAFIT, la Universidad de Antioquia, la Universidad del Valle, la Universidad Nacional, entre otras, vienen adelantando investigaciones en diferentes campos relacionados con sistemas alternativos de generación de energía, más específicamente en máquinas reversibles aplicadas a micro centrales hidroeléctricas.

En el caso de la Universidad EAFIT, en el programa de Ingeniería de Diseño de Producto se han desarrollado proyectos de grado relacionados con la satisfacción de necesidades presentes en zonas no interconectadas, tales como: SICO: Sistema de cocción y calefacción para hogares ubicados en zonas aisladas sin conexión a la red eléctrica, desarrollado por Marcela Jaramillo y Juliana Raigosa en el 2008, y “Estudio de factibilidad para la apropiación tecnológica, dentro del mercado colombiano, de un aerogenerador de 400 W” realizado por Carolina Duque, Luisa Macía y Catalina Peláez en el 2009.

## **1.2 JUSTIFICACIÓN**

### **1.2.1 Social**

La imposibilidad del acceso a la energía eléctrica, por parte que un porcentaje representativo de la población colombiana hace que este se considere como un problema de impacto social para el país. Como se mencionara en los antecedentes, si bien el servicio de energía no representa la única solución para el desarrollo, si constituye un factor fundamental para apoyar otras responsabilidades del Estado como la salud y la educación. Por esta razón existe una gran oportunidad en el desarrollo de productos que mejoren la

calidad de vida de los habitantes de las zonas no interconectadas y disminuyan la problemática social que implica la ausencia o deficiencia del servicio de energía eléctrica.

Asimismo, es un hecho que las necesidades de comunicación, conectividad y entretenimiento hacen parte del desarrollo personal y de la comunidad, y éstas requieren energía eléctrica para realizarse. Esto evidencia una fuerte necesidad de crear una solución de generación de energía eléctrica que les permita a las personas ubicadas en las ZNI tener acceso a la información por medio de la televisión e internet y poder comunicarse.

Por otro lado, al desarrollo de este tipo de productos contribuyen además a las problemáticas de salud porque permiten la posibilidad de conservación de alimentos y medicinas, así como la iluminación de espacios para evitar accidentes y permitir el cuidado personal.

### **1.2.2 Económico**

De acuerdo con los planes de desarrollo y las políticas de empresas generadoras y distribuidoras consultadas, existe un interés por parte de entidades públicas y privadas en hacer inversiones que promuevan soluciones energéticas para las ZNI. Por esta razón el desarrollo de sistemas de microgeneración eléctrica en las ZNI cuenta con el apoyo económico de estas entidades para quienes es conveniente la creación de soluciones energéticas a las cuales puedan tener acceso el mayor número de personas al menor costo posible.

### **1.2.3 Tecnológica**

En el contexto internacional se ha demostrado que es posible generar energía a partir de un fluido en movimiento, además siendo conscientes de los altos recursos hídricos con los que cuenta el departamento de Antioquia, se hace necesario investigar posibles soluciones para aprovechar la energía cinética de los ríos, cuya implementación sea

factible en el contexto nacional por medio de la adecuación de componentes comerciales, teniendo en cuenta factores críticos relacionados tales como bajo costo y mantenimiento.

Como se reportó en los antecedentes, este problema ya ha sido abordado en otros países por compañías e instituciones académicas. En los proyectos presentados es posible identificar ventajas como la alta tecnología y alta inversión en investigación y desarrollo requeridos. Sin embargo las condiciones de desarrollo y aplicación de los resultados obtenidos difieren de las colombianas, por esta razón la importación de estos equipos es poco factible ya que usualmente no se ajustan a los requerimientos locales y son de difícil mantenimiento, haciendo que la solución sea costosa e ineficiente. Por esto, se hace necesario desarrollar una apropiación tecnológica, en la cual se aprovechen las investigaciones y adelantos realizados en otros países, con el fin de adecuar componentes comerciales que se ajusten a la situación específica de nuestra región, disminuyendo los costos del producto, prolongando su operación y facilitando su mantenimiento.

#### **1.2.4 Ambiental**

Tal como se señaló en los antecedentes, el aprovechamiento de los recursos hídricos para generar energía en pequeña escala presenta un alto impacto ambiental positivo que se motiva la preservación de la cuenca. De esta manera el desarrollo de un proyecto que promueva el cuidado del medio ambiente a la vez que genera bienestar para la comunidad, va de la mano del concepto de diseño sostenible asociado al desarrollo económico y social que no afecta al medio ambiente.

#### **1.2.5 Académica**

Los recursos humanos y físicos que brinda la Universidad EAFIT, habilita a sus estudiantes para responder al auge mundial de desarrollo de proyectos que aporten al crecimiento del

país en términos de progreso social y tecnológico. Además “La Universidad EAFIT tiene la Misión de formar personas comprometidas con el desarrollo integral de su comunidad, por medio de programas de pregrado y de posgrado, dentro de un ambiente de pluralismo ideológico y de excelencia académica, competentes internacionalmente en sus áreas de conocimiento”. De acuerdo con lo anterior, es claro que una manera de contribuir al desarrollo de la comunidad es dando solución al problema de no interconexión desarrollando un producto que permita el acceso al servicio de energía eléctrica.

#### **1.2.6 Personal**

El desarrollo de este proyecto significa un reto personal, por medio del cual se busca satisfacer una necesidad latente de no interconexión. Este reto requiere la exploración e integración de nuevas áreas del conocimiento en la búsqueda de una solución práctica que aporte al desarrollo social y tecnológico del país. Por esta razón es de gran motivación aspirar al título de ingenieras de diseño de producto, mediante el desarrollo de este proyecto en el que se aplique el conocimiento adquirido en estos años de estudio, así mismo se evidencie el interés de crear productos que contribuyan a la sociedad.

### **1.3 OBJETIVOS**

#### **1.3.1 Objetivo general**

Diseñar el modelo funcional de un sistema que permita aprovechar la energía cinética de los ríos, con el fin de evaluar la viabilidad técnica de utilizar este sistema para satisfacer las demandas de energía eléctrica básicas de un hogar ubicado en una zona no interconectada.

### 1.3.2 Objetivos específicos

1. Validar las especificaciones del producto, por medio de una investigación de campo en la que se considere opiniones de los interesados en el proyecto así como aspectos técnicos relacionados con el diseño del sistema.
2. Realizar el diseño conceptual del sistema, para identificar los componentes y sus relaciones.
3. Desarrollar modelos analíticos, virtuales y físicos que permitan seleccionar y detallar los componentes.
4. Construir un modelo funcional para realizar pruebas de campo y evaluar técnicamente el diseño del sistema.

## 1.4 ALCANCE

El proyecto culminará con la entrega del informe del proceso de diseño y el desarrollo de un modelo funcional, con el cual se evaluará técnicamente el diseño del sistema.

El pilar del proyecto es demostrar la viabilidad técnica de desarrollar actualmente el sistema propuesto en el medio local, por tal motivo es necesario aclarar la definición de las limitaciones: económicas y técnicas.

### 1.4.1 Limitaciones Económicas

- El modelo funcional tiene restricciones económicas, dado que es un proyecto académico financiado por los estudiantes, sin apoyo de patrocinadores.
- El valor máximo del modelo funcional no podrá exceder 2.000.000 de pesos.
- Relación costo beneficio: el modelo funcional permitirá estimar la relación costo-beneficio del sistema, mediante la relación entre la potencia entregada y el costo total del mismo. Esta debe ser adecuada para el usuario final.

#### **1.4.2 Evaluación de la viabilidad técnica**

La evaluación de la viabilidad técnica se llevará a cabo mediante el cálculo de los siguientes parámetros:

- Costo de materiales y procesos de manufactura: listado con los costos de cada componente o sub-componente y su porcentaje con respecto al costo total.
- Disponibilidad de componentes en el mercado local: con base a los resultados hallados a partir de la construcción del modelo funcional.
- Eficiencia del sistema: estimación basada en los datos experimentales y analíticos.

#### **1.5 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO DE PRODUCTO**

Como resultado de la fase de exploración inicial del proyecto de grado se generó un listado de especificaciones de diseño para orientar el proceso de diseño. En la Tabla 5 es posible observar los principales requerimientos del sistema a desarrollar, así como la clasificación de los mismos en tanto constituyen demandas o deseos y la importancia relativa de cada uno.

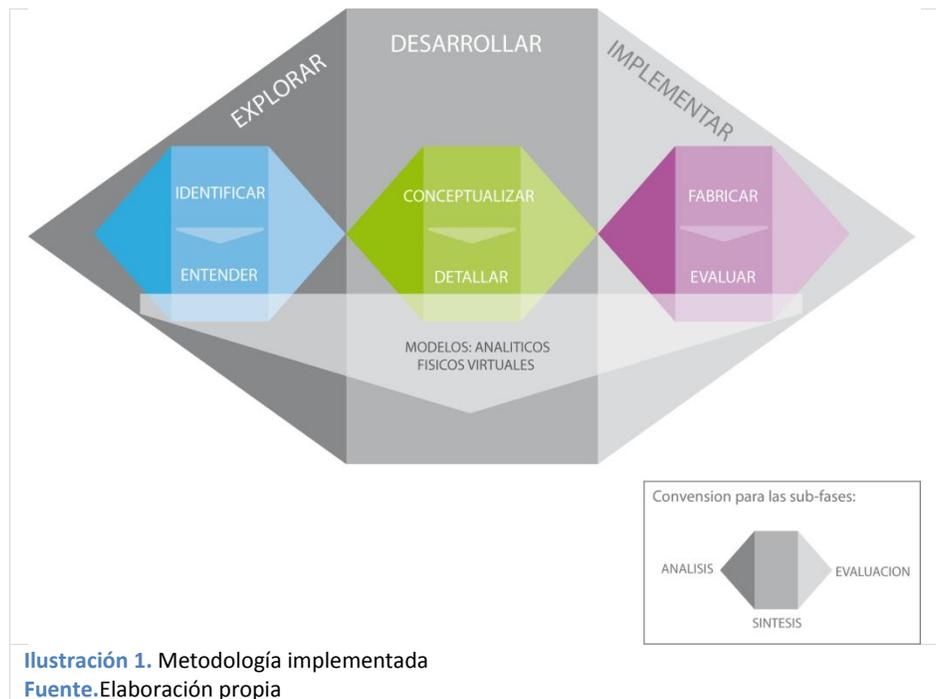
**Tabla 5.** Especificaciones para el producto.

| PDS                       | REQUERIMIENTO  | Demanda/deseo | PESO |
|---------------------------|--|---------------|------|
| Funcionalidad y desempeño | El producto genera energía en ríos con velocidad mayor a 1 m/s   | D             | 17   |
|                           | El producto tiene una potencia efectiva mayor a 1,6 kW/día   | D             | 16   |
|                           | La operación del producto no se ve afectada ante el paso de residuos como: hojas, basura y pequeños peces.           | d             | 5    |
|                           | El producto opera con normalidad en áreas de río con profundidad media menor a 0,7 m.                                | D             | 18   |
|                           | El producto posee un sistema de instalación que le permite ser ubicado fácilmente en el río.                         | D             | 10   |
| Manufactura y Materiales  | Los componentes, materiales y procesos de fabricación del producto son de fácil consecución en la industria nacional | d             | 8    |
|                           | Posee materiales resistentes al agua y al sol.   | D             | 15   |
| Mantenimiento             | Para realizar el mantenimiento no es necesario el uso de herramientas y equipos especializados.                      | D             | 14   |
|                           | Las reparaciones del producto se pueden realizar en talleres locales.  | d             | 7    |
|                           | Los componentes del producto son de fácil consecución en el mercado.   | d             | 8    |
| Usuario                   | El producto está dirigido a personas no interconectadas a la red eléctrica, vecinas al río.                          | D             | 13   |
|                           | Para la instalación y mantenimiento el producto requiere mínimo 3 personas.  | d             | 4    |
| Tamaño y peso             | El peso máximo del producto es de 100 kilogramos   | D             | 12   |
|                           | El tamaño máximo del sistema es de 3,5x2x1 m   | d             | 6    |
|                           | El producto será ubicado en la rivera del río.   | d             | 1    |
| Seguridad                 | Los componentes eléctricos del producto están aislados del agua.   | D             | 11   |
|                           | Las partes móviles del producto están protegidas.  | D             | 9    |
| Costo                     | El costo kilovatio entregado es menor a 10 USD   | d             | 2    |
| Regulaciones              | El producto no interfiere con en el desarrollo normal de la fauna y flora del río y su rivera                        | d             | 3    |

Fuente. Elaboración Propia (modelo (Pugh, 1990))

## 2. METODOLOGÍA PROYECTO DE GRADO

Para el desarrollo del presente proyecto se implementó una metodología que consta de tres fases principales a saber: explorar, desarrollar e implementar (ver Ilustración 1). El nombre de las fases obedeció a la acción predominante en cada una de ellas y se ordenaron siguiendo la lógica racional de solución de problemas aplicada al proceso de diseño como lo sugiere la norma VDI 2221 (VDI, 1986). Adicionalmente, como referencia para el planteamiento de fases y actividades, se consideraron tres modelos de proceso existentes: El modelo de innovación de la Universidad TUDelft, FrogDesign y la metodología empleada en el proyecto de grado de Jaramillo y Raigosa (Jaramillo & Raigosa, 2008).



Como puede apreciarse en la ilustración 1, al interior de cada una de las fases se siguió la misma lógica de análisis, síntesis y evaluación derivada de la concepción del proceso de

diseño propuesta en la VDI 2221. Además, se observa cómo de manera transversal, en cada una de las fases, se utilizaron las tres formas básicas de resolver problemas en ingeniería (Doebelin). Dependiendo del avance del proyecto y de las necesidades de cada fase se generaron entonces modelos analíticos, virtuales y experimentales que permitieron aumentar el nivel de conocimiento del problema, probar alternativas técnicas y evaluar la solución generada.

Cada una de las tres fases principales se orientó hacia el cumplimiento de un objetivo particular y éstas a su vez se descompusieron en una serie de actividades, que se desarrollaron aplicando diferentes herramientas, y que en su conjunto contribuyeron al logro de los mismos. Los objetivos que se plantearon para cada fase fueron:

1. Explorar: Identificar los factores asociados a la tecnología para entender el funcionamiento de sistemas similares, y determinar la especificaciones de diseño de producto.
2. Desarrollar: Realizar el diseño conceptual del sistema, para identificar los componentes y sus relaciones.
3. Implementar: Desarrollo de un modelo físico que permita verificar la potencia efectiva del sistema.

La relación de estos objetivos con los objetivos específicos planteados para el proyecto de grado se puede observar en la matriz que se presenta en la Tabla 6. De esta forma se evidencia el cumplimiento de los compromisos adquiridos en la fase de anteproyecto con la implementación de la metodología que se reporta en el presente capítulo.

**Tabla 6.** Matriz de correlación de objetivos.

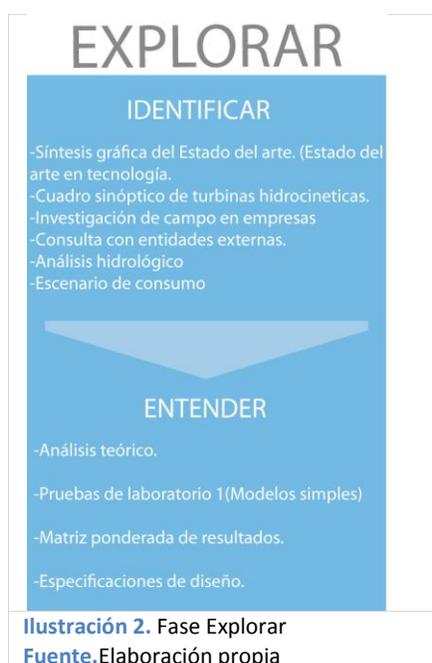
| <b>MATRIZ DE CORRELACIÓN DE OBJETIVOS</b>   |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|
| <b>OBJETIVOS DE LA METODOLOGÍA</b>  | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> |
| <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>  |          |          |          |
| 1. Validar las especificaciones del producto, por medio de una investigación de campo en la que se considere opiniones de los interesados en el proyecto así como aspectos técnicos relacionados con el diseño del sistema. | X        | X        | X        |

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 2. Realizar el diseño conceptual del sistema, para identificar los componentes y sus relaciones.              |   | X |   |
| 3. Desarrollar modelos analíticos, virtuales y físicos que permitan seleccionar y detallar los componentes.   | X | X | X |
| 4. Construir un modelo funcional para realizar pruebas de campo y evaluar técnicamente el diseño del sistema. |   | X | X |

Fuente. Elaboración propia

## 2.1 PROCEDIMIENTO

### 2.1.1 Fase 1: Explorar



Durante esta fase se realizó una exploración de la tecnología y se contactó a los posibles interesados en el proyecto con el ánimo de estimar las posibilidades de realización del mismo. Además, se desarrolló una investigación preliminar del mercado y se validó el primer conjunto de especificaciones de diseño del sistema. Esta validación se efectuó empleando modelos teóricos simplificados y la prueba de modelos físicos como se evidenciará en el numeral 1.2.1.2.

En esta fase se emplearon herramientas como: un análisis del estado del arte, un análisis hidrológico, la exploración del contexto, entre otras que serán mencionadas

posteriormente, con el fin de identificar la situación de diseño a nivel de tecnología, y definir el contexto del producto. Además se desarrollaron pruebas experimentales con base en modelos analíticos simples, que permitieron definir parámetros importantes del diseño, como el tipo de rotor a implementar.

### 2.1.2 Fase 2: Desarrollar



A partir de las especificaciones definidas en la fase de exploración, se desarrolló la síntesis funcional del producto con el fin de definir las relaciones entre los componentes del sistema.

Esta fase se dividió en dos sub-fases: conceptualizar y detallar, las cuales se desarrollaron de manera complementaria. Inicialmente se definió la idea general del sistema a nivel funcional (conceptualizar), a partir de esto se determinaron los componentes que serían diseñados particularmente para el sistema y aquellos de carácter estándar, disponibles en

el mercado local (detallar), una vez diseñados y seleccionados los componentes se realizó la síntesis formal (conceptualizar), y finalmente se realizó un modelo virtual (detallar), para tener como resultado la alternativa final.

Para esto se siguió el orden del proceso de transformación de energía, que se representa en la estructura funcional que se generó para el sistema (ver Ilustración 11)

### 2.1.3 Fase 3: Implementar



En esta fase se fabricó, por medio de la aplicación de técnicas de modelos y prototipos, un modelo funcional, para identificar la potencia efectiva que entregaría el sistema y evaluar el diseño, además obtener retroalimentación para eventuales mejoras, que serán claves en la continuación del proyecto a futuro.

Es por esto que este proceso consistió en la fabricación de las partes que fueron necesarias para realizar pruebas experimentales. Los demás componentes fueron simulados o modelados en 3D.

## 2.2 MÉTODOS Y HERRAMIENTAS UTILIZADAS

### 2.2.1 Fase 1: Explorar

#### 2.2.1.1 Identificar

- *Síntesis gráfica del Estado del arte. (Estado del arte en tecnología (Baxter,1995))*

A partir de la investigación del mercado, se desarrolló una matriz en Excel® en la que se listan diferentes turbinas hidrocínéticas existentes, considerando la información comercial disponible y las especificaciones técnicas de las mismas. En la ilustración 5 es posible observar una impresión parcial de la matriz desarrollada. El archivo completo se encuentra disponible en el Anexo A.

Esta herramienta permitió analizar y comparar los diferentes productos encontrados, lo que clarificó el funcionamiento del sistema y determinó puntos clave para el desarrollo del proyecto.

| PRODUCTO                         | INFORMACION COMERCIAL       |              |                      | ESPECIFICACIONES |                       |                              |                                |                             |                              |              |                       |
|----------------------------------|-----------------------------|--------------|----------------------|------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------------|------------------------------|--------------|-----------------------|
|                                  | Organización                | Costo        | Estado de desarrollo | Tipo de turbina  | Orientación del eje   | Eficiencia del Sistema %     | Potencia (kW)                  | Profundidad (m)             | Tamaño del Sistema           | Generador    | Velocidad Flujo (m/s) |
| <b>Turbinas Hidrocíneticas</b>   |                             |              |                      |                  |                       |                              |                                |                             |                              |              |                       |
| Flipwing Turbine                 | Hydrovolts                  | 5,000-10,000 | -                    | Perpendicular    | Horizontal - en plano | -                            | 1kW-30KW                       | -                           | -                            | -            | 2m/s-6m/s             |
| Freestream Darrius Water Turbine | Alternative Hydro Solutions | -            | Comercial            | Perpendicular    | Vertical              | no info.                     | 2.6 KW                         | 0,6                         | 3.0m dia x 2.5 H long        | -            | 1,4                   |
| "Submerged Hydro-Unit"           | Energy Alliance             | -            | Comercial            | Perpendicular    | Horizontal - en plano | 65%                          | 1-5 kW                         | >0.5                        | -                            | -            | 3 a 10                |
| Floating Power Station           | Edltd                       | -            | Prototipo            | Perpendicular    | Horizontal - en plano | no info encontrada           | no info encontrada             | no info.                    | (2) x 18 m wheel +14m blades | 12V y 28V DC | 3 m/s                 |
| EnCurrent Hydro Turbine          | N                           | -            | Pre-Comercial        | Perpendicular    | Vertical              | Ducted: 28%<br>Unducted: 55% | 2.8 kW unducted-13.0 kW ducted | 2-3 unducted-1.5-1.7 ducted | 1.6 m dia x 0.8 h            | -            | 2.5 m/s               |
| Amazon Aquacharger               | M                           | -            | Comercial            | Flujo Axial      | Eje inclinado         | 12%                          | 0.50 kW                        | 1.75 - sin limite           | 1.8 m dia                    | -            | 1.5 m/s               |

**Ilustración 5. Matriz del estado del arte**

Fuente.Elaboración propia

En la Tabla 7 se listan las turbinas especificaciones similares a las del presente proyecto.

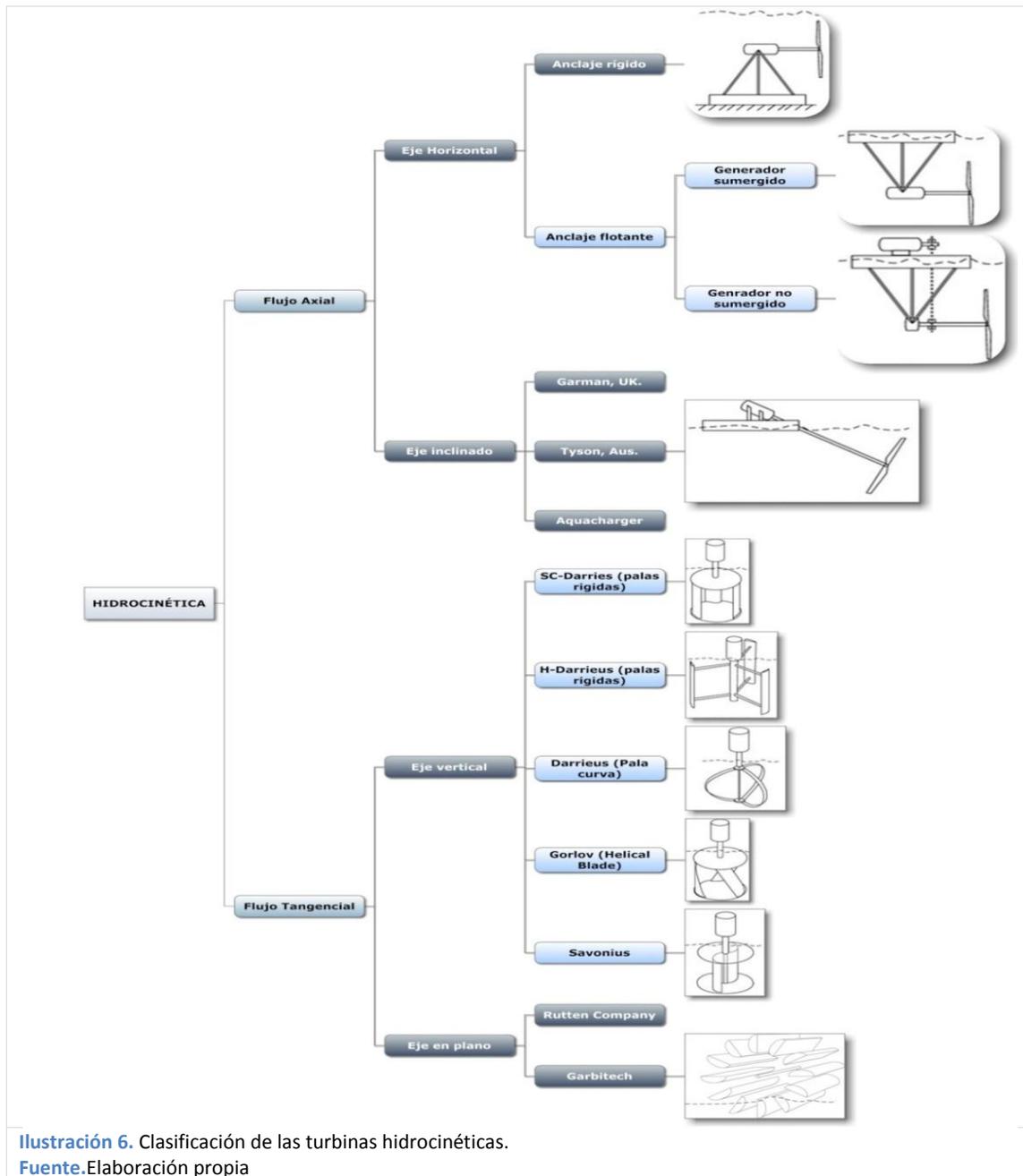
**Tabla 7.** Productos similares.

| Turbina  | Organización   | Costo         | Potencia (kW)    | Profundidad (m)   | Tamaño del Sistema               | Velocidad Flujo (m/s) |
|--|--|---------------|------------------|-------------------|----------------------------------|-----------------------|
|   | Amazon Aquacharger/Marlec                                  | -             | 0.50 kW          | 1.75 - sin limite | 1.8 m dia                        | 1.5 m/s               |
|   | "Gorlov Helical Turbine", twisted Darrieus /GCK Technology | -             | 0.70 kW          | 0.6 / sin limite  | 1.0 m dia. x 2.5 m               | 1.3 m/s               |
|   | MGH-200LH / PowerPal™ Low Head                             | -             | 0.2 kW /110-220V | -                 | Altura: 68 cm<br>Diametro: 20 cm | -                     |
|  | Rueda hidraulica con flotador/Grabitek                     | 3 420 (euros) | 0.2 kW           | -                 | Turbina 150 x 112 x 86 cm.       | 2.8 m/s               |

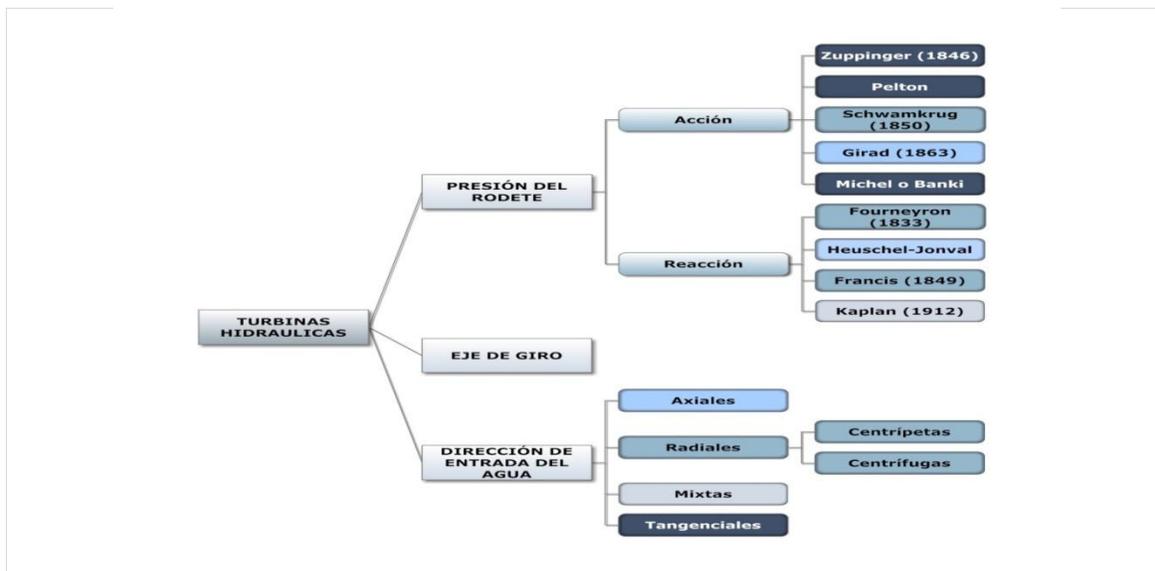
**Fuente.** Elaboración propia. Información e imágenes tomadas de la página web de cada organización.

- *Cuadro sinóptico de turbinas hidrocinéticas.*

Se construyó otro cuadro con los diferentes tipos de turbinas hidrocinéticas encontradas en el estado del arte, en donde se clasifican según el flujo, la dirección del eje y el tipo de anclaje. (Ver Ilustración 6)



Asimismo, se desarrolló un cuadro sinóptico con una clasificación de turbomáquinas a partir de las siguientes categorías: presión del rodete, eje de giro y dirección de entrada del agua (Ilustración 7)



**Ilustración 7.** Clasificación Turbinas Hidráulicas  
**Fuente.** Elaboración propia. Información tomada de (Fernandez, 2008).

Esta herramienta permitió al equipo de diseño depurar la información encontrada en el estado del arte y facilitó la síntesis funcional del sistema. Y además se identificaron dos tipos generales de rotor: de acción y de reacción, correspondiente a turbinas de flujo axial y tangencial respectivamente.

En el Anexo A se encuentra una descripción más detallada sobre la clasificación de las turbo máquinas.

- *Trabajo de campo- entrevistas*

Esta investigación consistió en la visita a empresas locales y entidades públicas en las cuales se realizaron conversaciones con expertos de temas complementarios al proyecto como: componentes eléctricos, diseño y construcción de turbinas. Las empresas visitadas estaban relacionadas con la generación de energía y manejo de componentes hidráulicos, las entidades externas, por otro lado, prestaron información acerca del contexto del producto, a nivel de hidrografía y demografía.

Dichas conversaciones fueron entrevistas informales que se realizaron por medio de citas concertadas con cada experto, en donde se tomó nota de lo más relevante para el

proyecto, según los criterios del equipo de trabajo. En el anexo B se presentan los resultados del trabajo de campo realizado.

- *Análisis hidrológico (Maldonado, 2005)*

A partir de la consulta con expertos de la entidad CORANTIOQUIA<sup>1</sup> y con base en documentos de caracterización de cuencas de Antioquia realizados por la misma entidad, se identificaron parámetros de profundidad y velocidad de los ríos en esta zona requeridos para el diseño del sistema.

- *Descripción del contexto.*

Con el objetivo de definir el contexto de diseño, se buscó información del SIGOT (Expedientes departamentales Antioquia) disponible en la página web: [www.sigotn.igac.gov.co](http://www.sigotn.igac.gov.co), para analizar el departamento de Antioquia buscando información relacionada con la demografía, la hidrología y la calidad de vida. Complementario a esto, se hizo una investigación de campo en el corregimiento el Dos, zona no interconectada del municipio de Santa Fe de Antioquia, en donde se visitaron hogares no interconectados a la red eléctrica (Ver Ilustración 8), y se entrevistaron dos familias que proporcionaron información que fue recolectada a través de grabaciones y toma de nota, dicha información se organizó con base en la matriz presentada a continuación:

**Tabla 8.** Guía de observación.

| Aspectos                                 |   | LUGAR # 1 Preguntas o aspectos para tener en cuenta |
|--|---|---|
| Necesidades,<br>Gustos y<br>Preferencias | Caracte<br>rísticas<br>físicas  | • Es una zona sin conexión eléctrica?               |
|  |   | • En qué región está ubicada?                       |
|  |   | • Qué acceso tiene la zona?                         |
|  |   | • Clima de la zona                                  |
|  |   | • Cual es el río más cercano?                       |
|  | Grupo de<br>Personas  | • Cuantas personas habitan o permanecen?            |
|  |   | • Que actividades realizan al interior?             |
|  |   | • Cuanto tiempo del día permanece al interior?      |
|  |   | • Como es la distribución actual?                   |
|  |   | • Que tan grande es la casa?                        |
| Caracte<br>rísticas<br>físicas           | • Hace uso de algún tipo de energía?  |   |
|  | • Como prepara y conserva los alimentos?                                    |   |
|  | • Posee acueducto? En caso negativo cómo soluciona las necesidades de agua? |   |
|  | • Que utiliza para iluminar?  |   |

<sup>1</sup> CORANTIOQUIA empresa dedicada a la ejecución de las políticas, planes, programas y proyectos sobre el medio ambiente y recursos naturales renovables de una parte de Antioquia.

|   |  |
|---|--|
| Usuario (Uso y ergonomía)<br>Estilo de vida | • Hay inseguridad en la zona? Como protege la casa?                              |
|   | • Que actividades realizan para entretenerse?                                    |
|   | • Que medio de comunicación utilizan o saben utilizar?                           |
|   | • En caso de haber niños como realizan sus actividades académicas?               |
|   | • Que aspiraciones futuras tiene?  |
|   | • Que aparatos eléctrico y electrónicos utiliza normalmente? Con que frecuencia? |
|   | • Que actividades realiza cada uno de los habitantes de la casa?                 |
|   | • Quien realiza las labores domesticas?  |
|   | • Qué nivel de educación tienen?   |
|   | • Que tareas pueden calificarse como particularmente importantes?                |
|   | • Como solucionan la falta o mala calidad de energía?                            |
|   | • Cuáles son los puntos críticos de esta condición?                              |

Fuente. Elaboración propia.



**Ilustración 8.** Situación de habitantes de ZNI de Santa Fe de Antioquia.

Fuente. Elaboración Propia.

En el Anexo B- Análisis del contexto, se encuentra los detalles y el análisis de la información recopilada en dichas visitas.

- *Escenario de consumo. (Dávila, Vilar, Villanueva & Quiroz, 2010).*

Con base en la descripción del contexto, se realizó una estimación aproximada de la demanda de energía de un hogar. Se estableció un escenario de consumo de energía básico, indicando el tiempo de uso diario de electrodomésticos con más posibilidad de ser usados, para satisfacer las necesidades de comunicación, información y entretenimiento, tal como lo sugirieron personas ubicadas en zonas no interconectadas. Finalmente una vez

estimado el tiempo y la potencia de cada aparato, se proyectó la demanda básica mensual, como punto de referencia para el dimensionamiento del sistema.

### 2.2.1.2 Entender

- *Modelos analíticos básicos del sistema.*

En la literatura y en el estado del arte, se identificaron dos tipos generales de rotor, de acción y de reacción. Como herramienta para la selección de uno de ellos, se realizó una comparación teórica, para la cual se emplearon modelos analíticos simples de cada tipo: para el de acción, el propuesto por (Behrens, 2005) (Ver Tabla 9), y para el de reacción el propuesto por (Maldonado, 2005) (Ver Tabla 10), dichos autores tienen experiencia en esta área y han desarrollado modelos experimentales que permitieron identificar las variables que influyen en el comportamiento de cada rotor y su dimensionamiento, a continuación se presentan dichos modelos analíticos simplificados.

**Tabla 9.** Modelo teórico de una turbina de acción.

| Parám          | Ecuación           | Unidades             | Descripción   |
|----------------|--------------------|----------------------|---|
| V              | Dato conocido      | [m/s]                | Velocidad del fluido, parámetro de entrada para el análisis   |
| H              | $H=V^2/2g$         | [m]                  | Cabecal de presión dinámica   |
| g              | $g=9.8$            | [m/s <sup>2</sup> ]  | Coefficiente de gravedad  |
| D              | $D=6;3 H$          | [m]                  | El diámetro para el rotor de una rueda hidráulica debe ser entre 6 y 3 veces la cabeza.                                   |
| D <sub>w</sub> | $D_w=D-H$          | [m]                  | El diámetro de trabajo D <sub>w</sub> , equivale al punto medio de la pala, donde el volumen de control ejerce la fuerza. |
| P <sub>e</sub> | $P_e=D_w\pi$       | [m]                  | Perímetro del rotor   |
| S              | $S=H$              | [m]                  | Longitud sumergida de la pala equivalente a la cabeza.  |
| z              | $z= P_e/H$         | #                    | El número de las palas, z, se determina dejando una separación entre palas equivalente a la cabeza.                       |
| η <sub>r</sub> | $\eta_r=67-90\%$   | #                    | Coefficiente de eficiencia del rotor para ruedas hidráulicas está entre los valores dados                                 |
| n              | $n=(v \eta)60/P_e$ | [rpm]                | Revoluciones por minuto del rotor   |
| ω              | $\omega=\pi n/30$  | [rad/s]              | Velocidad angular del rotor   |
| L              | Dato conocido      | [m]                  | Longitud del rotor  |
| A              | $A= S L$           | [m <sup>2</sup> ]    | Área de la pala sumergida   |
| Q              | $Q=A V$            | [m <sup>3</sup> /s]  | Caudal del fluido   |
| ρ              | $\rho=1000$        | [kg/m <sup>3</sup> ] | Densidad del agua   |
| Peje           | $P=1/2\rho QV^2$   | [W]                  | Potencia en el eje  |
| τ              | $\tau=P/\omega$    | [Nm]                 | Torque en el eje  |

**Fuente.** Elaboración propia. Información tomada de (Behrens, 2005)

**Tabla 10.** Modelo teórico de una turbina de reacción.

| Parámetro | Ecuación                       | Unidades             | Descripción   |
|-----------|--------------------------------|----------------------|---|
| D         | Dato conocido                  | [m]                  | Diámetro externo del rotor (cuando el diámetro del eje es despreciable)   |
| A         | $A=(\pi/4) D^2$                | [m <sup>2</sup> ]    | El área de barrido del rotor equivale al círculo que describe el movimiento del alabe.  |
| $\theta$  | Dato conocido                  | [grados]             | Es el grado de inclinación del eje del rotor, que equivale al ángulo de incidencia de la velocidad sobre el rotor. $\theta=0$ para turbinas axiales horizontales. |
| v         | Dato conocido                  | [m/s]                | Velocidad absoluta del agua al interceptar el rotor.  |
| $\rho$    | $\rho= 1000$                   | [kg/m <sup>3</sup> ] | Densidad del flujo de agua  |
| $P_h$     | $P_h=(1/2)\rho Av^3\cos\theta$ | [W]                  | Potencia Hidráulica   |
| $P_r$     | $P_r=P_h\eta_r$                | [W]                  | Potencia en el eje del rotor  |
| $P_t$     | $P_t= P_r\eta_t$               | [W]                  | Potencia en el eje de transmisión   |
| $P_g$     | $P_e= P_t\eta_g$               | [W]                  | Potencia a la salida del generador  |

**Fuente.** Elaboración propia. Información tomada de (Maldonado, 2005)

En el Anexo E se encuentra el proceso detallado del método analítico empleado durante la ejecución del proyecto.

- *Pruebas de laboratorio 1 (Modelos simples).*

Para apoyar el proceso de selección del tipo de rotor, y como complemento de los modelos analíticos desarrollados se realizó una prueba sobre modelos simples de rotores en el laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT. Para esto fue necesario construir un modelo de cada tipo de rotor (acción y reacción) a partir del dimensionamiento preliminar determinado siguiendo los modelos analíticos básicos. Además, dada la necesidad de medir el torque generado en el rotor, se diseñó y fabricó el Freno Proney que se presenta en la Ilustración 9.



Para la realización de esta prueba se adquirió una propela comercial con un área de pala (superficie de control) de 10 cm<sup>2</sup> y se dimensionó el rotor de acción con base en el modelo teórico presentado en la Tabla 9, con un área de control equivalente a la de dicha propela, esto con el objetivo de tener una base comparable entre ambos rotores.

En el Anexo F – Método Experimental se encuentran los documentos y la información relacionada con la planeación, ejecución y análisis de los resultados obtenidos en esta primera fase de experimentación.

- *Matriz de evaluación.*

Con esta herramienta se evaluaron los dos tipos de rotor (acción y reacción) en consideración, con el fin de elegir uno de ellos para su posterior desarrollo a nivel de detalle.

Se identificaron criterios relacionados con las especificaciones de diseño y se ponderaron, teniendo como soporte para la calificación, tanto las pruebas de modelos simples, como factores cualitativos y las recomendaciones de expertos consultados durante esta etapa.

Para realizar esta evaluación se preparó en primer lugar la matriz de selección, en donde se determinaron los criterios de comparación y su importancia relativa, posteriormente se calificaron los conceptos de acuerdo con dos criterios de valor: 1 como el menor y 2 como el mayor, finalmente se realizó la suma ponderada de las calificaciones y se determinó la alternativa con mejor puntuación.

- *Especificaciones de diseño.* (Pugh, 1990)

Las especificaciones del producto, se utilizaron como un documento de control durante el proyecto. Con esta herramienta se determinó lo que el producto debía hacer, se establecieron criterios para encaminar el diseño y evaluar las futuras alternativas. Además sirvió como guía y ayuda al equipo de trabajo, para asegurarse que ningún aspecto quedara fuera en el diseño del producto.

Este proceso comenzó teniendo como base las especificaciones de diseño iniciales determinadas en el anteproyecto; durante el proceso de diseño se encontraron restricciones técnicas y económicas que obligaron a modificar, más que los requerimientos de diseño, los valores asignados inicialmente estos. Los cambios más representativos se realizaron luego de dimensionar el rotor y de realizar las pruebas experimentales.

## 2.2.2 Fase 2: Desarrollar

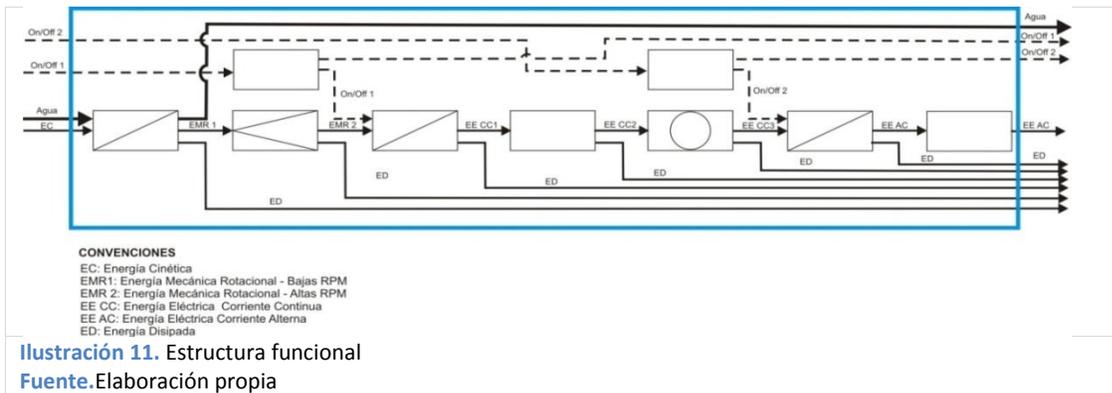
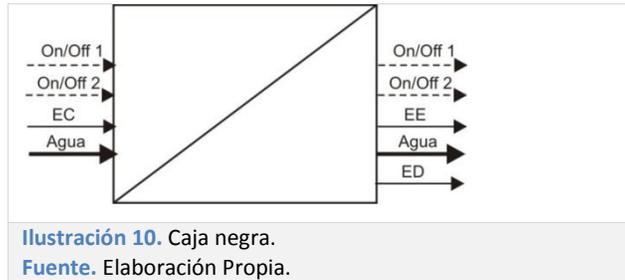
### 2.2.2.1 Conceptualizar

- *Síntesis funcional*

Con la síntesis funcional se consideraron las funciones principales del sistema, aquellas que debe satisfacer el producto independientemente de los componentes físicos que se usen; se identificaron los flujos principales que el producto transforma y se evidencia la secuencia de acción del sistema.

Para la síntesis funcional se siguió la propuesta por Pahl & Beitz, y se consideraron las siguientes representaciones:

- *Caja negra (Nigel Cross)*: se identificaron los flujos de entrada y salida del sistema, considerando el sistema como una caja negra cuya función principal es transformar energía (Ver Ilustración 10)
- *Estructura funcional (Pahl&Beitz)*: Esta herramienta permitió descomponer la función principal expuesta en la caja negra en un grupo de funciones secundarias (ver Ilustración 11), por medio de las cuales se describió el orden del proceso de transformación de energía.
- *Estructura de componentes (Pahl&Beitz)*: se asignaron los componentes a las funciones identificadas, algunos de los cuales integran varias funciones.
- *Ruta factible*: se determinó la combinación de componentes mas adecuada.



- *Matriz morfológica* (Nigel Cross, 2000)

Se identificaron diferentes portadores de función (componentes que realicen las funciones de la estructura funcional). Y se definieron rutas factibles, combinaciones posibles de dichos componentes, para tener en cuenta en la generación de alternativas de diseño.

A partir de las rutas identificadas se generaron alternativas de diseño como un método gráfico para explorar posibles configuraciones de los componentes, sin embargo este método no proporcionó la información suficiente para seleccionar la alternativa final. Por esta razón, se identificó la necesidad de iniciar el proceso de detalle a nivel de componentes, como paso intermedio al diseño final del sistema.

En consecuencia con lo anterior, una vez detallados los componentes, se definió la ruta factible para realizar la permutación y la síntesis formal, y definir el diseño final del sistema.

En el Anexo L se encuentra mayor información sobre la síntesis funcional del sistema.

- *Arquitectura del producto (Product Permutation, Baxter 1995)*

Como parte del diseño conceptual, se utilizó la permutación de características del producto como una herramienta para analizar tanto el tamaño como la ubicación de los componentes del sistema seleccionados, para realizar arreglos de dichos componentes de acuerdo a sus funciones y evidenciar las diferentes relaciones que se generan con una ordenación de elementos determinada.

Las diferentes configuraciones realizadas se encuentran detalladas en el Anexo-L.

- *Collage de fotografías (Collage techniques Design guide, TUDelft)*

Esta herramienta consistió en el desarrollo de cuatro collages: referente formal, emoción, usuario y contexto, los cuales se sirvieron como fuente de inspiración para el diseño formal del producto. Esto permitió la identificación de los valores que debe incluir el producto, a través de la emoción que refleja, la cual además esta relacionada con el usuario y su contexto.

- *Generación de alternativas (Marc Tassoul, Creative facilitation, TUDelft, 1999)*

Esta herramienta se usó en diferentes etapas del proceso de diseño. En la sub-fase conceptualizar se realizó una lluvia de ideas en donde se generaron alternativas del sistema a partir de las rutas factibles identificadas en la matriz morfológica, esto con el fin de tener un soporte gráfico global, útil para el diseño de detalle.



Por otro lado se usó esta herramienta para conceptualizar individualmente los componentes que se diseñaron, y como una primera aproximación al diseño de detalle de los mismos. Se realizaron sesiones con los miembros del equipo de diseño, en donde se generaron y plasmaron ideas para el diseño de componentes como el rotor y los pontones. En estas se exploraron aspectos como:

1. ESTRUCTURA GENERAL DEL ROTOR: diseño para el ensamble y el transporte.
2. EXPLORACIÓN DE LAS FUERZAS EN LAS PALAS: exploración del número, grados de libertad y ubicación de las palas.
3. EXPLORACIÓN DE LOS PERFILES DE PALAS PARA ANALIZAR: diseño de la pala.
4. SISTEMA DE SOPORTE: Exploración formal de pontones.

En el Anexo D se encuentra más información, ilustraciones y resultados obtenidos a partir de esta generación de ideas.

### 2.2.2.2 Detallar

- *Matriz de componentes por diseñar o seleccionar.*

A partir de la síntesis funcional del sistema se hizo una distinción con base en el alcance del proyecto y apoyada en criterios de expertos, entre los componentes del producto que se diseñarían especialmente para la aplicación y aquellos de consecución comercial. La

Tabla 11 muestra el listado generado para consolidar la información y, comparando con la estructura funcional desarrollada para el sistema, se estableció el orden a seguir en el proceso de corporificación.

**Tabla 11.** Matriz de componentes por diseñar o seleccionar.

| MATRIZ COMPONENTES POR DISEÑAR O SELECCIONAR |                     |        |           |
|--|---------------------|--------|-----------|
| Orden de corporificación                     | Componente          | Diseño | Selección |
| 1  | Rotor               | X      |           |
| 2  | Generador           |        | X         |
| 3  | Transmisión         |        | X         |
| 4  | Sistema de soporte  | X      |           |
| 5  | Sistema de anclaje  | X      | X         |
| 6  | Estación de control | X      | X         |

**Fuente.** Elaboración Propia

- *Software CAD y técnicas de modelación.*

Se utilizó el módulo CAD de Pro-Engineer wildfire 5.0, para el diseño de detalle del sistema. Esto permitió dimensionar y visualizar el diseño de cada componente y del sistema, y además facilitó la elaboración de planos de taller y ensamble necesarios para la fabricación.

- *Modelo analítico del rotor*

Es el modelo analítico empleado para describir el fenómeno de transformación de energía propio del rotor diseñado. Este modelo permitió cuantificar los valores de energía para cada etapa del proceso de transformación, siguiendo el orden establecido en la estructura funcional del sistema. Además, permitió dimensionar el rotor de acuerdo con las características de la energía disponible y la potencia esperada.

- *Pruebas de laboratorio 2 (Distribución de palas)*

Para apoyar el proceso del diseño de detalle del rotor, se realizó un prueba en el laboratorio de hidráulica de la Universidad EAFIT, en la que se analizó experimentalmente la distribución de palas en el rotor. Para esto fue necesario construir un modelo simple de un rotor tipo rueda hidráulica y utilizar el torquímetro construido previamente para obtener información de torque estático y fuerza entregada en cada distribución, tal como lo muestra la siguiente ilustración.

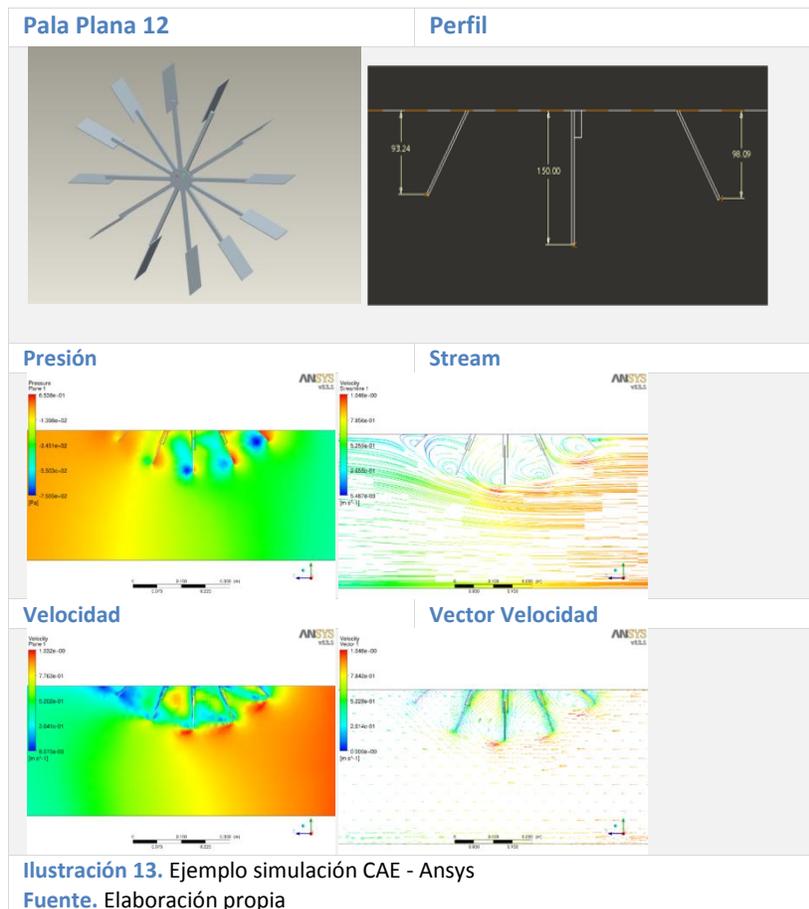
Para la construcción del modelo simple se dimensionó un rotor de diámetro 80 cm, utilizando el modelo analítico más refinado (Ver Anexo E-Modelo analítico del rotor) para una velocidad de 1.5 m/s y dado que las dimensiones del canal de hidráulica de la Universidad Eafit tiene un ancho total de 30 cm, se determinó una pala de 10cm para realizar la prueba.

Los datos obtenidos por medio de ésta prueba, permitieron tomar decisiones del número adecuado de palas sumergidas y los grados de libertad de estas con respecto al movimiento del rotor. Para ampliar la información ver Anexo F- Método Experimental.

- *Simulación CAE*

Se utilizó el módulo de fluido de Ansys para el diseño de detalle del rotor. Esto permitió obtener datos de presión, velocidad de entrada y salida del fluido, para diferentes perfiles y distribuciones de palas. Con la información obtenida de estos análisis se definió la forma final de la pala y el número de palas requeridas en el rotor.

La Ilustración 13 muestra uno de los modelos analizados y las imágenes obtenidas a a partir de la modelación.



En el Anexo J- Simulaciones numéricas, se encuentra la información completa de los análisis realizados con los diferentes tipos de pala considerados y del modelo seleccionado.

- *Evaluación y revisión de los modelos analíticos - Pruebas de campo*

Con el fin de analizar el comportamiento del rotor diseñado, se realizaron pruebas de campo en algunos ríos. Para esto fue necesario la construcción del modelo funcional del rotor, el rediseño y fabricación de un freno proney que se ajustara a los valores de fuerza esperados (Ver Ilustración 14), y la consecución y calibración de los instrumentos necesarios para el montaje experimental en ambientes similares al contexto de uso.



Por otro lado estas pruebas fueron importantes, puesto que permitieron validar el modelo analítico planteado para el rotor, validación que fue necesaria ya que éste modelo consistió en un compendio de diferentes modelos propuestos y no en la aplicación de un modelo específico para este tipo de rotor. Para esto se realizaron comparaciones de lo

calculado teóricamente vs. los datos experimentales, con el objetivo de determinar si el modelo era adecuado para describir el fenómeno.

Luego de esta validación fue posible identificar valores de velocidad angular, torque y potencia necesarios para evaluar el desempeño y estimar la eficiencia del rotor diseñado.

El desarrollo de las pruebas y los resultados de las mismas, se explican de manera más detallada en Anexo F- Método Experimental.

- *Investigación exploratoria*

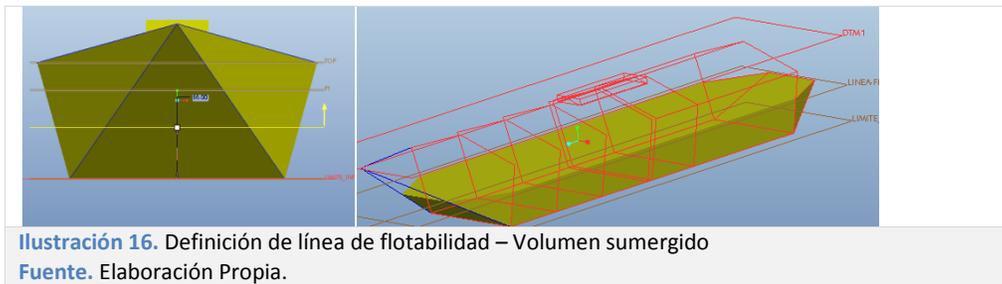
Con el fin de hallar los componentes comerciales que se ajustaran al proceso de transformación de energía del sistema. Se realizó una investigación exploratoria visitando el portal en Internet de las páginas amarillas <http://www.paginasamarillas.com/Colombia/1.aspx>, en donde se buscaron empresas locales que suministraran los componentes para la transmisión, algunas de dichas empresas fueron: Almacén Poleas y Bandas, Palacio Tamayo, Cadenas y Complementos Ltda., entre otras.

Además, se consultó el link de la empresa en Estado Unidos proveedora del tipo de generador requerido para el sistema: <http://www.windbluepower.com>, donde se examinaron precios y características técnicas.

- *Análisis de Flotabilidad*

Se realizó un análisis para verificar la flotabilidad de los pontones diseñados, con base en los modelos matemáticos propuestos por (Mott, 2006) y usando el módulo CAD de Pro-Engineer Wildfire 5.0.

Este análisis consistió en hallar una línea de flotabilidad aproximada de cada pontón asumiendo que cada uno de los pontones soportaría la cuarta parte del total del peso del sistema. Usando la herramienta CAD se realizaron varias iteraciones en las cuales se asumían las posiciones de la línea de flotabilidad con respecto a la superficie inferior del pontón como se aprecia en la Ilustración 16.



**Ilustración 16.** Definición de línea de flotabilidad – Volumen sumergido  
**Fuente.** Elaboración Propia.

Esta línea determina el volumen sumergido del pontón (Ver Ilustración 16) y con este se procede a realizar los cálculos de flotabilidad de acuerdo con lo sugerido por el autor Mott.(Mott, 2006)

- *Análisis estructural*

Se utilizó el módulo de elementos finitos de Ansys, para el diseño de detalle del chasis. Esto permitió identificar los esfuerzos en la estructura y establecer las geometrías adecuadas para soportar el rotor.



**Ilustración 17.** Condiciones de frontera para el análisis.  
**Fuente.** Elaboración Propia.

Con respecto al sistema de anclaje se empleó el software SAP 2000 versión 14, para simular las condiciones de los postes y definir las dimensiones de los mismos.

Por otro lado para la selección de la guayas, se tuvo en cuenta la tensión que estos deben soportar y se usó la tabla de un proveedor local para determinar el diámetro apropiado.

### 2.2.3 Fase 3: implementar

#### 2.2.3.1 Fabricar

- *Técnicas de modelos y prototipos.*

Haciendo uso de técnicas como corte y doblado de lámina, soldadura y mecanizado de piezas metálicas, se fabricaron los componentes necesarios para hacer un montaje experimental en el que se verificó la potencia eléctrica.

#### 2.2.3.2 Evaluar

- *Estudio experimental -Pruebas de potencia eléctrica*

Asumiendo la confiabilidad de los datos obtenidos en las pruebas de campo, y de acuerdo con el alcance del proyecto, se optó realizar una prueba en el laboratorio en donde se simularan las condiciones obtenidas en las pruebas de campo, esto con el fin de verificar la potencia eléctrica que efectivamente entrega el sistema. Entre otros aspectos la prueba de laboratorio, presentó ventajas frente a las pruebas de campo tales como: disponibilidad de equipos de medición y personal técnico y especializado, así como una menor inversión de tiempo y recursos.

En la Ilustración 18 se muestra el modelo funcional construido para la prueba, el cual incluyó el rotor, la estructura de soporte, el generador y las baterías; así como un motor eléctrico y un reductor, que simularan dichas condiciones.



**Ilustración 18.** Fotografía modelo funcional.  
**Fuente.** Elaboración Propia.

- *Matriz de evaluación técnica*

Esta herramienta se desarrolló en la etapa de evaluación para resumir la información de los costos y procesos que implica la fabricación del sistema.

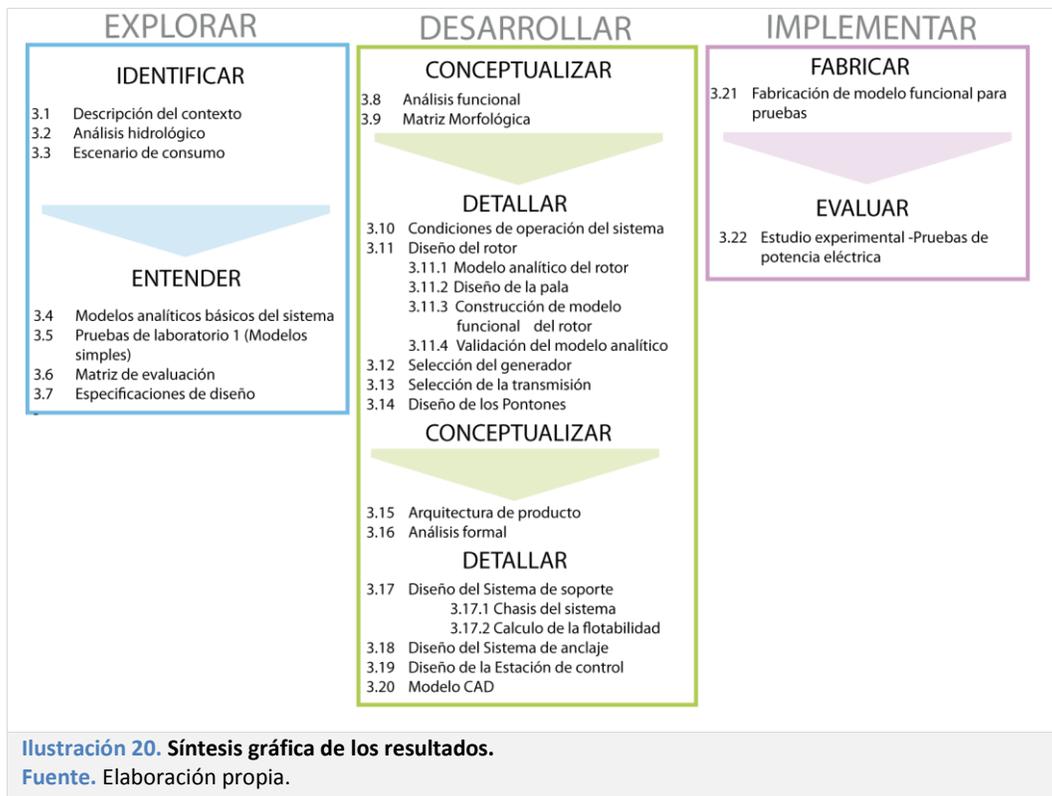
| Componente  | Sub componentes  | Materiales  | Manufactura   | Valor      | Peso % | Proveedor |
|---|--|---|---|------------|--------|-----------|
|  <p><b>Rotor</b><br/>Dimensiones:<br/>0,8 m x 1,30 m</p> | Palas, soporte de palas, eje, chumaceras de flanche SKF, elementos de sujeción | Lámina CR C 18<br>Tubo cuadrado ½" C 14<br>Eje Acero calibrado 1" x 1,6 m<br>Eje de 3"x 3" acero 1020 | Corte y doblado de lámina, soldadura.<br><b>Equipos:</b> torno, rectificadora, fresadora, taladro, pulidora.<br><b>Acabado:</b> Pintura electrostática. | \$ 746.000 | 14%    | Local     |

**Ilustración 19.** Extracto de Matriz de evaluación técnica  
**Fuente.** Elaboración Propia.

### 3. RESULTADOS

En este capítulo se presenta la información obtenida como resultado de la aplicación de las herramientas de la metodología, se describen los resultados más relevantes para el proyecto y su impacto sobre el proceso de diseño.

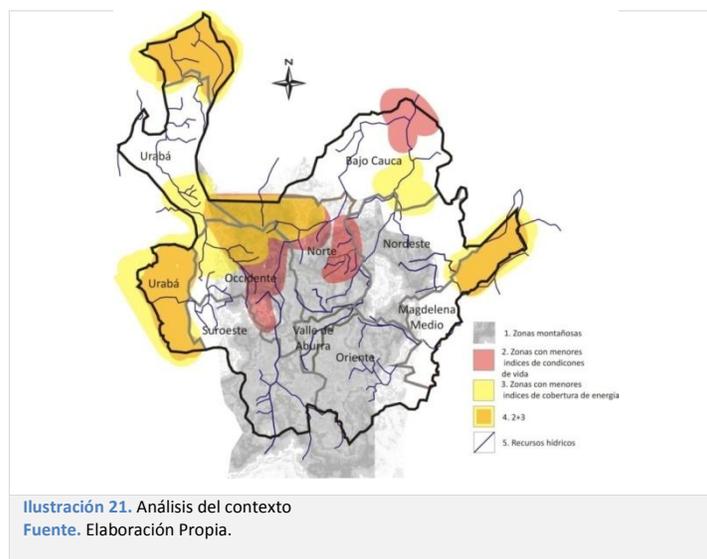
A continuación se muestra una síntesis grafica en la que se relacionan dichos resultados, con las fases y sub-fases de la metodología, en el orden en que fueron desarrollados.



#### 3.1 DESCRIPCIÓN DEL CONTEXTO

La Ilustración 21 que se presenta a continuación es una síntesis gráfica de datos geográficos y demográficos del departamento de Antioquia. Por medio de ésta fue posible identificar como el contexto ideal para el sistema de generación hidrocínético, las zonas

con menores índices de cobertura de energía y menores índices de calidad de vida, ubicadas en las zonas planas (no montañosas) de las subregiones como: Urabá, Bajo Cauca y Magdalena Medio. Si bien estas zonas se caracterizan por tener altos recursos hídricos, no presentan caídas de agua representativas, lo que hace oportuno el aprovechamiento de la corriente de los ríos para generar energía. Además, la densidad poblacional en estas zonas es muy baja y el consumo de energía se da en pequeñas escalas.



### 3.2 ANÁLISIS HIDROLÓGICO

La Tabla 12 que se presenta a continuación, indica datos de ubicación, velocidad y profundidad, extraídos de los documentos de los aforos que ha hecho CORANTIOQUIA en los ríos: Aurra, San Juan, Amaga y la quebrada Piedras Blancas.

**Tabla 12. Estado hidrológico de algunos ríos de Antioquia**

| Nombre                          | Ubicación  | V (m/s) | Prof.(cm) |
|---------------------------------|--|---------|-----------|
| <b>Río Aurra</b>                |  |         |           |
| Estación 5                      | Aguas abajo confluencia con la Quebrada La Muñoz   | 1,43    | 70        |
| <b>Río Amaga</b>                |  |         |           |
| Sitio A21                       | Quebrada La Horcona con la quebrada La Herradurita | 1,32    | 60        |
| Sitio A24                       | Quebrada La Horcona                                | 1.027   | 21cm      |
| Sitio A26                       | Aguas arriba de la confluencia con el Río Cauca    | 1,25    | 36cm      |
| <b>Quebrada piedras blancas</b> |  |         |           |
| Sitio A34                       | Ubicado en el zona urbana de Copacabana            | 1,35    | 45cm      |

**Fuente.** Elaboración Propia. Datos suministrados por Corantioquia.

### 3.3 ESCENARIO DE CONSUMO

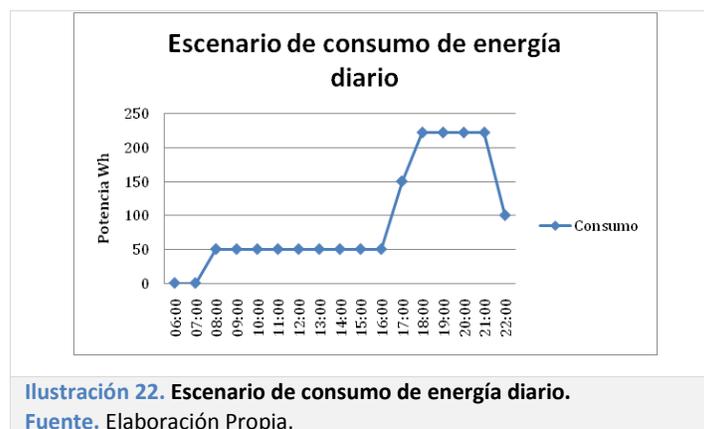
En la Tabla 13, se presenta el escenario de consumo, en el que se indica el tiempo de uso diario de electrodomésticos en un hogar, para satisfacer las necesidades de comunicación, información y entretenimiento, identificadas en la investigación de campo (Ver Anexo B).

Tabla 13. Escenario de consumo de energía en las horas del día.

| Hora        | 06:00 - 08:00 | 08:00 - 10:00 | 10:00 - 12:00 | 12:00 - 14:00 | 14:00 - 16:00 | 16:00 - 18:00 | 18:00 - 20:00 | 20:00 - 22:00 |
|-------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| TV          |               |               |               |               |               | 100           | 100           | 100           |
| Radio       |               | 50            | 50            | 50            | 50            | 50            |               |               |
| Bombillo    |               |               |               |               |               |               | 60            | 60            |
| Bombillo    |               |               |               |               |               |               | 60            | 60            |
| Celular     |               |               |               |               |               |               | 2             | 2             |
| Consumo (W) | 0             | 50            | 50            | 50            | 50            | 150           | 222           | 222           |

Fuente. Elaboración Propia.

Tal como se aprecia en la Ilustración 22, este escenario presenta un uso irregular de los aparatos, con picos de 222 W en las horas de la noche.



A continuación en la Tabla 1 se presenta la demanda energética estimada a partir del escenario de consumo, en la que se indica un consumo máximo de 272 W, y una demanda por hogar de de 1,58 kW al día y 47,64 kW al mes, de acuerdo con las horas de consumo.

Tabla 14. Demanda energética.

| Aparato      | Consumo en potencia (W) | Tiempo de consumo (h) | Wh/día      | kWh/día      | kWh/mes      |
|--------------|-------------------------|-----------------------|-------------|--------------|--------------|
| TV           | 100                     | 6                     | 600         | 0,6          | 18           |
| Radio        | 50                      | 10                    | 500         | 0,5          | 15           |
| 2 Bombillos  | 120                     | 4                     | 480         | 0,48         | 14,4         |
| Celular      | 2                       | 4                     | 8           | 0,008        | 0,24         |
| <b>Total</b> | <b>272</b>              |                       | <b>1588</b> | <b>1,588</b> | <b>47,64</b> |

Fuente. Elaboración Propia.

Considerando que el sistema de generación permite la acumulación de energía y puede operar las 24 horas del día, en la Tabla 15, se estimó la potencia en vatios [W] que el sistema debe entregar para satisfacer la demanda mensual.

Tabla 15. Potencia en W que debe entregar el sistema.

| Tiempo de Operación (h) | 4     | 6     | 8     | 10    | 12    | 14    | 18   | 20   | 24   |
|-------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|
| W                       | 397,0 | 264,7 | 198,5 | 158,8 | 132,3 | 113,4 | 88,2 | 79,4 | 66,2 |

Fuente. Elaboración Propia.

### 3.4 MODELOS ANALÍTICOS BÁSICOS DEL SISTEMA

Los modelos analíticos básicos utilizados para analizar el rotor de acción y el rotor de reacción permitieron calcular los valores indicados en las tablas que se presentan a continuación.

Tabla 16. Análisis dimensional rotor de acción.

| Parámetros constantes en la prueba |       |                      | Parámetros variados en la prueba |       |                     |
|------------------------------------|-------|----------------------|----------------------------------|-------|---------------------|
| g                                  | 9,8   | [m/s <sup>2</sup> ]  | V                                | 0,639 | [m/s]               |
| D                                  | 0,660 | [m]                  | H                                | 0,021 | [m]                 |
| z                                  | 16    | #                    | D <sub>w</sub>                   | 0,580 | [m]                 |
| L                                  | 0,1   | [m]                  | P <sub>e</sub>                   | 1,82  | [m]                 |
| ρ                                  | 1000  | [kg/m <sup>3</sup> ] | η <sub>r</sub>                   | 95%   | #                   |
| Parámetros variados en la prueba   |       |                      | n                                | 20,0  | [rpm]               |
| V                                  | 0,639 | [m/s]                | ω                                | 2,09  | [rad/s]             |
| H                                  | 0,021 | [m]                  | S                                | 0,080 | [m]                 |
| D <sub>w</sub>                     | 0,580 | [m]                  | A                                | 0,008 | [m <sup>2</sup> ]   |
| P <sub>e</sub>                     | 1,82  | [m]                  | Q                                | 0,005 | [m <sup>3</sup> /s] |
| η <sub>r</sub>                     | 95%   | #                    | P <sub>d</sub>                   | 1,04  | [W]                 |
| n                                  | 20,0  | [rpm]                | Peje                             | 0,99  | [W]                 |
| ω                                  | 2,09  | [rad/s]              | τ                                | 0,5   | [Nm]                |
| ε                                  | 0,000 | [m]                  |                                  |       |                     |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 17. Análisis dimensional rotor de reacción.

| Condiciones experimentales Modelo B |       |                      |
|-------------------------------------|-------|----------------------|
| Parámetro                           | Valor | Unidades             |
| D                                   | 0,12  | [m]                  |
| A                                   | 0,011 | [m <sup>2</sup> ]    |
| θ                                   | 20    | [grados]             |
| v                                   | 0,639 | [m/s]                |
| ρ                                   | 1000  | [kg/m <sup>3</sup> ] |
| P <sub>d</sub>                      | 1,386 | [W]                  |
| η <sub>r</sub>                      | 95%   | #                    |
| Peje                                | 1,32  | [W]                  |

Fuente. Elaboración propia.

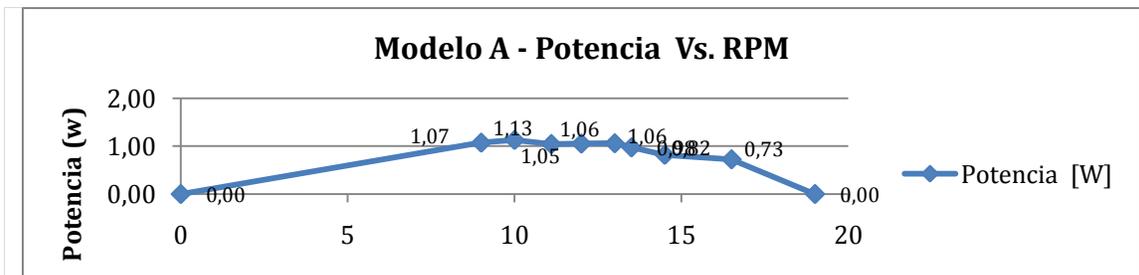
Los análisis dimensionales presentados, se emplearon para construir un modelo para cada tipo de rotor, tal como se aprecia en la Ilustración 23.



El Modelo A corresponde a un rotor de acción con 66 cm de diámetro y 16 aspas con palas sumergibles en policarbonato de 10 cm<sup>2</sup> de área de arrastre, y el Modelo B corresponde a una propela comercial con un área de arrastre similar.

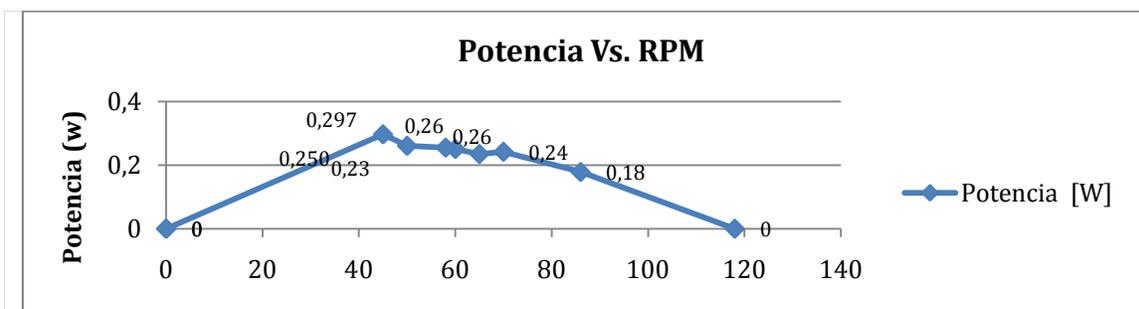
### 3.5 PRUEBAS DE LABORATORIO 1 (MODELOS SIMPLES)

La Ilustración 24, representa los datos obtenidos del análisis experimental del Modelo A



**Ilustración 24. Prueba 1 – Modelo A**  
Fuente. Elaboración Propia.

La Ilustración 25, representa los datos obtenidos del análisis experimental del Modelo B.



**Ilustración 25. Prueba 1 – Modelo B**  
Fuente. Elaboración Propia.

En la Tabla 18 que se presenta a continuación, se hace la comparación de los datos obtenidos experimentalmente y los obtenidos en la prueba.

**Tabla 18.** Valores teóricos y experimentales de la prueba #1

| Parámetro        | Valor Teórico |             | Valor Experimental |             |
|------------------|---------------|-------------|--------------------|-------------|
|                  | R. acción     | R. reacción | R. acción          | R. reacción |
| Potencia eje [W] | 0,99          | 1,32        | 1,13               | 0,3         |

**Fuente.** Elaboración Propia.

Como conclusión de este análisis se determinó que los modelos teóricos se deben perfeccionar de acuerdo con el rotor que se seleccionen, sin embargo se pudo establecer que el rotor de acción tiene mayores ventajas sobre el de reacción ya que para una misma área de arrastre, éste presenta una potencia mayor.

La información de estas pruebas se encuentra con más detalle en el Anexo F.

### 3.6 MATRIZ DE EVALUACIÓN

En la Tabla 19, se describen los criterios de evaluación que se emplearon para seleccionar el tipo de rotor. Estos criterios se establecieron con base en juicios emitidos con expertos (\*) y criterios estimados a partir de la construcción de los modelos de simples y las pruebas realizadas. Éstos además, sirvieron como referencia para determinar las especificaciones parciales de diseño del producto.

**Tabla 19.** Descripción de los criterios de evaluación.

| #   | Valor =1                    | Valor =2                    | Prueba  |
|-----|-----------------------------|-----------------------------|---|
| 1   | Menor relación vol/potencia | Mayor relación vol/potencia | Pruebas de Modelos Simples                    |
| 2*  | Más costoso                 | Menos costoso               | fabricación de modelo (costo)                 |
| 3*  | Menos fácil de hacer        | Más fácil de hacer          | fabricación de modelo (tiempo y maquinas)     |
| 4*  | Menos fáciles de conseguir  | Más fáciles de conseguir    | Fabricación de modelo                         |
| 5*  | Menos fácil                 | Más fácil                   | Fabricación de modelo                         |
| 6*  | Menos fácil                 | Más fácil                   | Fabricación de modelo                         |
| 7   | Menos RPM                   | Más RPM                     | Pruebas de Modelos Simples                    |
| 8   | Mayor Impacto               | Menor Impacto               | Pruebas de Modelos Simples                    |
| 9   | Menos precisos              | Más precisos                | Modelos teóricos                              |
| 10  | Menos fácil de ubicar       | Más fácil de ubicar         | Sesión de grupo                               |
| 11* | Más expuesta                | Menos expuesta              | Fabricación de modelo                         |
| 12  | Se sumerge más              | No se sumerge tanto         | Pruebas de Modelos Simples y Modelos teóricos |
| 13  | Menos fácil                 | Más fácil                   | Pruebas de Modelos Simples y Modelos teóricos |
| 14  | Más pesada                  | Menos pesada                | Fabricación de modelo                         |

**Fuente.** Elaboración propia

A continuación, en la Tabla 20, se presenta las puntuaciones ponderadas, a partir de de las cuales se seleccionó el rotor de acción como el más adecuado para el sistema diseñado.

**Tabla 20.** Matriz de evaluación.

| #            | CRITERIOS DE EVALUACIÓN<br>CRITERIO | %          | T. Impulso |            | T. Reacción |            |
|--------------|-------------------------------------|------------|------------|------------|-------------|------------|
|              |                                     |            | PUNTAJE    | total      | PUNTAJE     | total      |
| 1            | VOLUMEN/POTENCIA                    | 10         | 2          | 20         | 1           | 10         |
| 2            | PROFUNDIDAD DEL RÍO                 | 12         | 2          | 24         | 1           | 12         |
| 3            | MANUFACTURA                         | 8          | 2          | 16         | 1           | 8          |
| 4            | PARTES Y REPUESTOS                  | 10         | 2          | 20         | 1           | 10         |
| 5            | MANTENIMIENTO                       | 10         | 1          | 10         | 2           | 20         |
| 6            | RESISTENCIA A RESIDUOS              | 11         | 2          | 22         | 1           | 11         |
| 7            | RPM                                 | 8          | 1          | 8          | 2           | 16         |
| 8            | MEDIO AMBIENTE                      | 3          | 2          | 6          | 1           | 3          |
| 9            | CÁLCULOS                            | 2          | 1          | 2          | 2           | 4          |
| 10           | POSICIÓN DEL GENERADOR              | 5          | 2          | 10         | 1           | 5          |
| 11           | RIESGOS                             | 7          | 2          | 14         | 1           | 7          |
| 12           | COSTO                               | 8          | 2          | 16         | 1           | 8          |
| 13           | INSTALACIÓN                         | 6          | 2          | 12         | 1           | 6          |
| 14           | PESO                                | 5          | 1          | 5          | 2           | 10         |
| <b>total</b> |                                     | <b>100</b> |            | <b>185</b> |             | <b>130</b> |

**Fuente.** Elaboración propia.

### 3.7 ESPECIFICACIONES DE DISEÑO

La Tabla 21 presenta un listado de las especificaciones de diseño parciales, ordenadas según la importancia asignada por el equipo de desarrollo del proyecto, tomando como referencia la información obtenida en los métodos aplicados en la fase explorar.

**Tabla 21.** Especificaciones en orden de importancia

| # | ESPECIFICACIÓN  | ORIGEN                      |
|---|---|-----------------------------|
| 1 | El producto opera con normalidad en áreas de río con profundidad media menor a 0,7 m.           | Análisis hidrológico        |
| 2 | El producto genera energía en ríos con velocidad mayor a 1 m/s                                  | Análisis hidrológico        |
| 3 | El producto tiene una potencia efectiva mayor a 1,6 kW/día                                      | Escenario de consumo        |
| 4 | Posee materiales resistentes al agua y al sol.  | Conversaciones con expertos |
| 5 | Para realizar el mantenimiento no es necesario el uso de herramientas y equipos especializados. | Conversaciones con expertos |
| 6 | El producto está dirigido a personas no interconectadas a la red eléctrica, vecinas al río.     | Descripción del contexto    |
| 7 | El peso máximo del producto es de 100 kilogramos  | Conversaciones con expertos |

|    |  |   |
|----|--|---|
| 8  | Los componentes eléctricos del producto están aislados del agua.   | Conversaciones con expertos                                 |
| 9  | El producto posee un sistema de instalación que le permite ser ubicado fácilmente en el río.                         | Trabajo de campo-entrevistas                                |
| 10 | Las partes móviles del producto están protegidas.  | Conversaciones con expertos                                 |
| 11 | Los componentes, materiales y procesos de fabricación del producto son de fácil consecución en la industria nacional | Trabajo de campo-entrevistas                                |
| 12 | Las reparaciones del producto se pueden realizar en talleres locales.  | Trabajo de campo-entrevistas                                |
| 13 | El tamaño máximo del sistema es de 3,5x2x1 m   | Conversaciones con expertos                                 |
| 14 | La operación del producto no se ve afectada ante el paso de residuos como: hojas, basura y pequeños peces.           | Conversaciones con expertos<br>Trabajo de campo-entrevistas |
| 15 | Para la instalación y mantenimiento el producto requiere mínimo 4 personas.  | Conversaciones con expertos                                 |
| 16 | El producto no interfiere con en el desarrollo normal de la fauna y flora del rio y su rivera                        | Conversaciones con expertos                                 |
| 17 | El costo kilovatio entregado es menor a 10 USD   | Estado del arte   |
| 18 | El producto será ubicado en la rivera del rio.   | Estado del arte   |

Fuente. Elaboración Propia

### 3.8 ANÁLISIS FUNCIONAL

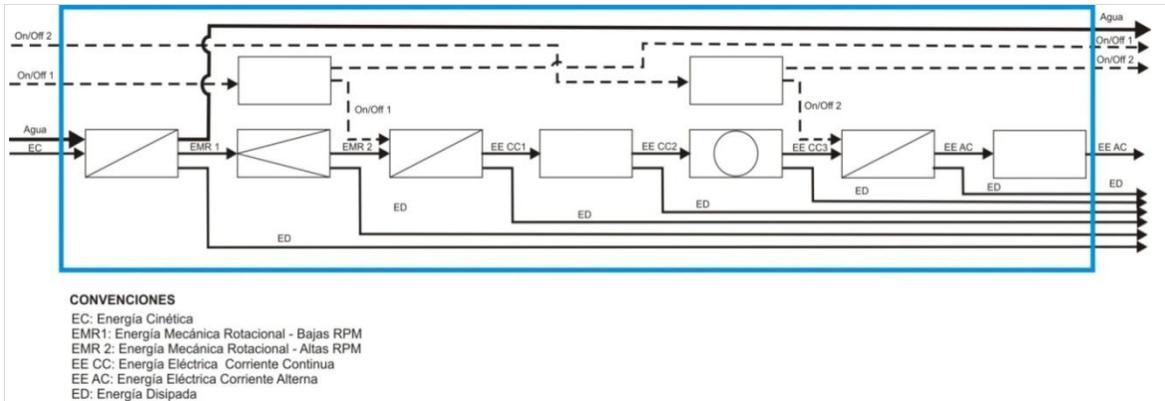
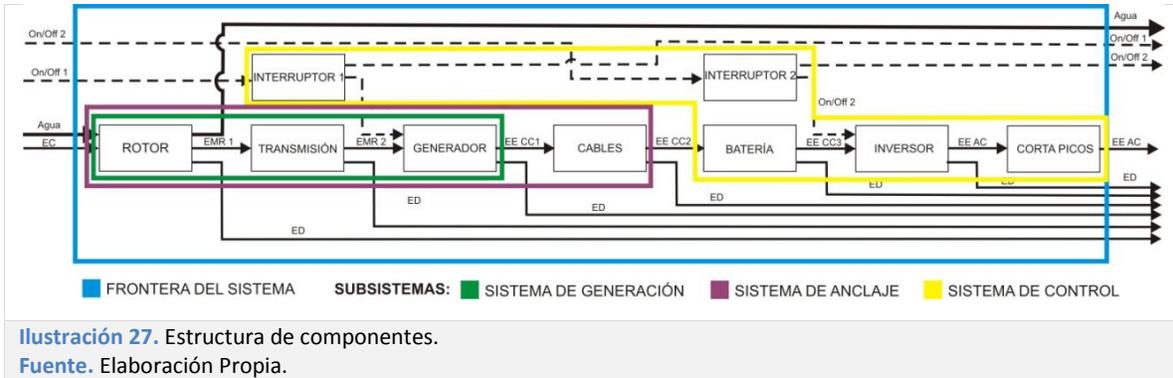


Ilustración 26. Estructura Funcional.

Fuente. Elaboración Propia.

La ilustración 26 presenta la estructura funcional del sistema, en la que se identificaron los flujos de entrada y de salida, y el proceso de transformación de energía al interior del sistema, considerando la simbología propuesta por Pahl & Beitz. Complementario a esto, en la ilustración se presentan los portadores de cada función, a partir de lo cual se

identificaron los componentes del sistema y el orden en que estos se relacionan. En el Anexo L se encuentra mayor información sobre la síntesis funcional del sistema.



### 3.9 MATRIZ MORFOLÓGICA

En la Ilustración 28 se presenta la matriz morfológica desarrollada para el proceso de síntesis funcional. En ella se encuentran algunos productos relacionados en el estado del arte, correspondientes a componentes tales como el sistema de anclaje, el rotor, la transmisión y el generador.

Asimismo se presentan cinco rutas factibles que se consideraron en la generación de alternativas de diseño.

| Función  | Ubicar en el río    | Transformar EC en EM        | Transmitir EM   | Transformar EM en EE               |
|----------|---------------------|-----------------------------|-----------------|------------------------------------|
| Portador |                     |                             |                 |                                    |
| 1        | Fijo al suelo       | Rueda hidráulica doble      | Polea en V      | Alternador                         |
| 2        | Cilindros flotantes | Rueda rotomoldeada flotante | Cadena          | Alternador modificado DC           |
| 3        | Anclado abatible    | Pala cóncava                | Directa         | Motor CC                           |
| 4        |                     | Pala abatible               | Poleas dentadas | Generador AC fabricado a la medida |
| 5        |                     | Pala alternada              |                 |                                    |

● Ruta factible 1  
● Ruta factible 2  
● Ruta factible 3  
● Ruta factible 4  
● Ruta factible 5

Ilustración 28. Matriz morfológica.  
 Fuente. Elaboración Propia. Fuente de las imágenes: Google.

La **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, presentan las alternativas generadas conforme a las rutas factibles identificadas previamente.

A partir de esta exploración se identificaron variables de diseño por resolver tales como:

- Diseño de detalle del rotor: diámetro, longitud número de palas, posición, geometría.
- Selección de la transmisión y generador de acuerdo con las características del rotor.
- Sistema de soporte para integrar los componentes.
- Sistema de anclaje para ubicar el sistema en el río.

En consecuencia con lo anterior, se realizaron las sesiones de lluvia de ideas que se exponen en el Anexo-D en donde se estudiaron los diferentes componentes y se dio inicio al diseño de detalle del sistema.

### 3.10 CONDICIONES DE OPERACIÓN PARA EL SISTEMA

La frontera del sistema enmarcada en la Ilustración 27, permite estimar unas condiciones de operación para el sistema que se ven afectadas por la relación entre componentes y la relación de estos con el flujo fuente de energía.

El sistema de hidrocínético de generación requiere para su funcionamiento estar ubicado en el río, expuesto a la intemperie y a condiciones variables tales como: crecientes repentinas, residuos y diferentes niveles de profundidad. Estos factores señalan las condiciones de operación para el sistema, bajo las cuales los componentes están expuestos permanentemente al contacto con el agua y en general, el sistema corre el riesgo de ser afectado por el río.

Los riesgos identificados con base en las alternativas de diseño presentadas en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** y con ayuda de expertos, se listan en la Tabla 22. En ésta indica además la respuesta a dichos riesgos, lo cual fue tenido en cuenta para el proceso de diseño a nivel de componentes.

**Tabla 22.** Riesgos por condiciones de operación para el sistema.

| Componente            | Riesgo   | Respuesta   |
|-----------------------|--|---|
| Rotor                 | daño por impacto con residuos del río                  | Elemento para desviar residuos grandes<br>Materiales resistentes al impacto |
|                       | daño por contacto permanente con el agua               | Materiales resistentes a la corrosión                                       |
|                       | Desajuste en el ensamble                               | elementos de sujeción y acoples adecuados                                   |
| Trasmisión            | Desgaste de bandas rozamiento, deslizamiento, fricción | Ubicar adecuadamente el sistema de poleas                                   |
|                       | Daño por humedad o contacto con el agua                | Ubicar en compartimiento impermeabilizado                                   |
| Generador             | Daño por humedad o contacto con el agua                | Ubicar en compartimiento impermeabilizado                                   |
|                       | daño por contacto permanente con el agua               | Materiales resistentes a la corrosión                                       |
| Soporte               | daño por impacto con residuos del río                  | Materiales resistentes al impacto   |
|                       |  | Ubicación del sistema   |
| Sistema de anclaje    | daño por creciente del río                             | Materiales resistentes a la corrosión                                       |
|                       | daño por impacto con residuos del río                  | Materiales resistentes al impacto   |
| Sistema de generación | perdida el sistema por creciente del río               | Sistema de anclaje resistente a posibles crecientes del río                 |
| Cables                | Daño por conducir altas potencias                      | Cable dimensionado según la potencia  |
| Baterías              | Se sulfatan por la humedad                             | Ubicar en compartimiento impermeabilizado                                   |
|                       | se puede derramar el ácido por calentamiento           | Emplear instrumentos de medición para detectar sobrecargas                  |
| Inversor              | daño por exceso de corriente en aparatos eléctricos    | Indicar el nivel de corriente máxima que soporta                            |
| Sistema de control    | daño en los instrumentos de medición                   | Ubicar en compartimiento impermeabilizado                                   |

Fuente. Elaboración Propia.

### 3.11 DISEÑO DEL ROTOR

El proceso de diseño de detalle del rotor se dividió en las siguientes fases: (1) fase analítica para dimensionar el rotor, (2) Diseño de la pala, (3) construcción de modelo funcional del rotor y (4) Validación del modelo analítico por medio de pruebas de campo.

#### 3.11.1 Modelo analítico del rotor

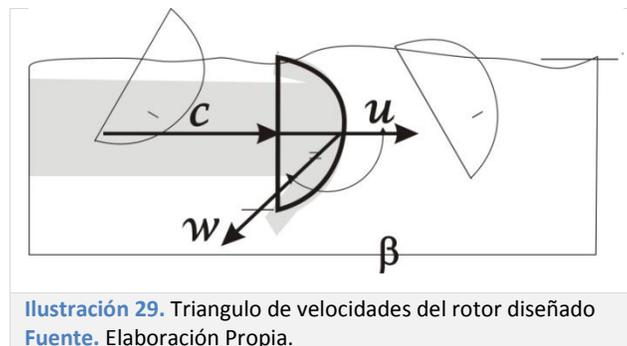
Como resultado del estudio realizado en el método analítico presentado en el Anexo E, a continuación se expone el modelo analítico, basado en los modelos de ruedas Pelton y rotores de acción propuestos por los autores (Fernandez, 2008), (Munson, Young, Okiishi, & Huebsch, 2009), (White, 2003), (Maldonado, 2005) y (Behrens, 2005).

Es importante aclarar que para el análisis se asume una situación ideal, en la que no se consideran variables dinámicas que podrían hacer más complejo el análisis, para esto se estudia el fenómeno en 2D, presentado en la Ilustración 30, y se simplifican las variables

para determinar los puntos máximos de eficiencia. Además, para este modelo analítico se consideró, tal como lo indican los autores, que los resultados hallados son aproximaciones relevantes que describen el fenómeno, pero en la práctica pueden llegar a variar e incluso ser inexactos.

En este orden de ideas, para estudiar la turbo máquinas se analizan fenómenos de régimen permanente con velocidad de rotación y caudal constante (Fernandez, 2008). Sin embargo para puntos de potencia máxima se analiza el fenómeno de régimen transitorio. Esto es debido a que el torque en el rotor varía en función de la fuerza electromotriz<sup>2</sup>, es decir a mayor consumo de energía mayor es el torque o carga en el eje del rotor, por lo que el intercambio de energía entre el fluido y el rotor varía en función de dicha fuerza.

Por otro lado, el estudio de la turbo máquinas parte del estudio del movimiento del agua, para lo cual se utilizó una nomenclatura universal que define los triángulos de velocidades, que se muestra en la Ilustración 29

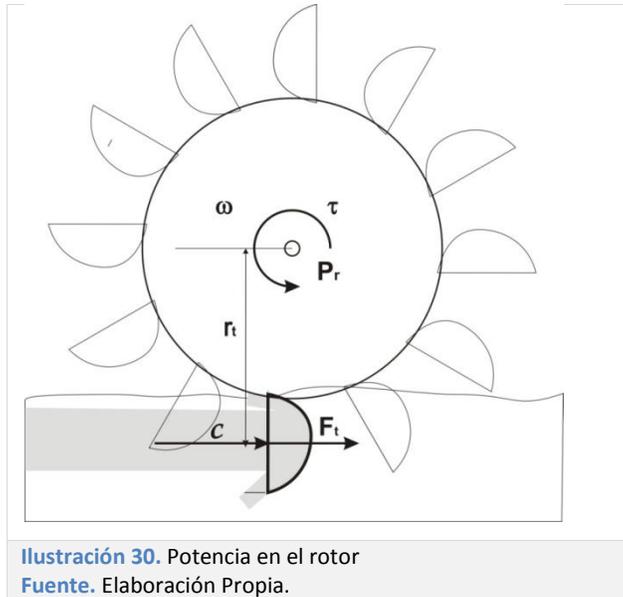


La potencia hidráulica  $P_h$  disponible en el fluido está dada por la velocidad absoluta  $c$  con que el agua penetra en el rotor, la velocidad relativa  $w$  que al salir forma un ángulo  $\beta$ , con la velocidad tangencial  $u$ , la velocidad relativa es tangente al alabe en todo momento.

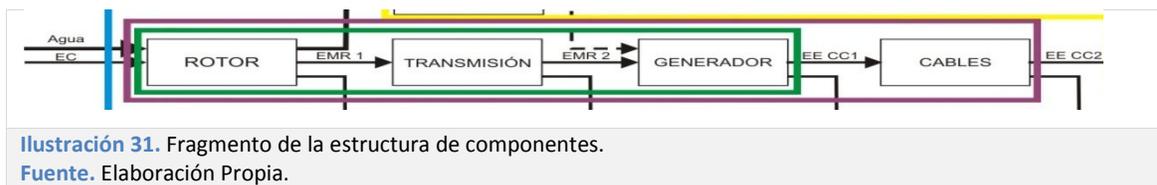
---

<sup>2</sup> La fuerza electromotriz (FEM) (Representado con el símbolo griego  $\xi$ ) es toda causa capaz de mantener una diferencia de potencial entre dos puntos de un circuito abierto o de producir una corriente eléctrica en un circuito cerrado. Es una característica de cada generador eléctrico. Se define como el trabajo que el generador realiza para pasar por su interior la unidad de carga positiva del polo negativo al positivo. (Fuerza electromotriz:Wikipedia)

Tal como se aprecia en la Ilustración 30, al penetrar en el rotor, el agua ejerce una fuerza de trabajo  $F_t$ , la cual, por ser aplicada en el radio de trabajo  $r_t$  se produce un torque  $\tau$  en el eje del rotor. Esto además, permite que el rotor gire a con una velocidad angular  $\omega$ , y del producto del torque y la velocidad angular se obtiene una potencia mecánica rotacional a la salida del rotor  $P_r$ .



De esta manera, el inicio del proceso de transformación de energía, tiene lugar en el rotor, a partir del cual la energía se transmite y se transforma hasta llegar a ser energía eléctrica, tal como se aprecia en la Ilustración 31.



Para cuantificar los flujos de energía presentes en el proceso de transformación, los autores proponen las ecuaciones que se presentan a continuación:

La potencia cinética disponible en el agua ( $P_h$ ), se conoce como:

$$P_h = \frac{1}{2} \rho A C^3 \quad [W]$$

**Ecuación 1.** Potencia hidráulica.

Donde  $\rho$  es la densidad del agua [kg/m<sup>3</sup>] y A es el área de control [m]

Por otro lado la potencia del rotor  $P_r$ , se expresa como el producto de la fuerza del agua F por la velocidad tangencial  $u$ , tal como se demuestra a continuación:

$$F = \rho Q (c_1 - u) (1 - \cos\beta) \quad [\text{N}]$$

**Ecuación 2. Fuerza en la pala.**

Y dado que  $P = F u$ , se obtiene:

$$P_r = \rho Q u (c_1 - u) (1 - \cos\beta) \eta_r \quad [\text{W}]$$

**Ecuación 3. Potencia del rotor**

Donde  $\eta_r$  es la eficiencia del rotor.

A partir de la Ecuación 3, se estiman los valores de potencia en la transmisión  $P_t$  y potencia en el generador  $P_g$  en función de la potencia del rotor  $P_r$ :

$$P_{tr} = P_r \eta_{tr} \quad [\text{W}]$$

**Ecuación 4. Potencia de la transmisión**

$$P_g = P_{tr} \eta_g \quad [\text{W}]$$

**Ecuación 5. Potencia del generador**

Donde  $\eta_{tr}$  es la eficiencia de la transmisión y  $\eta_g$  es la eficiencia del generador.

En conclusión la potencia efectiva del sistema  $P_e$  se expresa:

$$P_e = \rho Q u (c_1 - u) (1 - \cos\beta) \eta_t \quad [\text{W}]$$

**Ecuación 6. Potencia efectiva**

Donde  $\eta_T$  es la eficiencia total del sistema:

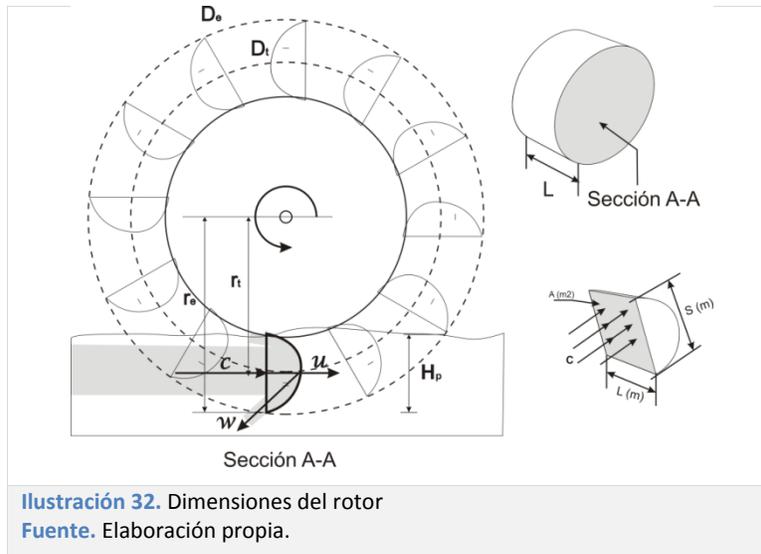
$$\eta_T = \eta_r \eta_{tr} \eta_g$$

**Ecuación 7. Eficiencia total**

En este orden de ideas, la potencia efectiva  $P_e$  a la salida del sistema está determinada por: (1) la manera que el rotor aproveche la potencia disponible en el agua, (2) las eficiencias de los demás componentes del sistema. Por esta razón, para cuantificar los flujos de energía presentes en el proceso, el modelo analítico se dividió en dos fases: (1) Dimensiones del Rotor y (2) Rotor en movimiento.

- Dimensiones del rotor

Las variables relacionadas con las dimensiones del rotor, que se presentan en la Ilustración 32, se estimaron en función de la velocidad absoluta  $C$ . Para esto, se determinaron los valores de entrada del modelo analítico que se presentan en la Tabla 23.



**Tabla 23.** Valores de entrada del modelo analítico.

| Parámetro  | Unidades                                | Descripción                                | Valor |
|------------|---|--|-------|
| $c$        | [m/s]                                   | Velocidad absoluta del fluido <sup>3</sup> | 1,5   |
| $C_{\min}$ | [m/s]                                   | Velocidad mínima                           | 1,5   |
| $C_{\max}$ | [m/s]                                   | Velocidad máxima                           | 2     |
| $g$        | [m/s <sup>2</sup> ]                     | Coficiente de gravedad                     | 9,8   |
| $\rho$     | [kg/m <sup>3</sup> ]                    | Densidad del Agua                          | 1000  |
| $\gamma$   | [kg/m <sup>3</sup> ][m/s <sup>2</sup> ] | Peso específico del agua                   | 9800  |

**Fuente.** Elaboración propia.

A partir de estos datos se estimaron las ecuaciones que se describen en la Tabla 24, en su orden de presentación. Una descripción más detallada de estas ecuaciones se encuentra en el Anexo E.

<sup>3</sup> Los valores de velocidad se asumieron con base en el análisis hidrológico (Ver Anexo B) y estimativos de las pruebas de campo (Ver Anexo F)

**Tabla 24. Dimensiones del rotor.**

|                       | Parámetro        | Ecuación                                   | Unidades                                | Descripción   | Valor  | Ecuación |
|-----------------------|------------------|--|---|---|--------|----------|
| Dimensiones del rotor | H                | $H = \frac{C_1^2}{2g}$                     | [m]                                     | Cabezal de presión (dinámico)                             | 0,1148 | 1        |
|                       | H <sub>p</sub>   | $H_p = \frac{((C_{max}+C_{min})/2)^2}{2g}$ | [m]                                     | Cabezal de presión medio                                  | 0,16   | 2        |
|                       | H <sub>max</sub> | $H_{max} = \frac{C_{max}^2}{2g}$           | [m]                                     | Cabezal de presión máximo                                 | 0,20   | 3        |
|                       | S                | S=H <sub>p</sub>                           | [m]                                     | Longitud sumergida  | 0,16   | 4        |
|                       | D                | D=5H <sub>p</sub>                          | [m]                                     | Diametro externo del rotor                                | 0,8    | 5        |
|                       | re               | r=D/2                                      | [m]                                     | Radio externo   | 0,4    | 6        |
|                       | rt               | Dato de entrada                            | [m]                                     | Radio de trabajo<br>Centro de masa del volumen de control | 0,3    |          |
|                       | Dt               | Dt=2rt                                     | [m]                                     | Diametro de trabajo                                       | 0,6    | 7        |
|                       | Pet              | Pet=Dt π                                   | [m]                                     | Perimetro de trabajo                                      | 1,95   | 8        |
|                       | Pe               | Pe=D π                                     | [m]                                     | Perimetro   | 2,45   | 9        |
|                       | z                | z=Pe/H <sub>max</sub>                      | [#]                                     | Número de palas   | 12     | 10       |
| L                     | Dato de entrada  | [m]  | Longitud del rotor                      | 1,22  |        |          |
| A                     | A= S*L           | [m <sup>2</sup> ]                          | Área de la pala (superficie de control) | 0,195   | 11     |          |

Fuente. Elaboración propia.

Aparte de lo anterior, la longitud (L) es la variable que define el área de control y por lo tanto la potencia que el rotor puede entregar (Behrens, 2005). Por esta razón, en la Tabla 25 se presentan los diferentes valores de longitud estimados según las horas de operación que la turbina debe tener para satisfacer la demanda energética para la cual está diseñada (Ver Tabla 1)

Para esto se asumieron los menores valores de eficiencia indicados en la Tabla 26, tomando los valores más críticos presentados en el método analítico.

**Tabla 25. Estimación de la longitud del rotor.**

| Tiempo de Operación (h) | Potencia (Wh/día) | Área (m <sup>2</sup> )<br>$A = \frac{2P}{\rho C^3 \eta_t}$ | Longitud (m) |
|-------------------------|-------------------|--|--------------|
| 4                       | 397               | 1,20   | 7,49         |
| 6                       | 264,7             | 0,80   | 4,99         |
| 8                       | 198,5             | 0,60   | 3,74         |
| 10                      | 158,8             | 0,48   | 3,00         |
| 12                      | 132,3             | 0,40   | 2,50         |
| 14                      | 113,4             | 0,34   | 2,14         |
| 18                      | 88,2              | 0,27   | 1,66         |
| 20                      | 79,4              | 0,24   | 1,50         |
| 24                      | 66,2              | 0,20   | 1,25         |

Fuente. Elaboración propia.

De acuerdo con lo anterior, se seleccionó el escenario de operación de 24 horas con una longitud  $L=1,25$  m, con la cual, teóricamente es posible alcanzar una potencia diaria 1,58 kWh/día con una potencia efectiva,  $P_e = 66,2$  (Wh). Esta decisión responde principalmente a las especificaciones de diseño de producto en cuanto al tamaño, ya que para menores horas de operación el rotor sería relativamente largo.

- Análisis dimensional del rotor en movimiento

En esta fase se estimaron los valores indicados en la Tabla 27, los cuales son estimaciones teóricas de velocidades, fuerzas, torque y potencia mecánica máxima de un rotor con las dimensiones estimadas en la Tabla 24.

Por otro lado, estas expresiones analíticas permitieron estimar diferentes valores teóricos de potencia en función de las variaciones de la velocidad tangencial  $u$ , que permitieron construir la curva de potencia del rotor (Ver numeral 3.11.4)

Para dichas estimaciones se asumieron los valores de eficiencias de la Tabla 26

Tabla 26. Eficiencias del sistema.

| Parámetro   | Descripción                  | Cálculo |
|-------------|------------------------------|---------|
| $C_v$       | Coeficiente de velocidad     | 95%     |
| $\eta_T$    | Eficiencia del sistema       | 20%     |
| $\eta_r$    | Eficiencia del rotor         | 33%     |
| $\eta_{tr}$ | Eficiencia de la transmisión | 85%     |
| $\eta_g$    | Eficiencia del generador     | 70%     |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 27. Análisis dimensional del rotor en movimiento.

|                                  | Parámetro                | Ecuación   | Unidades                               | Descripción   | Valor  |
|----------------------------------|--------------------------|--|--|---|--------|
| Análisis del rotor en movimiento | $n_r$                    | $n = 60 c_1 / P_{et}$                            | [rpm]                                  | Revoluciones por minuto reales (libre)              | 46     |
|                                  | $n_e$                    | $n = 60 c \eta_r / P_{et}$                       | [rpm]                                  | Revoluciones por minuto experimentales (libre)      | 44     |
|                                  | $\omega$                 | $\omega = n \pi / 30$                            | [rad/s]                                | Velocidad angular                                   | 4,84   |
|                                  | $c$                      | $c = \omega r_t$                                 | [m/s]                                  | Velocidad absoluta del fluido                       | 1,50   |
|                                  | $u_{@maxP}$              | $u = \frac{c_1}{2}$                              | [m/s]                                  | Velocidad tangencial en el punto de máxima potencia | 0,75   |
|                                  | $\alpha$                 | $0 < \alpha < 1$                                 | [-]                                    | Factor de relación                                  | 0,50   |
|                                  | $u$                      | $u = C \alpha$                                   | [m/s]                                  | Velocidad tangencial                                | 0,75   |
|                                  | $w$                      | $w = c - u$                                      | [m/s]                                  | Velocidad relativa                                  | 0,75   |
|                                  | $Q$                      | $Q = A c$  | [m <sup>3</sup> /s]                    | Caudal disponible                                   | 0,293  |
|                                  | $T$                      | $T = F_e r_e$ ó $T = F_t r_t$                    | [Nm]                                   | Torque  | 54,92  |
|                                  | $F_e$                    | $F_e = \rho A c (c - u) (1 - \cos \beta) \eta_r$ | [N]                                    | Fuerza en el extremo de la pala                     | 140,6  |
|                                  | $F_t$                    | $F_t = F_e \frac{r_e}{r_t}$                      | [N]                                    | Fuerza de trabajo                                   | 177,2  |
|                                  | $C_s$                    | $1 < (1 - \cos \beta) < 2$                       | [-]                                    | Coefficiente de salida del fluido, para $\beta=160$ | 1,94   |
|                                  | $P_d$                    | $P_d = \frac{1}{2} \rho A c^3$                   | [W]                                    | Potencia disponible en el agua                      | 329,4  |
|                                  | $P_r$                    | $P_r = F_t u C_v$                                | [W]                                    | Potencia a la salida del rotor                      | 126,52 |
| $P_{tr}$                         | $P_{tr} = P_r \eta_{tr}$ | [W]  | Potencia a la salida de la transmisión | 107,54  |        |
| $P_g$                            | $P_g = P_{tr} \eta_g$    | [W]  | Potencia a la salida de la transmisión | 75,28   |        |

Fuente. Elaboración propia.

Para éste análisis se tomaron como referencia las Ecuaciones 1 a 7, presentadas anteriormente. Sin embargo se hicieron algunas modificaciones y se incluyeron nuevos términos, tales como: revoluciones reales  $n_r$ , revoluciones experimentales  $n_e$ , fuerza externa  $F_e$ , fuerza de trabajo  $F_t$  y la relación entre radios: radio de trabajo  $r_t$  y radio externo  $r_e$ . Esto se hizo a partir del proceso de validación del modelo analítico con las pruebas de laboratorio y de campo (Ver Anexo F), con el fin de ajustar el modelo analítico con los datos obtenidos experimentalmente. Por esta razón es preciso aclarar que los términos que se exponen a continuación aunque describen el fenómeno aun no están completamente validados.

- Momento angular

Se estimó el torque como un producto entre radio de trabajo  $r_t$  por la fuerza de trabajo  $F_t$ , o como el producto del radio de trabajo  $r_e$  por la fuerza en el extremo de la pala  $F_e$ .

Tal como se aprecia en la Tabla 27.

- Fuerza al extremo de pala

En modelo analítico del rotor diseñado se definió la potencia del rotor como:

$$P_r = \rho Q u (c_1 - u) (1 - \cos\beta) \quad [W]$$

De la cual se derivó a siguiente ecuación: Ecuación 1. Potencia en el rotor

$$F = \rho Q (c_1 - u) (1 - \cos\beta) \quad [N]$$

Por medio del método experimental (ver Anexo F), se estimó que esta ecuación podría equivaler a la fuerza que se hace al extremo de la pala  $F_e$ . Además se incluyo el coeficiente de eficiencia  $\eta_r$  del rotor. Entonces:

$$F_e = \rho Q (c_1 - u) (1 - \cos\beta) \eta_r \quad [N]$$

#### Ecuación 8. Fuerza externa

- Fuerza de trabajo

Considerando como datos históricos, los obtenidos en las pruebas, se encontró la relación entre las fuerzas al extremo de la pala y la fuerza de trabajo, expresada como una relación entre los radios<sup>4</sup>. Esto se obtiene al igualar las ecuaciones de torque (Ver Tabla 27)

$$F_t = F_e r_e / r_t \quad [N]$$

$$F_t = \rho A c (c - u) (1 - \cos\beta) \eta_r \frac{r_e}{r_t}$$

#### Ecuación 9. Fuerza de trabajo [N].

<sup>4</sup> Esta ecuación no está totalmente verificada y hasta el momento solo se aplico para las pruebas realizadas.

De esta manera, se indican la importancia del coeficiente de salida del fluido  $C_s$ . Debido a que la fuerza depende del ángulo de salida  $\beta$ , el cual puede tener valores entre 90 y 160. Además, dicho ángulo influye notablemente en la forma de la pala. (Para ampliar la información ver Anexo E)

- Potencias del sistema:

La estimación de potencia mecánica se realizó por medio de la siguiente expresión:

$$P_r = F_t u C_v$$

**Ecuación 10. Potencia del rotor [W].**

Que con la ecuación Ecuación 9 se expresa como:

$$P_r = \rho A C u (c - u) (1 - \cos \beta) \eta_r C_v \frac{r_e}{r_t}$$

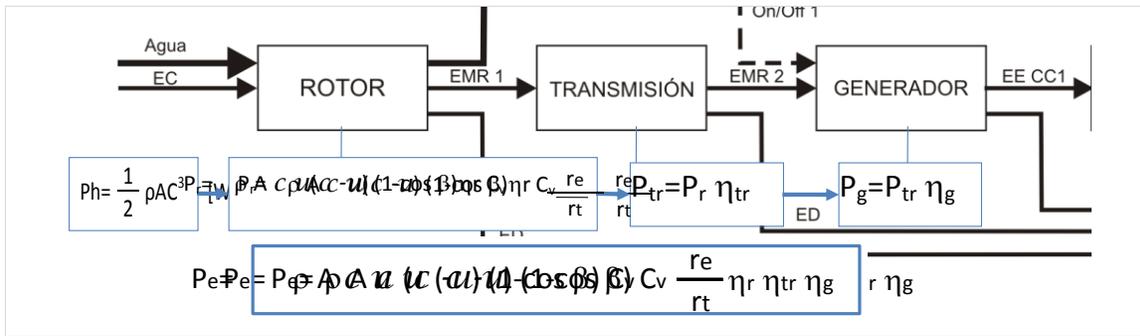
**Ecuación 11. Potencia del rotor [W].**

Conocida esta ecuación, para estimar la potencia a la salida de la transmisión y a la salida del generador se incluyeron los coeficientes de eficiencia respectivos (Ver Tabla 26). De ahí que la potencia efectiva del sistema  $P_e$  se expresa como:

$$P_e = \rho A C u (c - u) (1 - \cos \beta) C_v \frac{r_e}{r_t} \eta_r \eta_{tr} \eta_g$$

**Ecuación 12. Potencia efectiva [W].**

Considerando los análisis efectuados hasta el momento, en la Ilustración 33 se presenta la incorporación de expresiones analíticas – propias de cada flujo- en la estructura funcional del sistema. Esto con el fin de dar cuenta de las propiedades y la manera como pueden ser estimadas las magnitudes de los flujos de energía al paso por los diferentes componentes del sistema.



**Ilustración 33.** Estructura funcional con expresiones analíticas.  
**Fuente.** Elaboración propia.

### 3.11.2 Diseño de la pala

- Número de palas y grados de libertad

En el proceso de generación de alternativas se consideró la opción de incluir palas abatibles, es decir que giraran en si propio eje (un grado de libertad más). (Ver Anexo D- Sesión 2 y 3).

Para demostrar esto experimentalmente se construyó un modelo con las dimensiones obtenidas el modelo analítico del rotor diseñado, tal como se puede apreciar en la Ilustración 35.



**Ilustración 34.** Prueba #2. Palas del rotor de acción.  
**Fuente.** Elaboración propia.

En la siguiente tabla se presentan los valores de fuerza estimados para diferentes escenarios de palas sumergidas.

Tabla 28. Prueba #2- Número de palas

| # palas sumergidas     | 3                 | 2                   | 2                   | 1                   |
|------------------------|-------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Escenario              | 1                 | 2                   | 3                   | 4                   |
| Imagen                 |                   |                     |                     |                     |
| Fuerza Dinamómetro (N) | Min. 2,4<br>Max 3 | Min. 2,4<br>Max 2,6 | Min. 0,8<br>Max 1,4 | Min. 1,4<br>Max 1,6 |
| Torque (Nm)            | 0,72<br>0,9       | 0,72<br>0,78        | 0,24<br>0,42        | 0,42<br>0,48        |
| Fuerza Pala (N)        | 2,22<br>2,77      | 2,22<br>2,40        | 0,74<br>1,29        | 1,29<br>1,48        |

Fuente .Elaboración propia.

A partir de lo anterior se concluyó que es posible obtener mayor fuerza en el rotor de palas fijas (sin grados de libertad), además esto permitió verificar que el número de palas estimado analíticamente es adecuado (12 palas). Para ampliar información ver Anexo F.

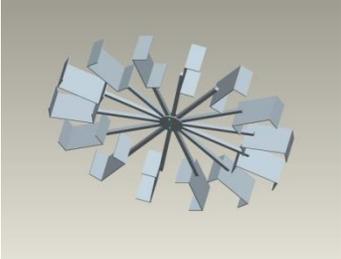
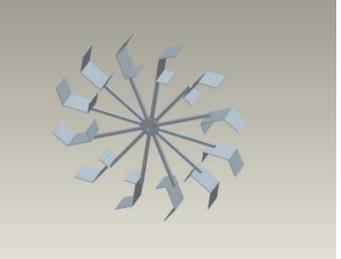
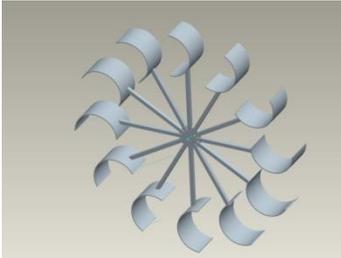
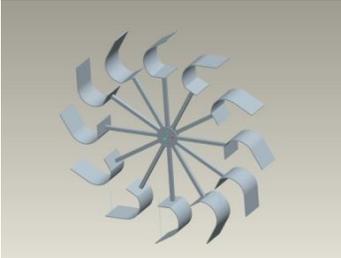
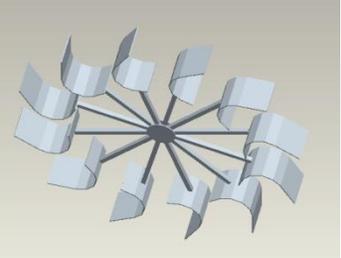
- Definición del perfil

En el modelo analítico del rotor diseñado se resalta la importancia de un ángulo  $\beta$  entre 90 y 160 grados, el cual indica la conveniencia de una forma cóncava para el perfil de la pala.

A partir de esto, se realizó un proceso iterativo entre simulaciones CAE (Ver Anexo J) y generación de ideas (Ver Anexo D-Sesión 4).

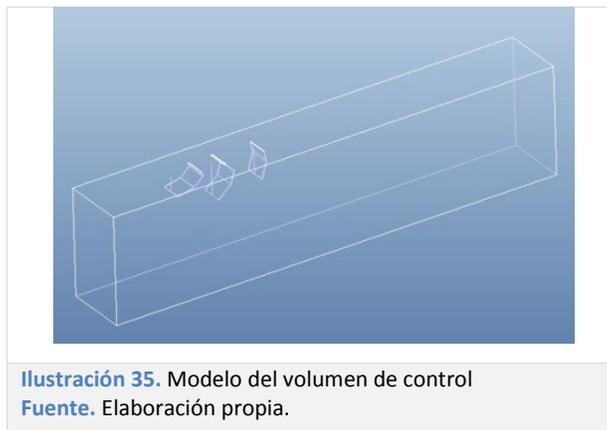
En la Tabla 29 se enseñan algunos de los modelos desarrollados para la simulación. Estos modelos de rotores de acción simplificados corresponden a modelos CAD .prt, los cuales fueron dimensionados siguiendo el modelo analítico sugerido previamente, y cuya forma responde a los perfiles con mayores coeficientes de arrastre (ver Anexo D- Sesión 3).

Tabla 29. Modelos CAD para simulaciones CAE

| Modelos CAD para Simulaciones   |   |   |
|---|---|---|
| 2. Pala recta   | 3. Pala en C  | 4. Pala en C con ángulo   |
|  |  |  |
| 7. Pala curva   | 8. Pala curva con ángulo  | 12. Facetada  |
|  |  |  |

Fuente. Elaboración propia.

Para las simulaciones CAE en módulo de fluidos de Ansys fue necesario crear un modelo CAD (.iges), con las características del volumen de control deseadas: (1) dimensiones similares al canal de agua del laboratorio (2) la ubicación de las palas en una posición estacionaria. Para cada tipo de perfil presentado en la Tabla 29, se desarrolló un modelo .iges, en la Ilustración 37 se muestra el ejemplo para el modelo #12, que indica la parte de las palas sumergidas en el volumen de control.



Como dato de entrada se indicó  $v = 0,526$  m/s, con el fin de simular las condiciones similares a las pruebas de laboratorio #2 (Ver Anexo F).

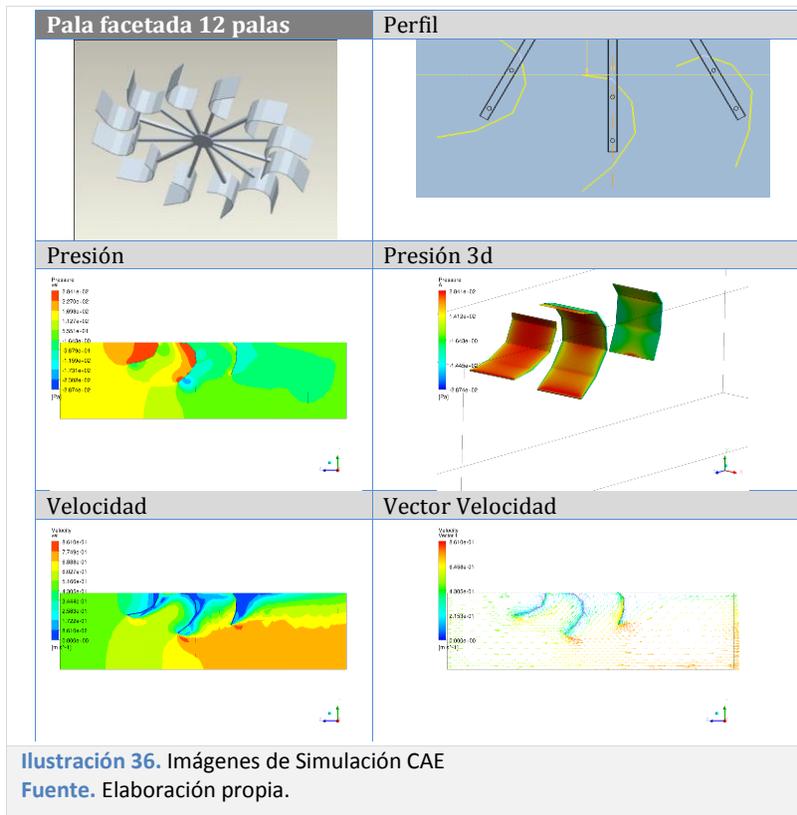
Como resultado de la simulación se obtuvieron los valores de fuerza de reacción y la velocidad en cada pala de cada modelo. La Tabla 30 muestra los resultados de fuerza promedio del total de palas sumergidas. En el caso de los modelos 10 y 11, los cuales tienen 14 y 16 palas respectivamente, los valores de fuerza son mayores, sin embargo presentan valores de fuerza puntual negativos, por lo que se descartó su utilización. En el Anexo J, se muestra en detalle los resultados obtenidos.

**Tabla 30.** Resultados de las simulaciones.

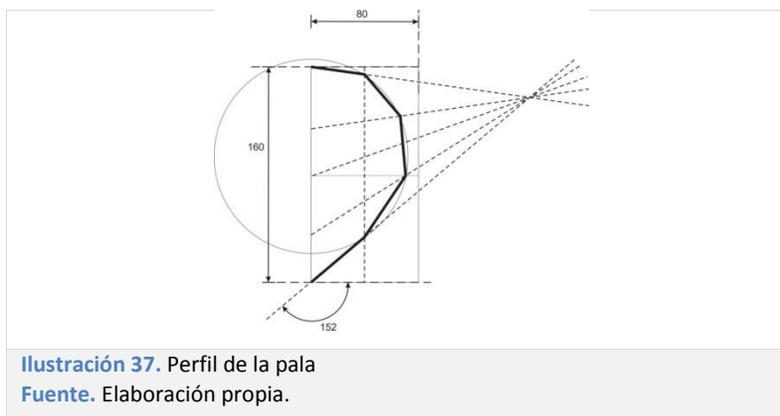
| #  | Modelos         | Fuerza (N) |
|----|-----------------|------------|
|    |                 | Promedio   |
| 1  | Pala única      | 2,07       |
| 2  | Plana           | 4,91       |
| 3  | C               | 5,8        |
| 4  | C ángulo        | 5,6        |
| 5  | C_Angulo15      | 5,21       |
| 6  | Doble_Curva     | 4,88       |
| 7  | Curva           | 6,1        |
| 8  | Curva Angulo    | 6,25       |
| 9  | Curva_Angulo2   | 6,33       |
| 10 | Curva ángulo 14 | 7,32       |
| 11 | Curva ángulo 16 | 7,82       |
| 12 | Facetada        | 6,34       |

**Fuente.** Elaboración propia.

Complementario a los valores de fuerza y velocidad, se captaron imágenes de cada simulación con las cuales se analizó la geometría de cada modelo. La Ilustración 36 muestra las imágenes de la pala seleccionada, la cual arrojó el mayor valor de fuerza de reacción frente a los demás modelos.



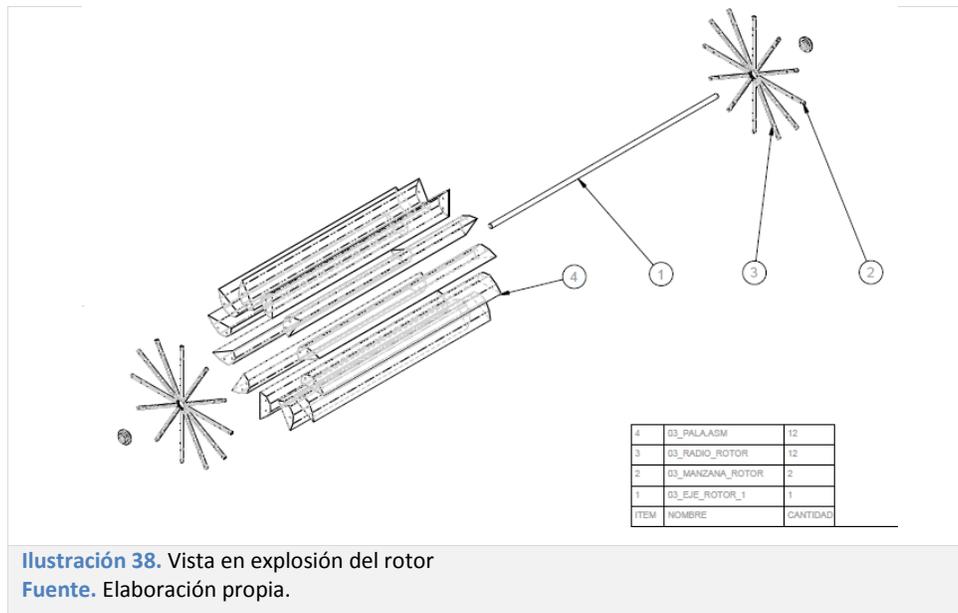
El perfil del modelo seleccionado, que se presenta en la Ilustración 37, es el resultado de la geometrización de un perfil cóncavo con una sección alargada para formar un ángulo de salida del agua  $\beta = 152$ . Por otro lado, este perfil presenta unos puntos en los que la sección cambia de ángulo, que corresponden a dobleces que se le hacen a la pieza en la fabricación para darle mayor rigidez a la pala, considerando una longitud mayor que 1 m.



- Soporte de las palas

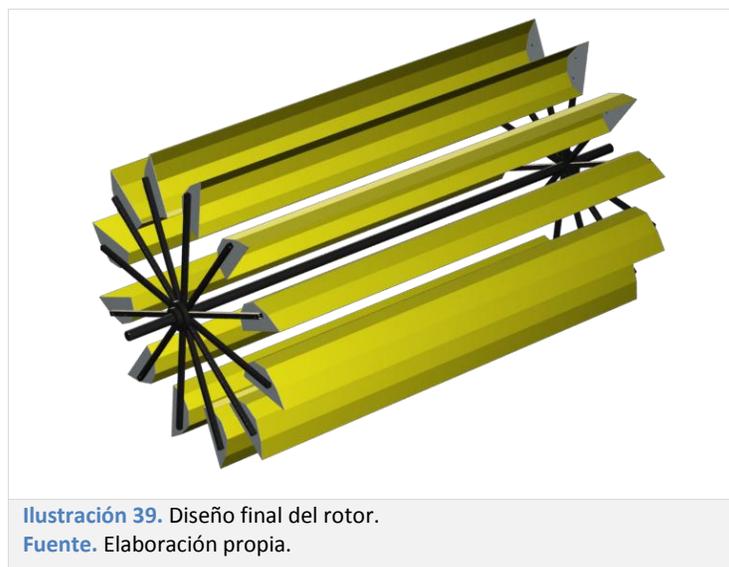
Una vez definido el perfil de la pala y el número de palas, se diseñó el soporte de las mismas, teniendo como referencia las ideas exploradas en la sesión # 2 de la generación de alternativas (Ver Anexo D)

La Ilustración 38 muestra la vista en explosión del rotor. .



**Ilustración 38.** Vista en explosión del rotor  
**Fuente.** Elaboración propia.

La Ilustración 39 muestra el diseño final del rotor de 12 palas cóncavas, con un diámetro de 0,8 m y una longitud de 1,25 m.



**Ilustración 39.** Diseño final del rotor.  
**Fuente.** Elaboración propia.

### 3.11.3 Modelo funcional del rotor

La Ilustración 40 muestra el modelo funcional del rotor construido, con el fin de realizar pruebas de campo.

Para la construcción del modelo funcional, se seleccionaron materiales metálicos: tales como: lámina de acero al carbono, eje en acero 1020, tubos en acero al carbono, a los cuales se les dio un acabado con pintura anticorrosiva. Así mismo, se seleccionaron procesos de manufactura disponibles localmente tales: torneado, corte y doblé de lámina, y soldadura.



**Ilustración 40.** Modelo funcional del rotor.

**Fuente.** Elaboración propia.

### 3.11.4 Pruebas del rotor diseñado- validación del modelo analítico

La Tabla 31 muestra los datos experimentales obtenidos en la prueba de campo 3 (Ver Anexo F). En estos datos se indica el punto de potencia máxima entregado por el rotor (fila en azul) equivalente a 191,9 W, al girar a 22 rpm.

Tabla 31. Datos experimentales Prueba de campo # 3

| Medición | Fuerza (kg) | Fuerza Torq. (N) | Torque (Nm) | Fuerza Pala (N) | RPM  | w (rad/s) | Potencia Exp. (W) |
|----------|-------------|------------------|-------------|-----------------|------|-----------|-------------------|
| 1        | 0           | 0                | 0           | 0               | 44   | 4,61      | 0                 |
| 2        | 2,5         | 24,5             | 12,25       | 39,5            | 40   | 4,19      | 51,3              |
| 3        | 4           | 39,2             | 19,6        | 63,2            | 36   | 3,77      | 73,9              |
| 4        | 6           | 58,8             | 29,4        | 94,8            | 33   | 3,46      | 101,6             |
| 5        | 10          | 98               | 49          | 158,1           | 26   | 2,72      | 133,4             |
| 6        | 12          | 117,6            | 58,8        | 189,7           | 25   | 2,62      | 153,9             |
| 7        | 15          | 147              | 73,5        | 237,1           | 22,5 | 2,36      | 173,2             |
| 8        | 17          | 166,6            | 83,3        | 268,7           | 22   | 2,30      | 191,9             |
| 9        | 19          | 186,2            | 93,1        | 300,3           | 19   | 1,99      | 185,2             |
| 10       | 21          | 205,8            | 102,9       | 331,9           | 14   | 1,47      | 150,9             |
| 11       | 25          | 245              | 122,5       | 395,2           | 12   | 1,26      | 153,9             |
| 12       | 28          | 274,4            | 137,2       | 442,6           | 0    | 0,00      | 0,000             |

Fuente. Elaboración propia.

A continuación, la Tabla 33 muestra la aplicación del modelo analítico para describir el fenómeno hallado experimentalmente. Para esto se emplearon los datos de entrada indicados en la Tabla 32.

Tabla 32. Datos de entrada- modelo analítico

| Parámetro |       |       |        |        |        |       |       |       |          |
|-----------|-------|-------|--------|--------|--------|-------|-------|-------|----------|
| $\beta$   | $C_s$ | $C_v$ | $\rho$ | A      | Q      | $r_t$ | $r_e$ | c     | $\eta_r$ |
| 152       | 1,88  | 95%   | 1000   | 0,1952 | 0,2935 | 0,31  | 0,4   | 1,504 | 50%      |

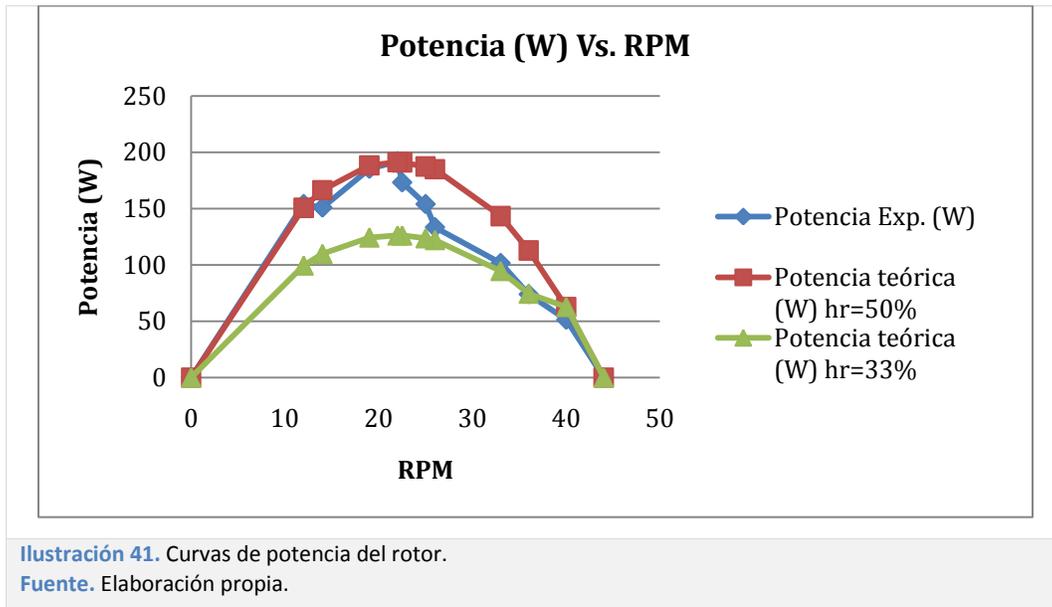
Fuente. Elaboración propia.

Tabla 33. Validación del modelo teórico

| #  | $\alpha$ | U    | rad/s (wr) | rad/s (we) | RPM (nr) | RPM (ne) | Torque (Nm) | Fe (N) | Ft(N)  | Potencia (W) |
|----|----------|------|------------|------------|----------|----------|-------------|--------|--------|--------------|
| 12 | 0        | 0,00 | 0,00       | 0,00       | 0        | 0        | 165,92      | 414,81 | 535,24 | 0,00         |
|    | 0,2      | 0,30 | 0,97       | 0,92       | 9,26     | 8,80     | 132,74      | 331,85 | 428,19 | 122,32       |
| 11 | 0,27     | 0,41 | 1,31       | 1,24       | 12,51    | 11,88    | 121,12      | 302,81 | 390,72 | 150,69       |
| 10 | 0,32     | 0,48 | 1,55       | 1,47       | 14,82    | 14,08    | 112,83      | 282,07 | 363,96 | 166,36       |
|    | 0,35     | 0,53 | 1,70       | 1,61       | 16,21    | 15,40    | 107,85      | 269,63 | 347,90 | 173,93       |
|    | 0,4      | 0,60 | 1,94       | 1,84       | 18,53    | 17,60    | 99,55       | 248,89 | 321,14 | 183,49       |
| 9  | 0,44     | 0,66 | 2,13       | 2,03       | 20,38    | 19,36    | 92,92       | 232,29 | 299,73 | 188,38       |
| 8  | 0,5      | 0,75 | 2,43       | 2,30       | 23,16    | 22,00    | 82,96       | 207,40 | 267,62 | 191,13       |
| 7  | 0,51     | 0,77 | 2,47       | 2,35       | 23,62    | 22,44    | 81,30       | 203,26 | 262,27 | 191,05       |
| 6  | 0,57     | 0,86 | 2,76       | 2,63       | 26,40    | 25,08    | 71,35       | 178,37 | 230,15 | 187,38       |
| 5  | 0,59     | 0,89 | 2,86       | 2,72       | 27,33    | 25,96    | 68,03       | 170,07 | 219,45 | 184,94       |
|    | 0,7      | 1,05 | 3,40       | 3,23       | 32,42    | 30,80    | 49,78       | 124,44 | 160,57 | 160,55       |
| 4  | 0,75     | 1,13 | 3,64       | 3,46       | 34,74    | 33,00    | 41,48       | 103,70 | 133,81 | 143,35       |
|    | 0,8      | 1,20 | 3,88       | 3,69       | 37,05    | 35,20    | 33,18       | 82,96  | 107,05 | 122,32       |
| 3  | 0,82     | 1,23 | 3,98       | 3,78       | 37,98    | 36,08    | 29,87       | 74,67  | 96,34  | 112,84       |
|    | 0,85     | 1,28 | 4,12       | 3,92       | 39,37    | 37,40    | 24,89       | 62,22  | 80,29  | 97,48        |
| 2  | 0,91     | 1,37 | 4,41       | 4,19       | 42,15    | 40,04    | 14,93       | 37,33  | 48,17  | 62,61        |
| 1  | 1        | 1,50 | 4,85       | 4,61       | 46,32    | 44,00    | 0,00        | 0,00   | 0,00   | 0,00         |

Fuente. Elaboración propia.

En el modelo analítico se plateó una eficiencia del rotor  $\eta_r=33\%$ , sin embargo al comparar los datos experimentales con los teóricos el valor de eficiencia correspondiente es  $\eta_r=50\%$ . En la siguiente ilustración se presenta una comparación gráfica entre la potencia hallada experimentalmente y las potencias teóricas con sus respectivas eficiencias.



En este orden de ideas, en la Tabla 34 se identifican los parámetros necesarios para el diseño y selección de los demás componentes del sistema.

**Tabla 34.** Parámetros del rotor diseñado.

| Parámetro | Valor | Unidades |
|-----------|-------|----------|
| $P_r$     | 191,9 | W        |
| $n$       | 22    | rpm      |
| $\tau$    | 83,3  | Nm       |
| $\eta_r$  | 50%   |          |
| $D$       | 0,8   | m        |
| $L$       | 1,22  | m        |

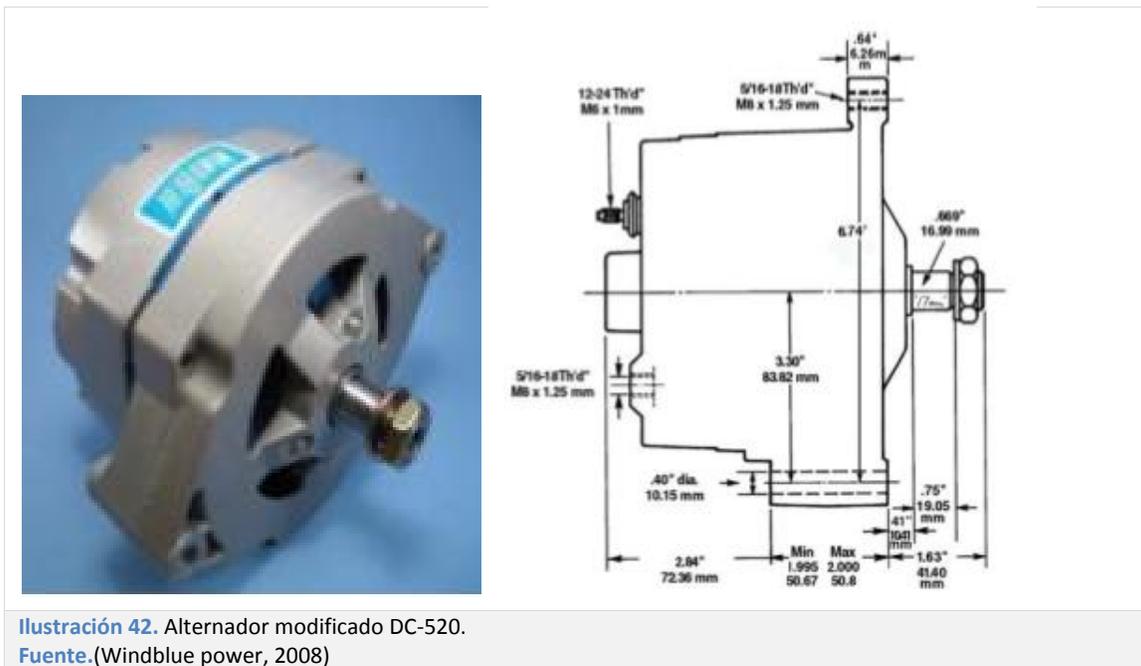
**Fuente.** Elaboración propia.

### 3.12 SELECCIÓN DEL GENERADOR

Se realizó una investigación de diferentes tipos de generadores (ver anexo G) y luego de analizar esta información y hablar con expertos en el tema, se definió que un generador de imanes permanentes es el ideal para este tipo de sistema, dado que se tienen rpm no

constantes y bajas, el torque es considerable, y se puede acoplar directamente sin necesidad de una transmisión, lo que evitaría pérdidas de energía por eficiencias.

Sin embargo no fue posible encontrar este componente en el mercado local e internacional, incluso se realizó una negociación fallida con un falso proveedor en Perú. Por esta razón en su lugar se usó un alternador de carro modificado DC-520 (Ver Ilustración 42) adquirido por el proyecto de grado “Estudio de factibilidad para la apropiación tecnológica, dentro del mercado colombiano, de un aerogenerador de 400 W”. Realizado por Duque, Macía, & Pelaez en el 2009 (Departamento de Ingeniería de diseño de la Universidad Eafit).



Según datos del fabricante, este generador se realizó modificando un alternador de un Chevy Camaro de 8 cilindros con aire acondicionado, con la inclusión de imanes de neodimio y cableando el bobinado.

### 3.12.1 Características principales(Windblue power, 2008):

- Diseñado sin escobillas lo que elimina la necesidad de mantenimiento y reduce la fricción.

- Núcleo de imanes de neodimio (Grado N40) que reemplazan la bobina de campo electromagnético ineficiente.
- Incorporado rectificador. (La salida de DC es no regulada).
- Alcanza una salida de 12 Voltios a sólo 275 rpm, y desde allí, el voltaje sigue subiendo con las rpm. Produce 25 AMPS en una batería de 12 voltios a 2.000rpm.

La elección se hizo apoyada en la caracterización de dicho alternador, realizada por los integrantes del mencionado proyecto de grado. Quienes hallaron la potencia del sistema utilizando la fórmula de potencia ( $P=I^2R$ ) e hicieron una prueba eléctrica sobre el sistema, utilizando una resistencia de  $0.5\Omega$  y midiendo el voltaje sin carga, para verificarla.

Los resultados obtenidos se registran en la siguiente tabla y los siguientes gráficos.

**Tabla 35.** Resultados de la prueba eléctrica sobre generador final.

| RPM  | I (Corriente en A) | V (Voltaje) | $P=I^2R$ |
|------|--------------------|-------------|----------|
| 214  | 6,8                | 11,6        | 23,1     |
| 359  | 12,2               | 19,7        | 74,4     |
| 690  | 21                 | 38,5        | 220,5    |
| 1090 | 28,4               | 69          | 403,3    |
| 2020 | 32,6               | 115         | 531,4    |

Fuente.(Duque, Macía, & Pelaez, 2009).

Se puede observar que el generador cumple con las características necesarias para ser adaptado al sistema, dado que empieza a generar energía eléctrica, a bajas rpm (entre 359 y 690 rpm) y se estima un torque entre 2 Nm y 3,1 Nm (Ver Tabla 36)

**Tabla 36.** Cálculo del torque para la potencia y las rpm del generador.

| RPM  | w      | POTENCIA | TORQUE |
|------|--------|----------|--------|
| 214  | 22,41  | 23,1     | 1,0    |
| 359  | 37,59  | 74,4     | 2,0    |
| 690  | 72,26  | 220,5    | 3,1    |
| 1090 | 114,14 | 403,3    | 3,5    |
| 2020 | 211,53 | 531,4    | 2,5    |

Fuente. Elaboración propia.

### 3.13 SELECCIÓN Y CÁLCULO DE LA TRANSMISIÓN

De acuerdo con los datos obtenidos anteriormente, para la selección de la transmisión se consideró la limitante de torque mínimo exigido por el alternador (mayor a 3,1Nm) y la

necesidad de multiplicar las rpms en un rango entre 359 y 690 rpm en la entrada del mismo. Con esta información y los datos obtenidos en la pruebas se construyó la siguiente tabla (Ver tabla 24) en la cual se calculó para la mayor potencia (191, 91w) entregada por el rotor en las pruebas de campo, un factor de multiplicación que aumentara las rpm a un numero dentro del rango (359 - 690 rpm) y que además teóricamente venciera un torque mayor a 3,1 Nm.

**Tabla 37. Cálculo de las rpm y torque del rotor, con un factor de multiplicación de 20.**

| Punto | TORQUE | RPM  | W    | POTENCIA | RPM MULT. | W MULT. | TORQUE MULTI |
|-------|--------|------|------|----------|-----------|---------|--------------|
| 1     | 0      | 44   | 4,61 | 0        | 880       | 92,7344 | 0            |
| 2     | 12,25  | 40   | 4,19 | 51,31    | 800       | 84,304  | 0,609        |
| 3     | 19,60  | 36   | 3,77 | 73,89    | 720       | 75,8736 | 0,974        |
| 4     | 29,40  | 33   | 3,46 | 101,60   | 660       | 69,5508 | 1,461        |
| 5     | 49,00  | 26   | 2,72 | 133,41   | 520       | 54,7976 | 2,435        |
| 6     | 58,80  | 25   | 2,62 | 153,94   | 500       | 52,69   | 2,922        |
| 7     | 73,50  | 22,5 | 2,36 | 173,18   | 450       | 47,421  | 3,652        |
| 8     | 83,30  | 22   | 2,30 | 191,91   | 440       | 46,3672 | 4,139        |
| 9     | 93,10  | 19   | 1,99 | 185,24   | 380       | 40,0444 | 4,626        |
| 10    | 102,90 | 16   | 1,68 | 172,41   | 320       | 33,7216 | 5,113        |
| 11    | 122,50 | 12   | 1,26 | 153,94   | 240       | 25,2912 | 6,087        |
| 12    | 137,20 | 0    | 0    | 0        | 0         | 0       | 0,000        |

Fuente. Elaboración propia.

Luego realizar diferentes iteraciones, se eligió un factor de 20, para obtener 440 rpm y 4,139Nm de torque, cifras que están dentro de los rangos necesarios.

Con base en la investigación realizada (Ver anexo H) y en los datos teóricos hallados, se definió como mejor opción una transmisión por poleas y correa en v, dado que la potencia que deben transmitir es baja (192 w aprox), son económicas (alrededor de 150.000 pesos todo el sistema), la construcción es simple y son de fácil consecución en el mercado. Además, para el contexto y el usuario definidos son oportunos, ya que su funcionamiento es simple (alguien con un nivel de estudios bajo, puede comprenderlo) y el mantenimiento o reparación se puede realizar, en la mayoría de los casos, sin necesidad de herramientas complejas o de traslados a talleres especializados, puesto que estas personas están familiarizadas con estos materiales y formas.

Obtener un factor de 20 usando un arreglo simple de poleas, implicaba el uso de una polea con un diámetro muy grande frente a otra con un diámetro muy pequeño, lo cual no era apropiado para esta aplicación, y en consecuencia, se determinó el uso de un tren de poleas (ver Ilustración 44) usando una polea doble central, con el objetivo de emplear poleas de diámetros comerciales y así disminuir costos y problemas a futuro por mantenimiento.

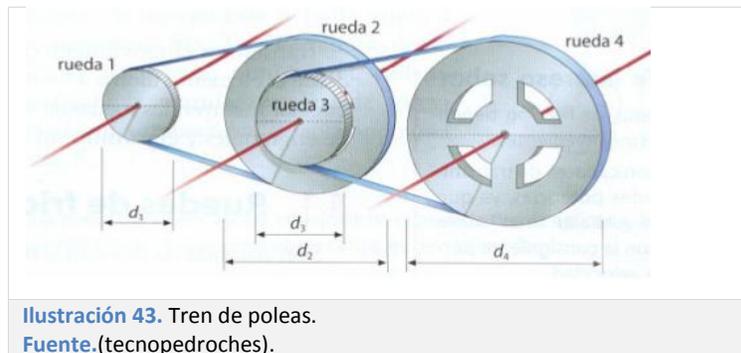
### 3.13.1 Cálculo de la transmisión

#### 3.13.1.1 Diámetros de las poleas

Para hacer este cálculo se tuvo en cuenta la siguiente información:

Potencia consumida: 190 w

Tipo de perfil: en V.



La relación entre las velocidades de giro de las ruedas motriz (1) y conducida (4) (ver Ilustración 43) depende del tamaño relativo de las ruedas del sistema y puede expresarse en función de sus diámetros:

$$\frac{v_1}{v_4} = \frac{d_2 \cdot d_4}{d_1 \cdot d_3}$$

En la igualdad anterior,  $v_1$  y  $v_2$  son las velocidades de las ruedas motriz y conducida, respectivamente, y  $d_1$ ,  $d_2$ ,  $d_3$  y  $d_4$  los diámetros de las correspondientes poleas.(tecnopedroches).

Para el caso del sistema  $v_1= 440$  y  $v_2= 22$ ; la relación equivalente es 1:20.

Conforme a estos valores, En el mercado se hallaron poleas comerciales que satisficieran la ecuación para la relación de 1: 20, con diámetros  $d_1=2''$   $d_2=10''$ ,  $d_3= 2,5''$  y  $d_4=10''$  .  
(Ver Ilustración 44)



### 3.13.1.2 Elección del tipo de correa a utilizar

Para determinar el tipo de correa a utilizar se siguió el método propuesto por la empresa Rexon (Rexon, 2005), y se consideró la siguiente información:

- Potencia consumida ( $P_c$ ): 190w
- RPM polea 3: 110
- RPM polea 1: 440
- Factor de seguridad: 1.3 (ver gráfica elección de la sección de las correas clásicas- Anexo K)

Se calculó la potencia efectiva de la siguiente manera:

$$\begin{aligned}P_e &= P_c * F_s \\P_e &= 190w * 1.3 \\P_e &= 247w\end{aligned}$$

Para este valor de potencia efectiva (247w) y los valores de RPM de poleas menores, anteriormente definidos (110 y 440) se hizo la selección de la correa tipo A, como apropiada para este sistema, con base en la gráfica de *la selección de las correas clásicas* (Rexon, 2005).

### 3.13.1.3 Distancia entre ejes

Para este cálculo se usó la siguiente fórmula: (Rexon de Colombia, 2005)

Entre poleas 4 y 3:

$$D_{\max} = 0,7(D_{pm} + D_{pc})$$

$$D_{\min} = 2(D_{pm} + D_{pc})$$

$$D_{\max} = 0,7(2'' + 10'') \quad D_{\min} = 2(2'' + 10'')$$

$$D_{\max} = 8,4'' \quad D_{\min} = 24''$$

$$D_{\max} = 21,4\text{cm} \quad D_{\min} = 60,9\text{cm}$$

Entre poleas 1 y 2:

$$D_{\max} = 0,7(2,5'' + 10'') \quad D_{\min} = 2(2,5'' + 10'')$$

$$D_{\max} = 8,75'' \quad D_{\min} = 25''$$

$$D_{\max} = 22,2\text{cm} \quad D_{\min} = 63,5\text{cm}$$

Teniendo como base el cálculo anterior y con la asesoría de un experto en el tema (John Jairo Ruiz) se definió para el sistema una distancia de 12'' entre poleas 1 y 2 y de 12,5'' entre poleas 3 y 4. De acuerdo con esto, se eligió en el catálogo de Rexon (Rexon, 2005) la correa industrial en V clásica, tipo A 43 que tiene una longitud de 44,2''. (Ver Anexo K- Manual de cálculo de transmisiones)

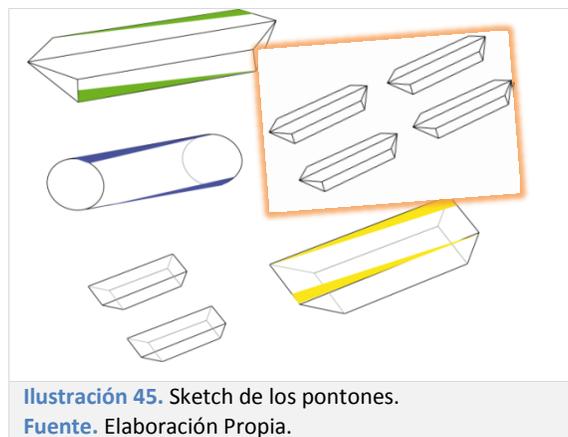
## 3.14 DISEÑO DE LOS PONTONES

En la matriz morfológica y en el estado del arte (ver anexo A) se analizaron diferentes formas de soportar el sistema, sin embargo luego de considerar las características de los demás componentes, y dado que los niveles del agua varían con mucha frecuencia, se determinó que una estructura flotante era la opción más adecuada, especialmente porque la pala debe mantenerse en un nivel relativamente constante bajo el nivel del agua para aprovechar adecuadamente la energía del río.

En el mercado se hallaron productos como dragas, kayaks y bicicletas acuáticas, que poseen elementos flotantes con características similares a las necesarias para el sistema, sin

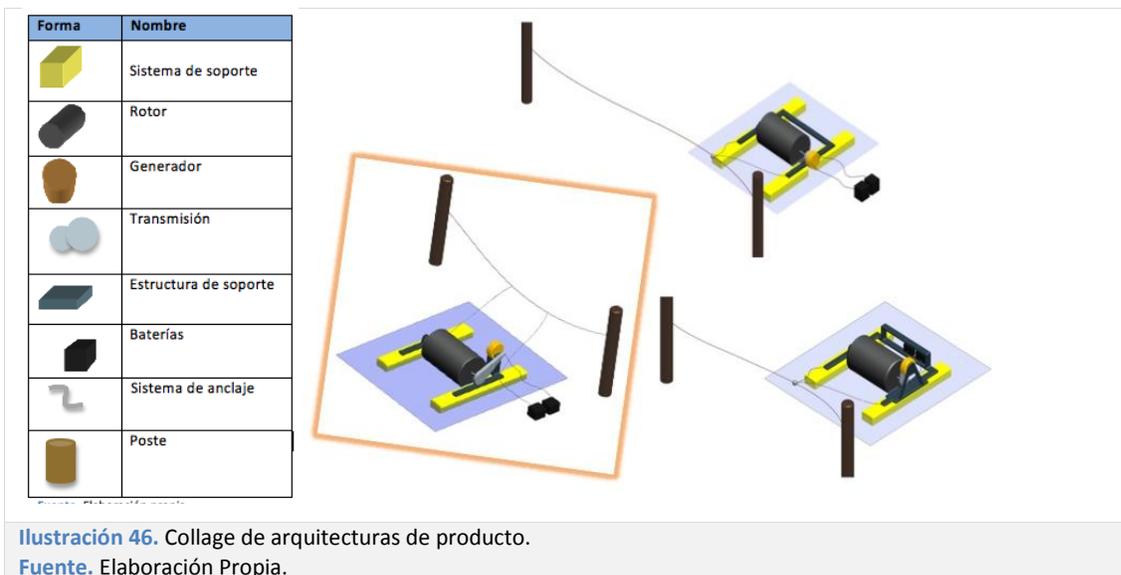
embargo, se optó por realizar el diseño de los pontones dado que, estos sistemas sustitutos, presentan problemas para el ensamble y representan mayores costos de inversión inicial y mantenimiento.

Se realizó una lluvia de ideas (ver anexo D) en donde se exploraron formas y disposiciones, y se determinó que una distribución de cuatro pontones en fibra de vidrio, era la más apropiada dado que se pueden transportar fácilmente y permiten mantener el sistema en flotación generando pocas turbulencias que puedan alterar la eficiencia del rotor.



### 3.15 ARQUITECTURA DE PRODUCTO

De acuerdo con los resultados obtenidos en el diseño de detalle, los principales componentes que definen la arquitectura del producto son: el sistema flotante, el rotor, la pala cóncava, la transmisión por polea y correa en V, y el alternador modificado DC. La Ilustración 46 muestra las permutaciones hechas a partir de la ruta seleccionada.



La arquitectura que fue seleccionada se observa resaltada en la Ilustración 46, ésta se consideró como la más óptima de acuerdo con los siguientes criterios:

- Sistema de soporte: se determinó como configuración más óptima el uso de 4 pontones, que permiten mayor flexibilidad de posicionamiento y al mismo tiempo mayor seguridad para el equipo ante cambios de nivel del agua.
- Transmisión: se ubicó en un punto de fácil acceso para el usuario en caso de mantenimiento.
- Generador: se ubicó la parte superior y frontal del sistema por dos aspectos: (1) ser un lugar cercano a la transmisión y (2) alejado de la corriente de agua.
- Sistema de anclaje: se dispusieron dos postes en a las orillas del río y cables que sujetan el sistema en la parte frontal.

Para ampliar esta información se puede remitir al Anexo L, allí se encuentran desarrolladas de manera más precisa, cada una de las permutaciones realizadas.

### 3.16 ANÁLISIS FORMAL

En esta etapa se tomaron en consideración aspectos claves como las aspiraciones del usuario de mejores oportunidades para las nuevas generaciones, y el deseo de estar al tanto de lo que pasa a su alrededor, dado que el hecho de vivir desconectados limita la capacidad de encontrarse con el mundo fuera del campo, es por esto que se elige la emoción “esperanza” que reúne todos los aspectos antes mencionados, y constituye lo que el producto quiere representar para el usuario. (Ver Ilustración 47)

Siguiendo con las directrices del diseño, según las cuales el producto debe ser de fácil operación y mantenimiento sencillo; y sin dejar de lado la emoción, se definió como referente formal los barcos de paletas, estos representan formas simples en movimiento, que en este contexto simbolizan desarrollo y trabajo.



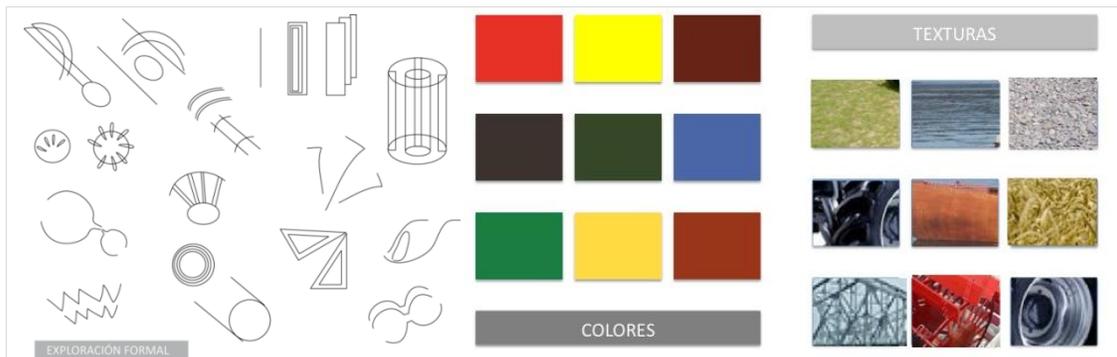
**Ilustración 47.** Collage de la emoción

**Fuente.** Elaboración Propia. Fuente fotos: google; gettyimages.

Es importante tener en cuenta que a pesar del bajo nivel educativo del usuario, este se desempeña con facilidad en las labores del campo, es por esto que complementario a lo anterior, se exploraron productos con dispositivos mecánicos y eléctricos conocidos, como la maquinaria agrícola, que es familiar en este contexto, debido a la experiencia que el usuario adquiere con su uso. (Ver Ilustración 48)

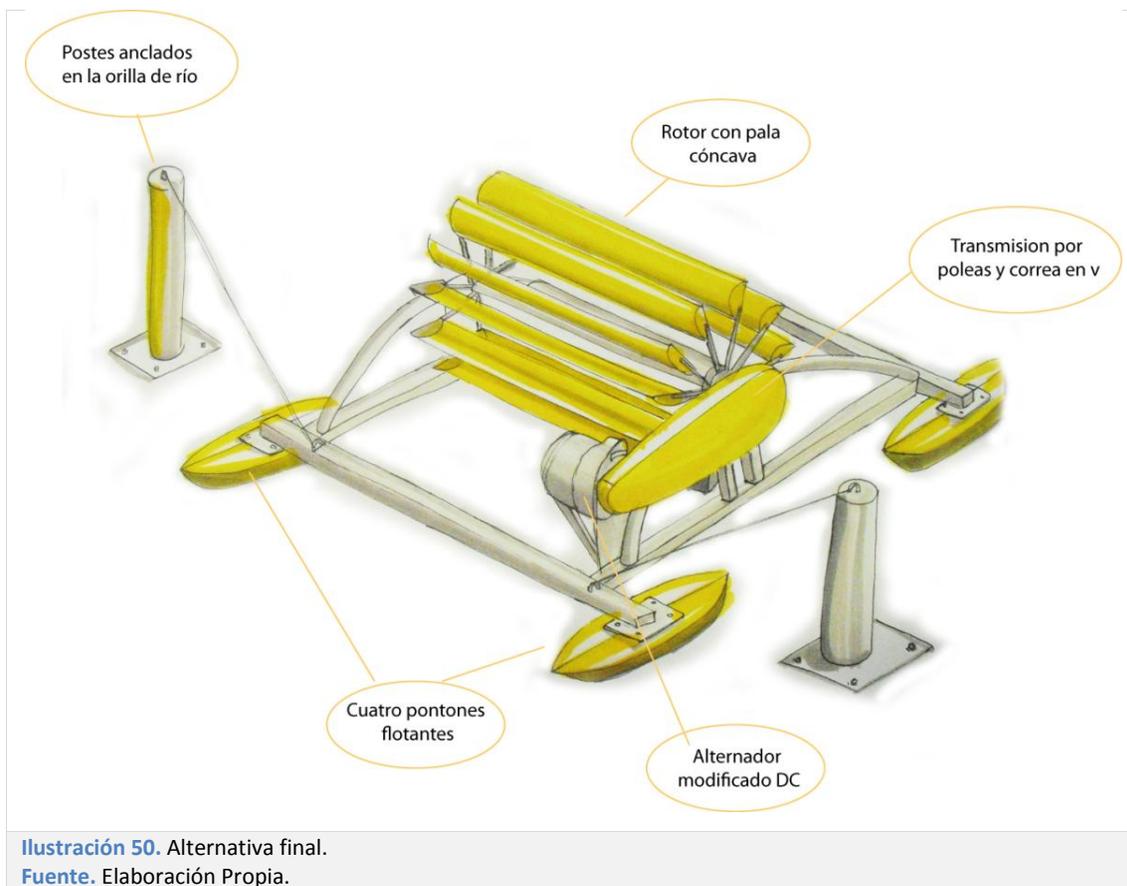


**Ilustración 48. Collages: Referente formal-Usabilidad**  
**Fuente.** Elaboración Propia. Fuente fotos: google; gettyimages.



**Ilustración 49. Exploración formal - Colores y texturas**  
**Fuente.** Elaboración Propia. Fuente fotos: google; gettyimages.

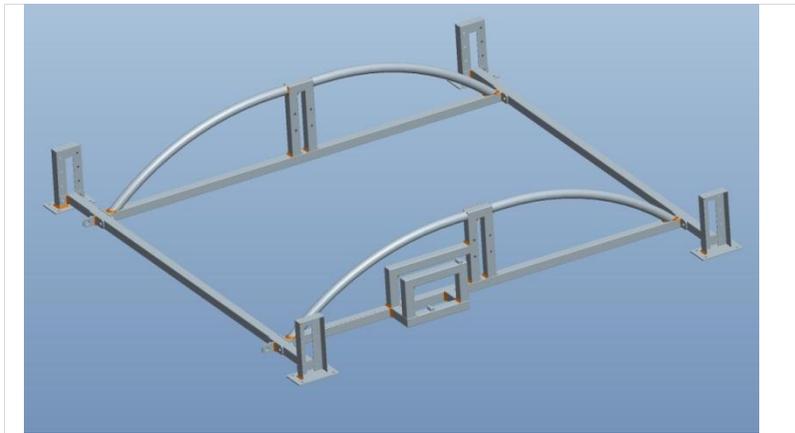
Como resultado de esta exploración se obtuvo un diseño preliminar que fue detallado en un modelo CAD. (Ver Ilustración 50).



### 3.17 DISEÑO DEL SISTEMA DE SOPORTE

#### 3.17.1 Chasis del sistema

A partir del análisis formal y tomando como base el concepto preliminar del sistema, se diseñó una estructura modular para ser transportada por partes y ensamblada en el sitio, la cual se aprecia en la Ilustración 51. Las dimensiones responden al tamaño y ubicación de los componentes anteriormente definidos y su forma se basó en el análisis formal realizado previamente.



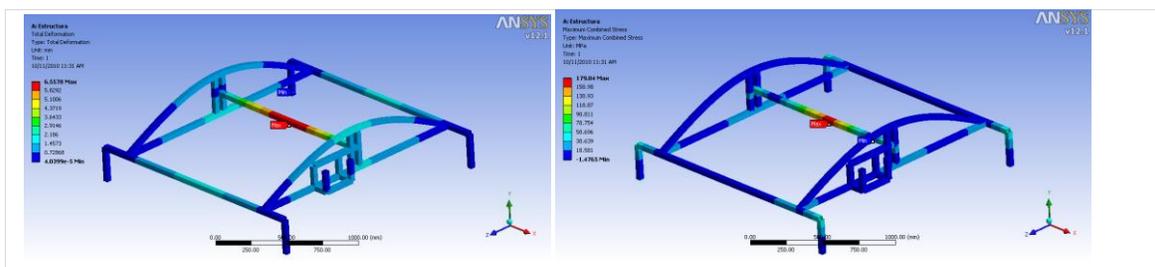
**Ilustración 51.** Chasis del sistema.  
**Fuente.** Elaboración propia.

Para evaluar el diseño, se realizó un análisis en elementos finitos en donde se representaron los esfuerzos que debe soportar la estructura asumiendo condiciones estáticas, para ello se determinó el centro de masa del sistema y se ubicó en este punto una carga de 200N equivalente al doble del peso aproximado del sistema.

Para el análisis se definieron las siguientes condiciones de frontera:

- Chasis empotrado en cada punto donde se ensambla el pontón.
- Carga en el eje, ubicado en el centro de masa (2000N)
- Diámetro de eje 1 pulgada.
- Trabajado con elementos tipo viga.

A continuación se presentan los resultados obtenidos con el software Ansys:

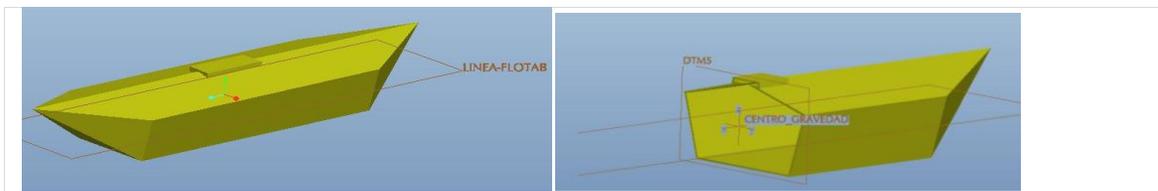


**Ilustración 52.** Deformación y esfuerzo máximo.  
**Fuente.** Elaboración propia.

En la Ilustración 52, se observa cómo aplicando dicha carga, el esfuerzo máximo es de 179 MPa, menor al esfuerzo de fluencia del acero que es de 250MPa, dando como resultado un factor de seguridad de 1,5. Por otro lado la deformación total es de 6,5 mm en el eje, lo cual es considerablemente alto. Sin embargo se debe tener en cuenta que se está aplicando una carga que equivale al doble del peso del sistema, y que realmente el eje está soportando alrededor de 45N del total de dicha fuerza. No obstante, el resto de la estructura tiene una deformación menor a 1mm lo cual es aceptable.

### 3.17.2 Cálculo de la flotabilidad

Se realizó un análisis en Pro Engineer para verificar la flotabilidad y el tamaño adecuado de cada pontón para soportar la estructura.



**Ilustración 53.** Modelo 3d diseño del pontón

**Fuente.** Elaboración propia

**Tabla 38.** Cálculo del peso total del sistema.

| Componente  | Peso (Kg.) |
|-------------|------------|
| Estructura  | 24,5       |
| Rotor       | 41,8       |
| Alternador  | 5,0        |
| Transmisión | 3,2        |
| Pontones    | 20,0       |
| Total       | 94,5       |
| Cada pontón | 23,6       |

**Fuente.** Elaboración propia.

El peso total de la estructura es aproximadamente de 94,5Kg, de ahí que le corresponda a cada pontón una cuarta parte de este peso que es equivalente a 23,6Kg.

Para determinar si el sistema flota en dicha línea se asume que:

- $\text{Peso del pontón} < \text{fuerza de empuje} = \text{el casco flota}$
- $\text{Peso del pontón} > \text{fuerza de empuje} = \text{el casco se hunde}$

Se estableció la línea aproximada de flotabilidad (Ver anexo M- Calculo de flotabilidad) de los pontones para la cual se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 39. Cálculo de flotabilidad.

| Calculo para una línea de flotabilidad ubicada a 85 mm con respecto a superficie inferior del pontón |   |
|--|---|
| Peso de cada pontón  | 50 N  |
| Masa teórica a soportar por cada pontón  | 23,6 Kg   |
| Peso teórico a soportar por cada pontón  | 236 N   |
| Volumen sumergido  | $2.43 \times 10^7 \text{ mm}^3$                       |
| Masa del volumen sumergido   | 24,3 Kg   |
| Fuerza de empuje del volumen sumergido   | 243 N   |
| Altura de cada pontón  | 200mm   |
| Línea de flotabilidad  | A 85 mm con respecto a superficie inferior del pontón |

Fuente. Elaboración propia.



Ilustración 54. Línea de flotabilidad.

Fuente. Elaboración propia

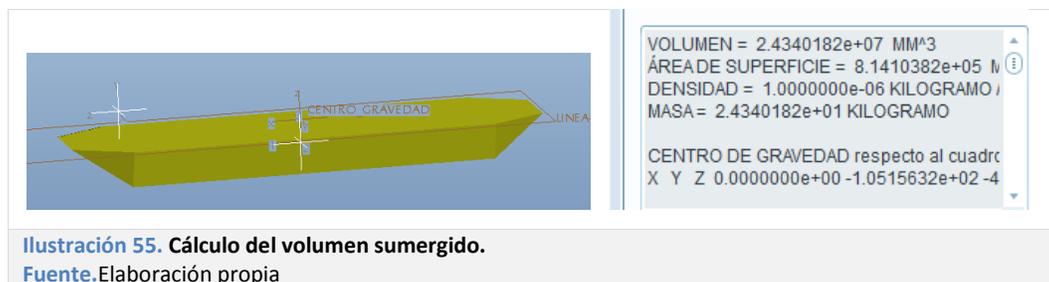


Ilustración 55. Cálculo del volumen sumergido.

Fuente. Elaboración propia

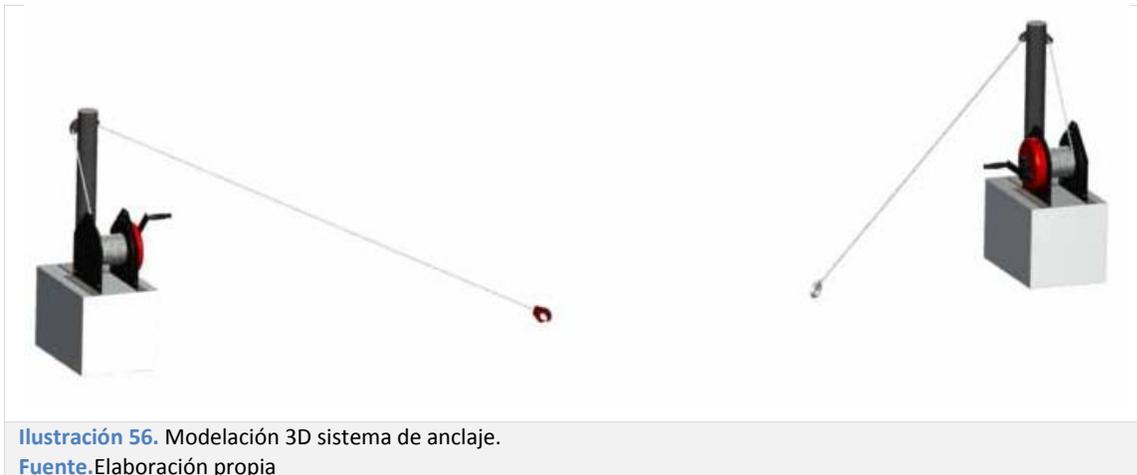
Se verificó la flotabilidad, dado que el peso del pontón 50N es menor a esta fuerza de empuje:  $243\text{N} > 50\text{N}$

Según el principio de Arquímedes, un objeto soporta una masa igual o menor a la masa correspondiente al volumen de agua sumergido. Dado que cada pontón debe soportar una masa igual a 23,6Kg. (Ver Tabla 38), se concluyó que el pontón diseñado es apto para

soportar la estructura en esta línea de flotabilidad, puesto que la masa del volumen sumergido es de 24,3 Kg.

### 3.18 DISEÑO DEL SISTEMA DE ANCLAJE

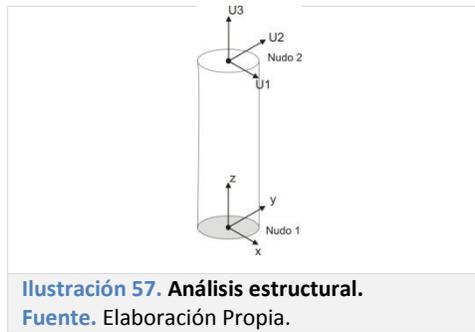
Se propone un sistema de anclaje que consta de dos unidades ubicadas en ambas orillas del río. Como se observa en la Ilustración 56, ésta está compuesta por un pedestal de concreto, un poste y un winche manual. Este sistema sujeta el chasis del sistema flotante y permite posicionar el sistema al tensionar ambos cables.



**Ilustración 56.** Modelación 3D sistema de anclaje.  
**Fuente.**Elaboración propia

La condiciones de operación presentadas en el análisis funcional, exigen un sistema que garantice la permanencia del producto en su lugar de operación. Para esto se realizó un análisis estructural que permitió dimensionar los postes de acuerdo a un escenario de funcionamiento en condiciones extremas a una velocidad  $v=4$  m/s y con el rotor bloqueado, indicando una tensión equivalente a 4000 N.

A continuación se presenta el análisis de desplazamientos (U) y reacciones en los postes del sistema de anclaje, en el caso de “Empotramiento-libre”, en el cual el nudo 1 está empotrado y el nudo 2 libre, tal como se muestra en la Ilustración 57.



En este orden de ideas, se analizaron diferentes opciones de tubo redondo de acero, bajo el escenario de fuerzas que se presenta en la Tabla 40. Y se consideró el caso de fuerza máximo para cuando la fuerza de flexión se aplica en el nudo 2 sobre el eje X, totalmente perpendicular al eje del tubo.

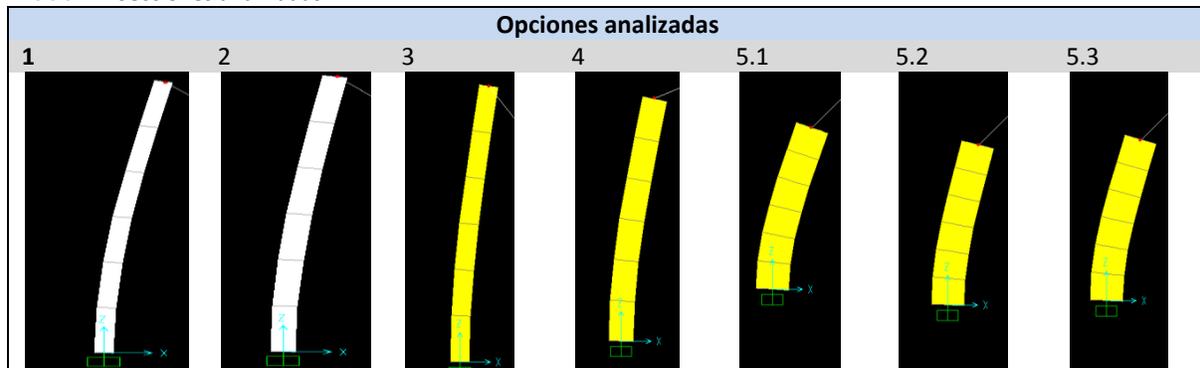
**Tabla 40. Escenario de fuerzas.**

| Parámetro            | Valor   | Unidades |
|----------------------|---------|----------|
| Fuerza total         | 4000    | N        |
| Fuerza en cada poste | 2000    | N        |
| E                    | 2000000 | Kg/cm2   |
| Factor de seguridad  | 30      | %        |

**Fuente.** Elaboración propia.

En la Tabla 41 se muestran las opciones analizadas, en las que se partió de secciones de tubo estándar y se asumieron diferentes longitudes. Vale aclarar que en la opción 5 se cambió el ángulo de incidencia de la tensión, tal como se indica en la Tabla 42.

**Tabla 41. Secciones analizadas.**



**Fuente.** Elaboración propia.

**Tabla 42.** Características de las opciones simuladas.

| Opción | Sección (pulg) | Espesor (mm) | Longitud (m) | Ángulo |
|--------|----------------|--------------|--------------|--------|
| 1      | 2              | 1,5          | 1,5          | 90     |
| 2      | 3              | 1,9          | 1            | 90     |
| 3      | 4              | 2,5          | 1,5          | 90     |
| 4      | 4              | 2,5          | 1            | 90     |
| 5.1    | 4              | 2,5          | 0,8          | 90     |
| 5.2    | 4              | 2,5          | 0,8          | 60     |
| 5.3    | 4              | 2,5          | 0,8          | 30     |

Fuente. Elaboración propia.

En las siguientes tablas se presentan los resultados del análisis:

**Tabla 43.** Resultados de las reacciones.

| Opción | Reacciones      |                 |                 |                    |                    |                    |
|--------|-----------------|-----------------|-----------------|--------------------|--------------------|--------------------|
|        | GlobalFX<br>Kgf | GlobalFY<br>Kgf | GlobalFZ<br>Kgf | GlobalMX<br>Kgf-cm | GlobalMY<br>Kgf-cm | GlobalMZ<br>Kgf-cm |
| 1      | -172,27         | 0               | 3,13            | 470,21             | -25840,5           | 25840,5            |
| 2      | -172,27         | 0               | 5,22            | 783,23             | -25840,5           | 25840,5            |
| 3      | -265            | 0               | 9,16            | 1374,56            | -39750             | 39750              |
| 4      | -265            | 0               | 6,11            | 610,91             | -26500             | 26500              |
| 5.1    | -265            | 0               | 3,05            | 152,73             | -13250             | 13250              |
| 5.2    | -229,5          | 0               | 135,55          | 6777,73            | -11475             | 11475              |
| 5.3    | -132,5          | 0               | 232,55          | 11627,73           | -6625              | 6625               |

Fuente. Elaboración propia.

**Tabla 44.** Resultados de los desplazamientos.

| Escenario | Nudo | Desplazamientos de los nudos |          |           |
|-----------|------|------------------------------|----------|-----------|
|           |      | U1<br>Cm                     | U2<br>Cm | U3<br>Cm  |
| 1         | 1    | 0                            | 0        | 0         |
|           | 2    | 89,65                        | 0        | -0,00043  |
| 2         | 1    | 0                            | 0        | 0         |
|           | 2    | 31,18                        | 0        | -0,00043  |
| 3         | 1    | 0                            | 0        | 0         |
|           | 2    | 15,42                        | 0        | -0,00043  |
| 4         | 1    | 0                            | 0        | 0         |
|           | 2    | 4,61                         | 0        | -0,00019  |
| 5.1       | 1    | 0                            | 0        | 0         |
|           | 2    | 0,61                         | 0        | -4,81E-05 |
| 5.2       | 1    | 0                            | 0        | 0         |
|           | 2    | 0,52                         | 0        | -0,00422  |
| 5.3       | 1    | 0                            | 0        | 0         |
|           | 2    | 0,30                         | 0        | -0,00728  |

Fuente. Elaboración propia.

La opción más adecuada es aquella con menor reacción en la base y con desplazamiento menor a 1 mm. Por esta razón se la opción 5: 0,8 m de altura, diámetro 4 pulgadas y espesor 2,5 mm.

Aparte de lo anterior, para definir la manera de anclar en poste en el contexto de uso se propuso un sistema compuesto por pernos de anclaje en pedestales de concreto, tal como se ve en la Ilustración 56.

Para esto se definió una placa acero 1020 de 20 cm x 20 cm, con espesor 6,35 mm. Sobre esta placa se transfiere la fuerza de reacción hallada en el tubo seleccionado, al estar soldada al tubo. La Tabla 45, muestra el esfuerzo hallado según el área de la placa.

**Tabla 45.** Esfuerzo en la placa del poste.

| Parámetro      | Valor | Unidades            |
|----------------|-------|---------------------|
| F reacción     | 265   | Kgf                 |
| Área Placa     | 400   | cm <sup>2</sup>     |
| Esfuerzo placa | 0,66  | Kgf/cm <sup>2</sup> |

**Fuente.** Elaboración Propia.

De esta manera, para garantizar el empotramiento, se seleccionaron 4 pernos con un diámetro de 5/16" cuyo esfuerzo máximo a tensión en de 0,42 Kg/cm<sup>2</sup>(UCLM, 2002)

Con respecto al pedestal de concreto se estima un cubo de 0,4m x 0,3m x 0,4m, volumen suficiente para garantizar la rigidez del empotramiento según el criterio de un experto en el tema.

Por otro lado, el cable metálico definido unir el chasis al os postes, tiene un diámetro de 5/16", el cual, para longitudes menores a 60 metros soporta 3000 N de tensión. (Miltornillos, 2010)

### 3.19 DISEÑO DE LA ESTACIÓN DE CONTROL

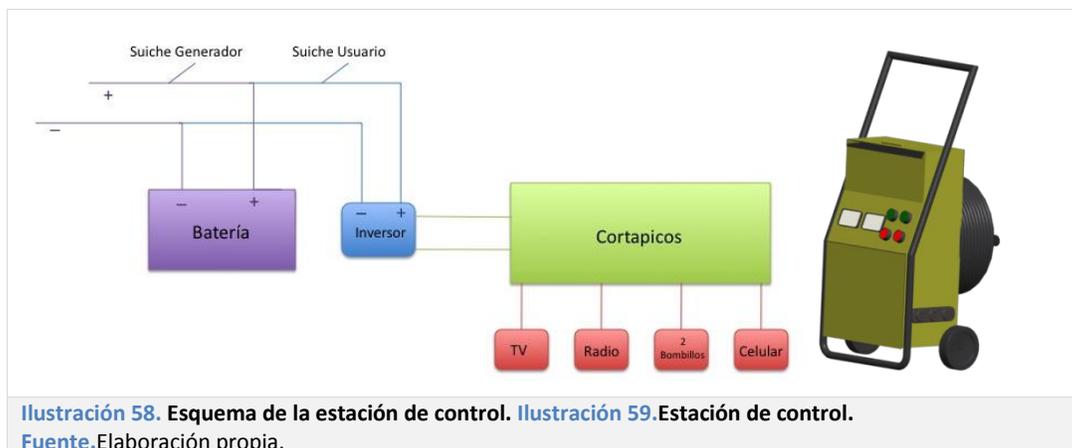
Este componente es el más cercano al usuario (está ubicado cerca de la casa), y con él se monitoreara el funcionamiento del sistema. Consta de un interruptor eléctrico que activa/desactiva el generador, para brindar seguridad al sistema en caso de una crecida del río o sequía, este detiene el funcionamiento de la parte eléctrica, para protegerla de una sobrecarga.

La energía producida por el generador se almacena en una batería de 30 amperios/hora, este valor se estimó considerando el punto de demanda energética máxima como 270 w (Ver 3.3) y el voltaje característico del tipo de batería seleccionada 12 V, dado que:

$$P = V * I$$
$$I = P / V$$
$$I = 270W / 12V$$
$$I = 22,5A$$

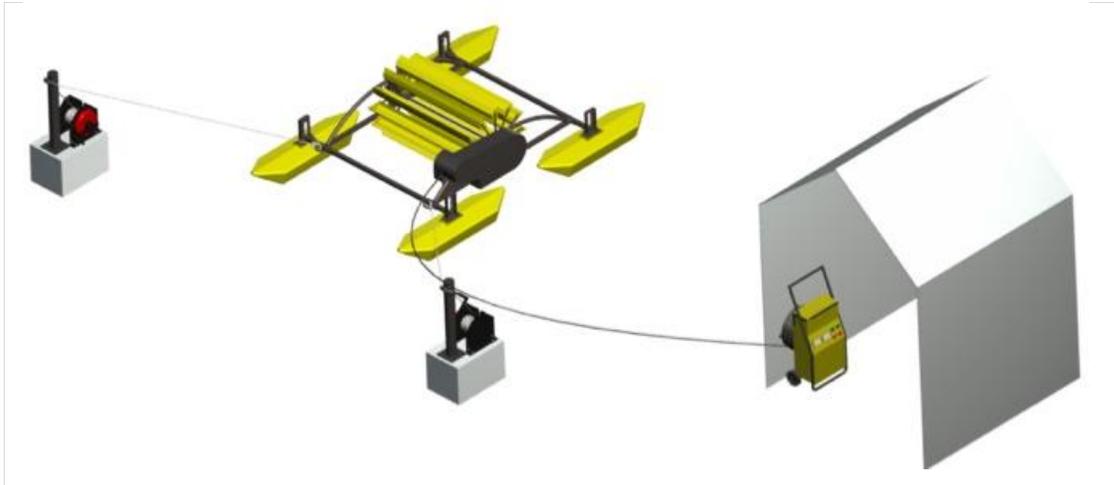
Se aproximó este valor de I a 30A/h, para usar una batería comercial, marca MAC. Ésta será conectada a un inversor, que cambia el voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, la cual puede ser usada por el usuario a través de un corta pico, en el cual se conectarán los aparatos. Además, se incluirá otro interruptor eléctrico que permita el control del paso de la energía almacenada en la batería hacia el corta pico, con el fin de brindar seguridad a los aparatos y permitir al mismo tiempo ahorro de energía. (Ver Ilustración 58. Esquema de la estación de control.

Todo este sistema dará información al usuario a través de un tablero de control, en el cual se podrá verificar el voltaje y amperaje real y dará señales de alerta cuando estos se encuentren fuera del rango normal, para que el usuario tome medidas preventivas.



### 3.20 MODELO 3D DEL SISTEMA

A continuación se presenta una imagen del modelo en 3d del sistema, este representa la síntesis de las fases anteriores del proceso de diseño, plasmadas en una idea de producto, que plantea una solución al problema de diseño expuesto en los antecedentes.



**Ilustración 60. Alternativa final.**  
**Fuente.** Elaboración Propia.

### 3.21 FABRICACIÓN DEL MODELO PARA PRUEBAS



**Ilustración 61. Fotografía modelo funcional.**  
**Fuente.** Elaboración Propia.

### 3.22 ESTUDIO EXPERIMENTAL -PRUEBAS DE POTENCIA ELÉCTRICA

Con el objetivo de simular las condiciones de velocidad y torque que se obtuvieron en las pruebas de campo, fue necesario adaptar al eje del rotor, un motor AC de 1 Hp acoplado a un reductor 1:40 y variar su velocidad hasta 6,1 A modificando la corriente de entrada. De esta forma fue posible medir la potencia que dicho motor le entrega al rotor hasta hacerlo girar entre 20- 70 rpm, y al mismo tiempo medir la potencia eléctrica que entrega el generador en estas condiciones.

Para verificar si la potencia entregada por el generador era útil, se realizó el montaje con la resistencia eléctrica, de manera que ésta simulara la demanda de energía a la batería, y se comprobó que el voltaje de la batería conectada no fuera inferior al voltaje de esta en vacío.

**Ilustración 62.** Montaje de la prueba del generador.

|  |  |
|--|--|
| <p><b>1. Acoplar el motor al rotor</b></p>   | <p><b>2. Configurar y conectar el variador</b></p>  |
| <p><b>3. Conectar la resistencia a la batería<br/>Conectar la batería al generador</b></p>    | <p><b>4. Medir RPM del rotor</b></p>               |
| <p><b>5. Simular carga eléctrica con la resistencia para: Medir Amperaje- salida del rotor<br/>Medir voltaje en la batería</b></p>  |  |

**Fuente.** Elaboración propia.

En la siguiente tabla se encuentran las características del motor y del reductor que garantizaron la operación del sistema simulando las condiciones obtenidas en el río.

**Tabla 46.** Parámetros iniciales del motor y reductor.

| Motor              |        |          |
|--------------------|--------|----------|
| Parámetro          | Valor  | Unidades |
| Voltaje            | 208    | V        |
| Amperaje           | 0,6    | A        |
| Potencia           | 216,16 | W        |
| Revoluciones       | 1000   | rpm      |
| Reductor           |        |          |
| Parámetro          | Valor  | Unidades |
| Relación           | 1      | 40       |
| Rev. entrada       | 1000   | rpm      |
| Rev. salida        | 25     | rpm      |
| Eficiencia         | 90%    |          |
| Potencia de salida | 194,5  | W        |

**Fuente.** Elaboración propia.

Para verificar la eficiencia de la transmisión se realizaron mediciones de las rpm de cada polea en dos escenarios, la primera se realizó sin la carga eléctrica ejercida por la resistencia en la batería (sin consumo eléctrico), y la segunda medición se realizó demandando una carga eléctrica de 14,8 A, carga máxima que se puede demandar del sistema sin que el voltaje de la batería sea menor a 12V.

Como se ilustra en la tabla a continuación, las rpm finales en la polea 2 de la medición 2, son menores a las obtenidas en la medición 1, esto comprueba la carga contra electromotriz que el generador tiene sobre la transmisión y que pudo provocar deslizamientos en las poleas disminuyendo su eficiencia.

**Tabla 47.** Mediciones de la transmisión.

| Parámetro         | Transmisión   |          |            |          |            |          |
|-------------------|---------------|----------|------------|----------|------------|----------|
|                   | Valor teórico |          | Medición 1 |          | Medición 2 |          |
|                   | Valor         | Unidades | Valor      | Unidades | Valor      | Unidades |
| Polea 1           | 25            | rpm      | 26         | rpm      | 25,7       | rpm      |
| Relación 1        | 5             | [1:5]    | 5          |          | 2,72       |          |
| Contra eje        | 125           | rpm      | 130        | rpm      | 70         | rpm      |
| Relación 2        | 5             | [1:5]    | 4,15       |          | 4,29       |          |
| Polea 2           | 625           |          | 540        | rpm      | 300        | rpm      |
| <b>Eficiencia</b> |               |          |            |          | 0,48       |          |

Fuente. Elaboración propia.

En las condiciones de operación que se plantean en la tabla 21, y demandando la carga eléctrica de 14,8 A, se obtuvieron los siguientes datos para el rotor y el generador.

Tabla 48. Mediciones del rotor en operación.

| Rotor               |        |          |
|---------------------|--------|----------|
| Parámetro           | Valor  | Unidades |
| Potencia de entrada | 194,54 | W        |
| Revoluciones        | 25,7   | rpm      |
| Vel. Angular        | 2,69   | rad/s    |
| Torque              | 72,29  | Nm       |

Fuente. Elaboración propia.

Tabla 49. Mediciones del generador en operación.

| Generador         |         |          |        |       |         |
|-------------------|---------|----------|--------|-------|---------|
| Parámetro         | Valor   | Unidades |        |       |         |
| Revoluciones      | 300     | rpm      |        |       |         |
| Velocidad angular | 31,42   | rad/s    |        |       |         |
| Voltaje           | 12,24   | V        | 12,14  | 12,3  | 12,53   |
| Amperaje          | 14,8    | A        | 14,901 | 14,91 | 14,5012 |
| Potencia          | 181,152 | W        | 180,9  | 183,4 | 181,7   |
| Torque estimado   | 5,77    | Nm       |        |       |         |

Fuente. Elaboración propia.

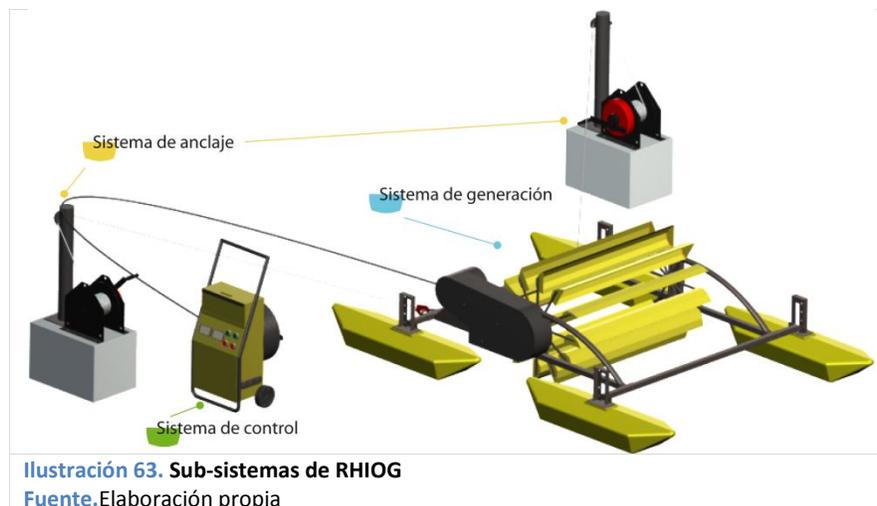
Como se observa en la Tabla 48 el torque que tiene el rotor en estas condiciones, es de aproximadamente 72 Nm, que es la relación que existe entre la potencia de entrada (194,54W) y la velocidad angular (25, 7 rpm), este torque esta dentro del rango probado en las pruebas de campo, en donde el torque máximo que se aplicó fue de 80N. Por otro lado, como se observa en la Tabla 49 se realizaron diferentes mediciones para el generador, en donde demandando diferentes cargas, se obtuvo el punto máximo de 14,8 A, en el cual el generador es capaz de mantener el voltaje de la batería por encima de 12 V (voltaje de la batería en vacío) lo que significa que la energía que se demanda es proveída por el generador y no es energía que se extrae de la carga inicial de la batería.

De acuerdo estos los datos de amperaje y voltaje, se determinó que la potencia eléctrica que entrega el generador es de 181W aproximadamente, lo que en comparación con la potencia de entrada de 194,54W, corresponde a una eficiencia del sistema 93% en estas condiciones de trabajo.

## 4. DESCRIPCIÓN DEL SISTEMA

RHIOG es un sistema de nanogeneración eléctrica que aprovecha la energía cinética de los ríos para proporcionar energía eléctrica, no requiere de grandes obras civiles para su funcionamiento y los diferentes elementos que lo componen, hacen de este, un sistema apto para ríos con profundidades bajas (menores a un metro), principales características que diferencian a RHIOG de las turbinas similares existentes en el mercado.

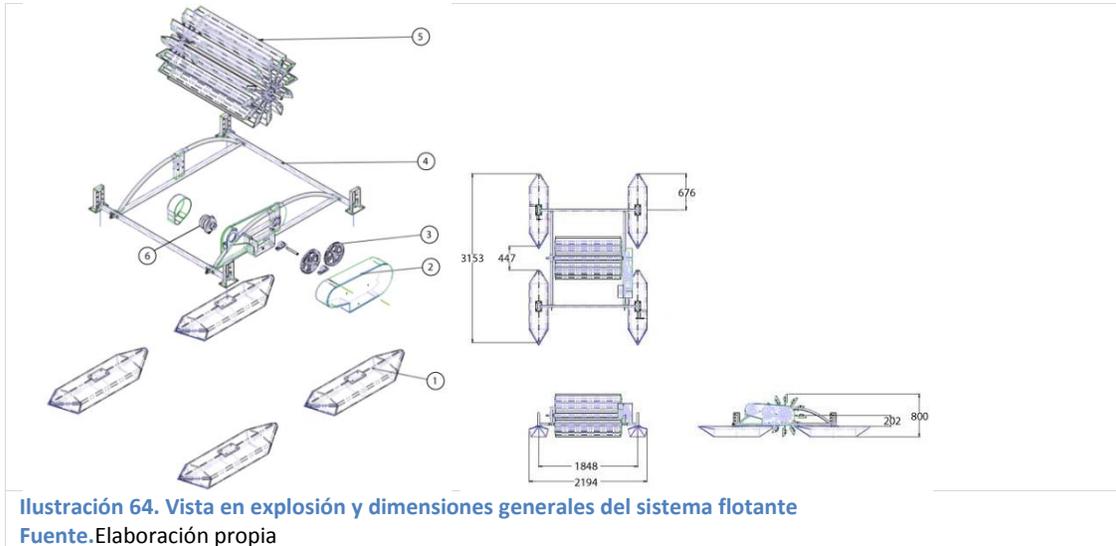
Está compuesto por tres subsistemas: sistema de generación, sistema de anclaje y sistema de control (Ver Ilustración 63), a continuación se hará una descripción de cada uno de estos y sus principales características, finalmente se presentará una ficha técnica del sistema en general, y la información más relevante ilustrada en tres pósters.



### 4.1 SISTEMA DE GENERACIÓN

Turbina compuesta por un rotor de acción con eje horizontal de 12 palas en forma cóncava. Se encuentra soportado y protegido por una estructura en acero, la cual flota en el río sobre cuatro pontones en fibra de vidrio.

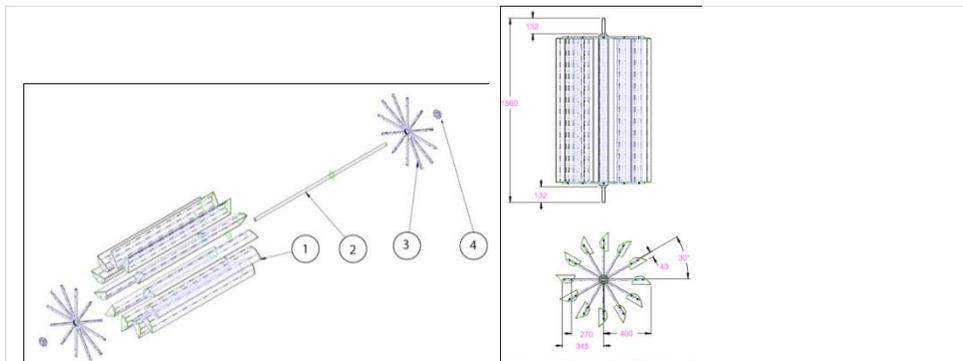
El sistema posee un alternador modificado DC-520 de la empresa Windblue Power, que en las condiciones de funcionamiento del sistema tiene una potencia de 180 W a 12V. Este se encuentra conectado al rotor por medio de un sistema de transmisión compuesto por 2 bandas tipo A 43 y cuatro poleas en v, que amplifican la velocidad de salida del rotor.



**Tabla 50. Subsistema: sistema flotante.**

| <b>SUBSISTEMA: Sistema flotante</b> |               |  |                 |
|-------------------------------------|---------------|--|-----------------|
| <b>ITEM</b>                         | <b>NOMBRE</b> | <b>DESCRIPCION</b>   | <b>CANTIDAD</b> |
| 1                                   | Pontones      | Fibra de vidrio  | 4               |
| 2                                   | Carcasas      | Lámina CR C18  | 1               |
| 3                                   | Transmisión   | Comercial: Polea en V tipo A D=10" x 2 unid. Polea en V tipo A, D= 2" x 2 unid. Banda A 43 x 2 unid. | 1               |
| 4                                   | Chasis        | Lámina CR C 3/16"  | 1               |
| 5                                   | Rotor         |  |                 |
| 6                                   | Generador     | Comercial: Alternador modificado DC-520 – para ser acoplado a rotores eólicos                        | 1               |

**Fuente.** Elaboración propia.



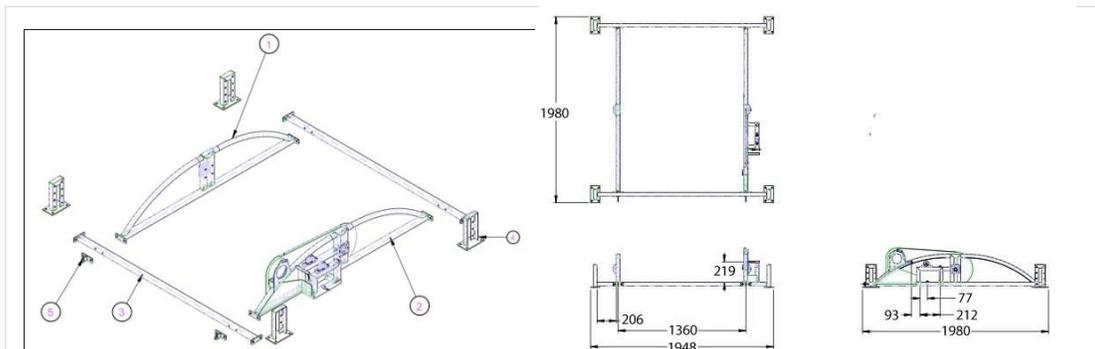
**Ilustración 65. Vista en explosión y dimensiones generales del rotor**

Fuente. Elaboración propia

**Tabla 51.** Subensamble: rotor.

| SUBENSAMBLE: Rotor |         |                                |                                      |          |
|--------------------|---------|--------------------------------|--------------------------------------|----------|
| ITEM               | NOMBRE  | DESCRIPCION                    | PROCESO MANUFACTURA                  | CANTIDAD |
| 1                  | Eje     | Eje Acero calibrado 1" x 1,6 m | Torneado                             | 1        |
| 2                  | Manzana | Eje de 3"x 3" acero 1020       | Torneado, Taladrado                  |          |
| 3                  | Radios  | Tubo cuadrado ½" C 14          | Corte, taladrado                     | 12       |
| 4                  | Pala    | Lámina CR C 18                 | Corte y dobléz de lámina, soldadura. | 12       |

Fuente. Elaboración propia.



**Ilustración 66.** Vista en explosión y dimensiones generales del Chasis

Fuente. Elaboración propia

**Tabla 52.** Subensamble: Chasis.

| SUBENSAMBLE: Chasis |                       |                                   |                          |          |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------------|--------------------------|----------|
| ITEM                | NOMBRE                | DESCRIPCION                       | PROCESO MANUFACTURA      | CANTIDAD |
| 1                   | Arco                  | Tubo redondo 1 1/2" C14 Acero     | Corte, Rolado, Soldadura | 2        |
| 2                   | Lateral               | Tubo Cuadrado 1 1/2" C14 Acero    | Corte, Soldadura         | 2        |
| 3                   | Frontal               | Tubo Cuadrado 1 1/2" C14 Acero    | Corte, Soldadura         | 2        |
| 4                   | Reguladores de altura | Perfil en ángulo 1.5"C 1/8 A 1020 | Corte, Soldadura         | 4        |
| 5                   | Argolla               | Varilla cuadrada ½"               | Corte, Rolado, Soldadura | 2        |

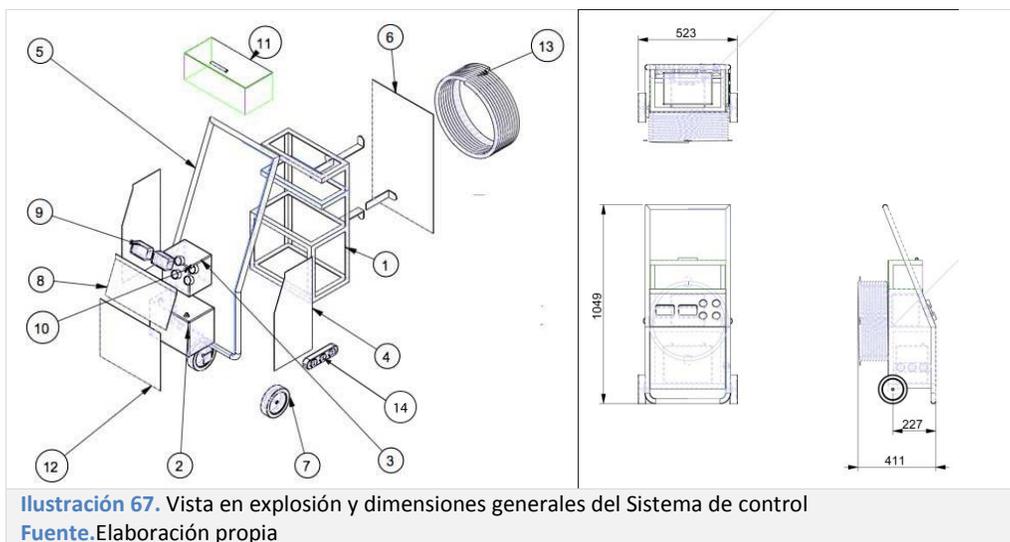
Fuente. Elaboración propia.

## 4.2 SISTEMA DE CONTROL

Es en donde se monitorea y se almacena la energía que proviene del sistema de generación, debe estar ubicado cerca al lugar donde se requiera la energía, puesto que tiene el cortapicos en el que se conectan los aparatos eléctricos.

Posee además, la interfaz de control, compuesta por un amperímetro y un voltímetro análogos, que brindan la información necesaria para que el usuario conozca el estado de funcionamiento del equipo.

El sistema acumula energía en una batería (Mac de 30/Ah), energía que es transformada por un inversor Mteck, a corriente alterna (110V) para entregar aproximadamente 3,6W/día.



**Tabla 53.** Subsistema: Sistema de control.

| SUBSISTEMA: Sistema de control |                                  |  |                             |          |
|--------------------------------|----------------------------------|--|-----------------------------|----------|
| ITEM                           | NOMBRE                           | DESCRIPCION  | PROCESO MANUFACTURA         | CANTIDAD |
| 1                              | Chasis                           |  |                             | 1        |
| 2                              | Batería                          | Comercial:<br>Batería de gel 12v 30 Ah,<br>marca Mac |                             | 1        |
| 3                              | Inversor                         | Comercial: Mtek                                      |                             | 1        |
| 4                              | Lamina lateral                   | Lámina CR C18  | Corte, Soldadura, remachado | 2        |
| 5                              | Tubo frontal                     | Tubo redondo de 1"                                   |                             | 1        |
| 6                              | Lamina posterior                 | Lámina CR C18  | Corte, Soldadura, remachado | 1        |
| 7                              | Llanta                           | Comercial: marca Tellure                             |                             | 2        |
| 8                              | Lamina frontal 1                 | Lámina CR C18  | Corte, Soldadura, remachado | 1        |
| 9                              | Amperímetro y Voltímetro análogo | Comercial: marca Kaisc                               |                             | 1        |

|    |  |  |                             |   |
|----|--|--|-----------------------------|---|
| 10 | Interruptor                                      | Comercial: marca Niessen                 |                             | 4 |
| 11 | Lamina superior                                  | Lámina CR C18                            | Corte, Soldadura, remachado | 1 |
| 12 | Lamina frontal 2                                 | Lámina CR C18                            | Corte, Soldadura, remachado | 1 |
| 13 | Cortapicos                                       | Comercial: marca Belkin                  |                             | 1 |
| 14 | Cable transmisión de energía (generador batería) | Cable encauchetado trifilar trifilar C16 |                             |   |

Fuente. Elaboración propia

### 4.3 SISTEMA DE ANCLAJE

Permite la ubicación del sistema de generación en el río, compuesto por dos unidades que están fijadas al suelo en las orillas del río, cada una tiene un cable en acero el cual se fija con mosquetones en las argollas del chasis del sistema, cada unidad posee un winche TGM Gan-mar, el cual permite regular la longitud del cable de acuerdo con el nivel del agua para posicionar correctamente el sistema de generación en el río, y brinda seguridad al usuario cuando sea requerido acercar o alejar el sistema a la orilla.

Para fijar las unidades es necesaria la construcción de un pedestal en concreto en el cual se permanezca dicho winche, y un poste en acero con una longitud de 80cm, este elemento da altura a los cables de tensión y aísla el cable de transmisión de energía del agua.

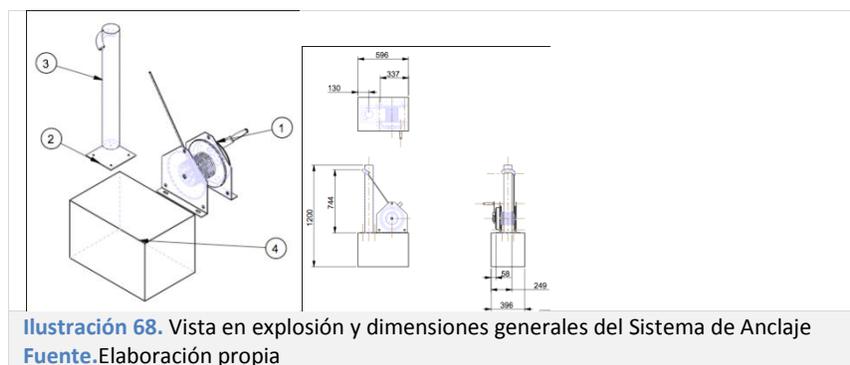


Ilustración 68. Vista en explosión y dimensiones generales del Sistema de Anclaje

Fuente. Elaboración propia

Tabla 54. Subsistema: Sistema de anclaje.

| SUBSISTEMA: Sistema de anclaje. |          |                        |                             |          |
|---------------------------------|----------|------------------------|-----------------------------|----------|
| ITEM                            | NOMBRE   | DESCRIPCION            | PROCESO MANUFACTURA         | CANTIDAD |
| 1                               | Winche   | Comercial: TGM Gan-mar |                             | 2        |
| 2                               | Placa    | HR C12"                | Corte, taladrado, soldadura | 2        |
| 3                               | Poste    | Tubo redondo C 12 4",  | Corte, Soldadura            | 2        |
| 4                               | Pedestal | Concreto               | Vaciado de concreto         | 2        |

Fuente. Elaboración propia.

#### 4.4 FICHA TÉCNICA DEL SISTEMA HIDROCINETICO DE GENERACIÓN ELECTRICA – RHIOG

Tabla 55. Ficha técnica del sistema.

| Potencia                               |  |
|--|--|
| Potencia efectiva del sistema          | 150 W @ 1,5 m/s  |
| Velocidad tangencial en el rotor       | 1,5 m/s  |
| Velocidad máxima                       | 4 m/s  |
| Velocidad angular del rotor            | 22 rpm   |
| Eficiencia del sistema                 | 46% para el la velocidad de diseño                         |
| Especificaciones generales del sistema |  |
| Transmisión de potencia                | Arreglo de Poleas en V tipo A con banda A43. Relación 1:20 |
| Energía producida                      | CA 110 V, para conectar aparatos eléctricos                |
| Soporte                                | Flotación en la superficie                                 |
| Generador                              | Alternador modificado DC 520- Wind Blue Power              |
| Dimensiones                            |  |
| Rotor                                  | Diámetro: 0,8m – Longitud: 1,25 m                          |
| Sistema flotante                       | 3,15 m x 2,2 m x 0,8                                       |
| Distancia sumergida                    | 0,2 m (nivel sumergido del rotor en el agua)               |
| Peso                                   |  |
| Rotor                                  | 40 kg  |
| Sistema flotante                       | 100 kg   |
| Sistema de control                     | 10 kg  |

Fuente. Elaboración propia.

##### 4.4.1. SISTEMAS DE SUJECIÓN



## 4.5 PÓSTER 1: DESCRIPCIÓN DEL PRODUCTO

# RHILOG

### Descripción

RHILOG es un generador que aporta un nuevo enfoque a la producción de energía renovable y representa una opción para los habitantes de la zonas no interconectadas de Antioquia.

Simple y fácil de fabricar, Rhiog utiliza la energía cinética del agua para proporcionar una fuente alternativa de energía.

### Componentes

**Sistema controlador**  
Interfaz con el usuario de donde es posible iniciar y detener el funcionamiento del sistema. En este se encuentra la batería donde se almacena la energía y el cortapicos para conectar los aparatos eléctricos.

**Chasis**  
Integra los componentes del sistema de generación y protege el rotor de los residuos que puedan afectar su funcionamiento.

**Anclaje**  
Sistema que permite ubicar el generador en el río, es regulable para acercar/alejar el sistema flotante de la orilla durante la instalación y permite regular la longitud de los cables ante cambios en el nivel del agua.

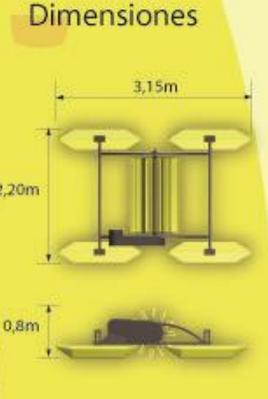
**Protector**  
Aísla la transmisión y el generador de la interperie.

**Pontones**  
Permiten la flotabilidad del sistema y variar su altura según el nivel del agua.

### Contexto



### Dimensiones



3,15m

2,20m

0,8m

**Ilustración 70.** Poster descripción del sistema.  
**Fuente.** Elaboración Propia.

## 4.6 PÓSTER 2: FUNCIONAMIENTO DEL SISTEMA

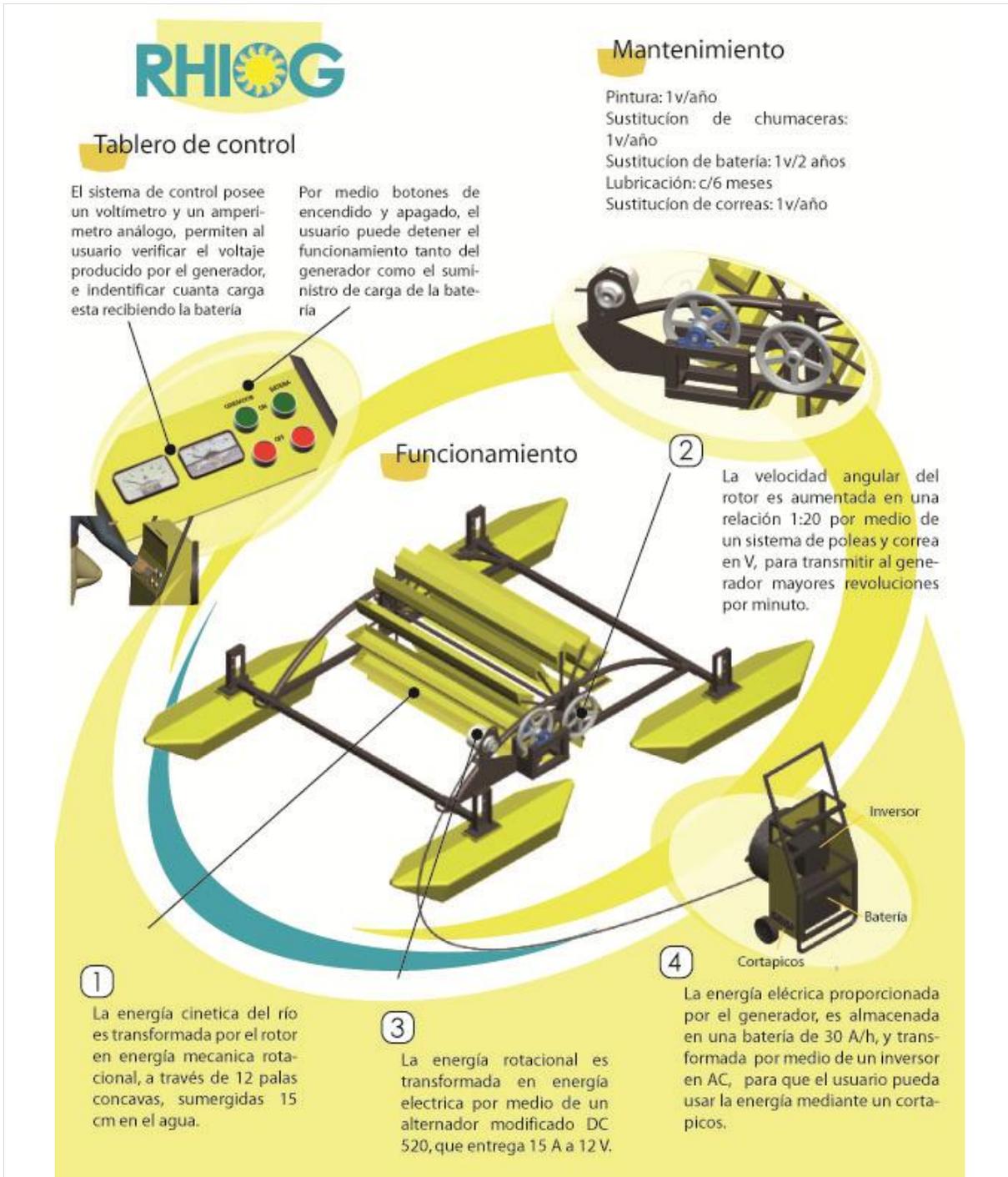
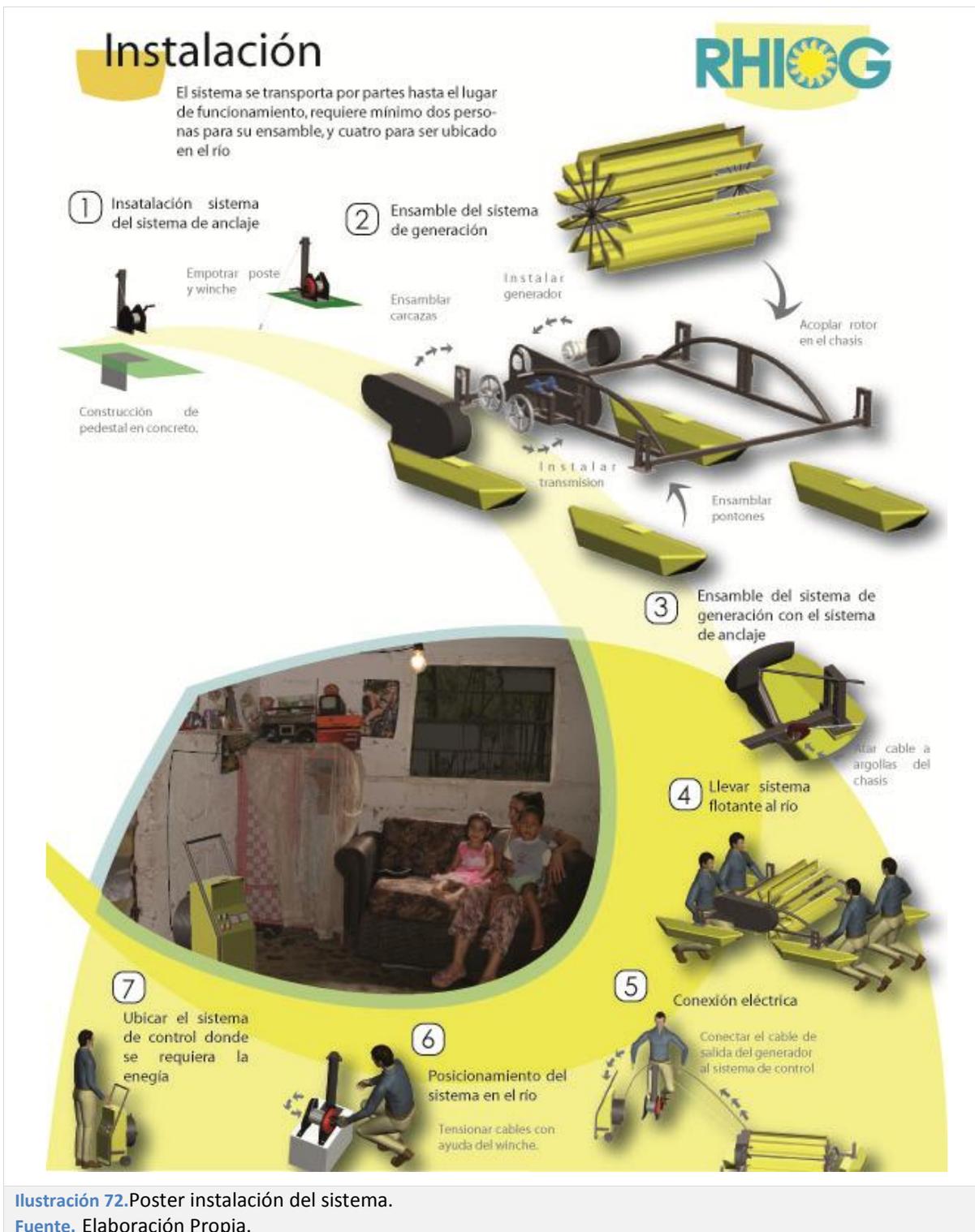


Ilustración 71. Poster funcionamiento del sistema.

Fuente. Elaboración Propia.

## 4.7 PÓSTER 3: INSTALACIÓN DEL SISTEMA



## 5. EVALUACIÓN TÉCNICO –ECONÓMICA

En este capítulo se presenta la información relacionada con la evaluación técnica y económica del sistema de generación hidro-cinética RHIOG. Para la evaluación técnica se consideraron los criterios especificados en el alcance del proyecto, aprobado en el anteproyecto los cuales se encuentra en el capítulo 1, tales como: (1) Costo de materiales y procesos de manufactura (2) Disponibilidad de componentes en el mercado local y (3) Eficiencia del sistema.

Por otro lado para la evaluación económica se estimó el costo de vatio instalado y costo del kilovatio de operación, esto con el fin de comparar el sistema con algunos productos similares y sustitutos.

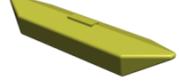
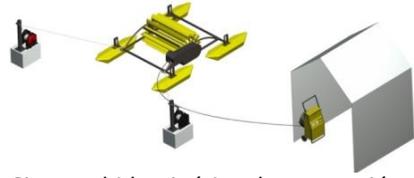
Adicional a esto se estimaron posibles restricciones ambientales que el proyecto puede tener de acuerdo con la normatividad ambiental vigente en Colombia

### 5.1 Evaluación técnica

Los datos que se presentan en la Tabla 56 , y son costos aproximados para 50 unidades fabricadas más no instaladas, lo cual implica un gasto adicional relativo según el lugar de operación. Entre los métodos aplicados en el proceso de diseño que soportan esta información se encuentran: (1) Investigación de campo en empresas locales (Ver Anexo C), (2) Fabricación del modelo funcional e (3) investigación de componentes por seleccionar (Ver Anexo G y H). Para conocer en mayor detalle la descripción de cada componente en el capítulo 3 se indican los materiales y procesos de manufactura, además en el Anexo N, están contenidos los planos de taller para el sistema.

Tabla 56. Matriz de los componentes del sistema

| Componente  | Materiales  | Manufactura   | Valor         | Peso % | Prov. |
|---|---|---|---------------|--------|-------|
|  <p style="text-align: center;"><b>Rotor</b><br/>Dimensiones:<br/>0,8 m x 1,30 m</p> | Lámina CR C 18<br>Tubo cuadrado ½" C 14<br>Eje Acero calibrado 1" x 1,6 m<br>Eje de 3"x 3" acero 1020 | Corte y doblaje de lámina, soldadura.<br><b>Equipos:</b> torno, rectificadora, fresadora, taladro, pulidora.<br><b>Acabado:</b> Pintura electrostática. | \$<br>746.000 | 14%    | Local |

|   |   |   |                     |             |              |
|---|---|---|---------------------|-------------|--------------|
|  <p><b>Generador</b><br/>Dimensiones:<br/>0,17 m x 0,2 m</p>                                     | <p>Alternador modificado DC-520 – para ser acoplado a rotores eólicos</p>   | <p>Comercial. Wind Blue Power</p>   | <p>\$ 650.000</p>   | <p>12%</p>  | <p>USA</p>   |
|  <p><b>Transmisión</b><br/>Dimensiones:<br/>0,9m x 0,25 m x 0,11m</p>                            | <p>Aluminio, polímero termoestable.</p>   | <p>Mecanizado de poleas para ubicar cuñeros y prisioneros. Carcasa: corte, doblé y rolado de lámina, soldadura. Acabado: Pintura Epoxica.</p>     | <p>\$ 357.000</p>   | <p>7%</p>   | <p>Local</p> |
|  <p><b>Chasis</b><br/>Dimensiones:<br/>1,8 m x 1,8 m x 0,34 m</p>                                | <p>Lámina CR C18, Tubo redondo 1 1/2" C14 (Acero), Tubo Cuadrado 1 1/2" C14 (Acero), lámina CR C 3/16" lámina CR C 18</p> | <p>Corte y rolado de tubería, y soldadura Equipos: taladro, pulidora. Pintura electrostática. Corte con Plasma CNC para soporte del generador</p> | <p>\$ 830000</p>    | <p>12%</p>  | <p>Local</p> |
|  <p><b>Soporte (Pontones)</b></p>   | <p>Fibra de vidrio, resina de poliéster, inserto metálico: HR C 3/16".</p>  | <p>Molde, corte de láminas de FV y ensamble.</p>  | <p>\$ 600.000</p>   | <p>11%</p>  | <p>Local</p> |
|  <p><b>Sistema de anclaje</b><br/>Dimensiones:<br/>Poste: 0,8 m<br/>Pedesta 0,4mx0,4mx0,4m</p> | <p>Tubo redondo C 12 4", guaya 5/16", y concreto</p>  | <p>Corte, soldadura, taladro, pulidora. Obra civil para el pedestal.</p>  | <p>\$1520000</p>    | <p>28%</p>  | <p>Local</p> |
|  <p><b>Sistema de control</b><br/>Dimensiones:<br/>1 m x 0,4 m x 0,4 m</p>                     | <p>Carcasa: Lámina CR C18, tubo redondo de 1", Angulo de 1" para la estructura.</p>                                       | <p>Corte y rolado de tubería, y soldadura Corte y doblé de lámina Pintura: epoxica</p>  | <p>\$1099000</p>    | <p>16%</p>  | <p>Local</p> |
|  <p>Sistema hidrocínético de generación</p>  |   |   | <p>\$ 5.382.000</p> | <p>100%</p> |              |

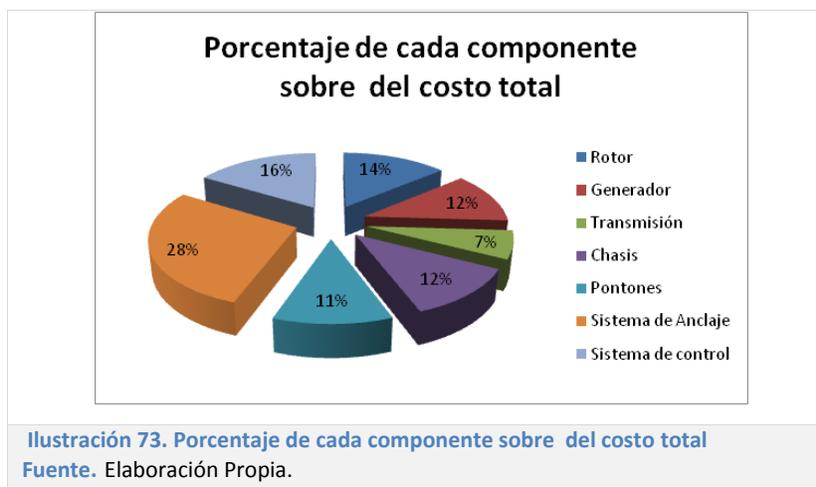
Fuente. Elaboración propia.

La tabla anterior indica la disponibilidad en el mercado local de materiales y procesos de la mayoría de los componentes. Sin embargo revela una limitante del sistema debido a la no disponibilidad del generador en el mercado local y nacional, es decir, no se encontraron fabricantes o comercializadores del tipo de generador requerido (ver numeral 3.11 y Anexo G). En su lugar se seleccionó el generador descrito en la Tabla 56, el cual a pesar de ser utilizado para aerogeneradores, demostró ser adecuado para el funcionamiento del sistema (Ver numeral 3.21). Sin embargo por ser éste un producto importado, su utilización implica riesgos en aspectos tales como: proceso de importación, mantenimiento y reparaciones, que puede llegar a afectar la viabilidad técnica del sistema en general.

No obstante, en términos presupuestales su costo no representa un porcentaje representativo con relación al costo total del sistema, tal como se aprecia en la Ilustración 73, lo que indica que para producción a grandes escalas podría ser viable la importación de estos equipos o bien realizar una apropiación tecnológica de los mismos.

Aparte de lo anterior, en términos porcentuales, en la Ilustración 73 se aprecia que el sistema flotante compuesto por el rotor, el chasis, la transmisión, el generador y los pontones, representa el 55% del costo, equivalente a \$ 2.960.100. Se hace esta aclaración ya que algunos productos similares (Ver Anexo A) no indican estimaciones del sistema de anclaje y sistema de control.

Asimismo, la Ilustración 73 señala que el sistema de anclaje representa la mayor parte de la inversión, con un 28% del costo total del sistema. Esto es debido a que las condiciones de operación (Ver) exigen altos niveles de seguridad por parte de este componente, que se ven reflejados en mayores costos. Sin embargo, si bien este componente es relevante para la ubicación del sistema, es posible considerar cambios en éste de acuerdo con el contexto de instalación.



La estimación de la eficiencia, por otro lado, permitió evaluar el desempeño de los componentes seleccionados, teniendo como referencia los datos analíticos y experimentales obtenidos en el proceso de ejecución del proyecto. La Tabla 57, presenta los valores estimados de potencia y eficiencia de cada componente, correspondientes a un escenario de operación con una velocidad del río  $v = 1,5$  m/s.

**Tabla 57. Valores de potencia**

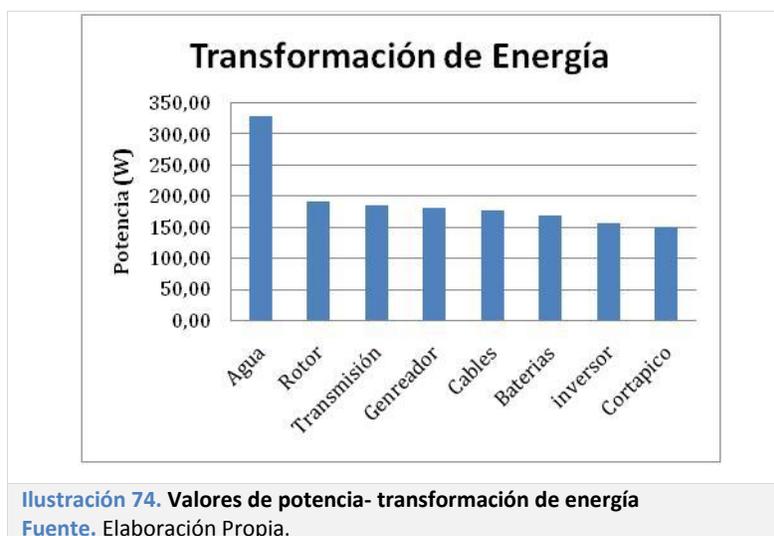
| Comp.                       | Agua      | Rotor        | Transm.   | Gener.       | Cables    | Baterías  | inversor  | Cortapicos | Total     |
|-----------------------------|-----------|--------------|-----------|--------------|-----------|-----------|-----------|------------|-----------|
| <b>Eficiencia</b>           | 100%      | 58%          | 97%       | 97%          | 98%       | 95%       | 93%       | 96%        | 46%       |
| <b>Potencia entrada [W]</b> | 329,40    | 191,70       | 185,9     | 180,4        | 176,8     | 167,92    | 156,17    | 149,92     |           |
| <b>Dato</b>                 | Analítico | Experimental | Analítico | Experimental | Analítico | Analítico | Analítico | Analítico  | Analítico |

**Fuente.** Elaboración propia.

En la Ilustración 74 se representan dichos valores gráficamente, los cuales indican que la mayor pérdida de energía tiene lugar en el rotor, el cual tiene una eficiencia del 58%. Con respecto a este valor en el artículo “Eficiencia de las ruedas hidráulicas”, se indica que para “ruedas hidráulicas de flujo por debajo” la eficiencia está entre un 15% y 25%. Asimismo, los autores (Wiemann, Müller, & Senior, 2006), muestran en su artículo “Revisión de los desarrollos actuales de generadores hidráulicos de pequeñas cabezas” que basados en la información recopilada y en teorías científicas desarrolladas, es posible indicar que los generadores hidrocínicos presentan limitaciones de eficiencia de 35%

aproximadamente. De ahí que un valor de 46% de eficiencia total del sistema diseñado, indica un buen desempeño de los componentes en general, y si bien el rotor presenta las mayores pérdidas de energía, la eficiencia total es superior a la eficiencia de productos similares existentes.

La Ilustración 74, también muestra un buen desempeño entre el rotor y el cortapicos con una eficiencia equivalente a 78%.



Conforme a los resultados expuestos, se demostró que el sistema es técnicamente viable. Si bien éste presenta limitaciones por ser el generador un producto importado, la eficiencia del sistema demostró un correcto funcionamiento entre los componentes. Sin embargo este es juicio preliminar, ya que para corroborar su viabilidad técnica es necesario realizar pruebas de uso en las que se evalúen el sistema en condiciones de operación constante.

## 5.2 Evaluación económica

La evaluación económica del sistema partió de los siguientes supuestos: para aprovechar la energía disponible en los ríos el sistema opera 24 horas al día, y toda la energía que genera es almacenada y consumida. La Tabla 58 muestra el escenario de consumo definido como requerimiento de diseño del sistema.

**Tabla 58. Escenario de consumo anual.**

| Escenario de consumo |        |         |
|----------------------|--------|---------|
| Consumo diario       | 1588   | W       |
| Consumo diario       | 1,588  | kW/día  |
| Consumo mensual      | 47,64  | kW/mes  |
| Consumo anual        | 571,68 | kW/añal |

Fuente. Elaboración Propia. \*un mes equivale a 30 días

El sistema tiene una potencia efectiva de 150 W operando a 1,5 m/s. En la Tabla 59 que se presenta a continuación se indica que un tiempo de operación del sistema de 10 horas por día puede satisfacer la demanda diaria, sin embargo dado que el recurso está disponible las 24 horas del día se estima el escenario máximo de generación para este tiempo.

Tabla 59. Potencia generada

| Potencia Generada        |          |         |         |
|--------------------------|----------|---------|---------|
| Potencia Media           | 150,00   | 150,00  | W       |
| Tiempo en Funcionamiento | 24       | 10      | h/día   |
| Potencia Generada diaria | 3600,0   | 1500,0  | W/día   |
|                          | 3,600    | 1,500   | kW/día  |
| Potencia Generada        | 108,000  | 45,000  | kW/mes  |
|                          | 1296,000 | 540,000 | kW/añal |

Fuente. Elaboración Propia.

La Tabla 60 que se presenta a continuación se realizó con la ayuda de expertos y fabricantes del modelo funcional para estimar los costos de mantenimiento periódico se le debe realizar al sistema. A partir esto y considerando el costo total de la inversión estimado en la Tabla 56, se realizó un flujo de caja del proyecto para un período de evaluación  $n= 6$  años, con valores constantes (sin inflación). Por medio de esta herramienta se calculó el valor presente neto de la inversión.

Tabla 60. Valor presente neto para diferentes periodos de utilización.

| Ítem              | 0         | 1      | 2       | 3      | 4       | 5      | 6       |
|-------------------|-----------|--------|---------|--------|---------|--------|---------|
| Inversión inicial | 5.382.000 |        |         |        |         |        |         |
| Mantenimiento     |           |        |         |        |         |        |         |
| Cambio de Batería |           |        | 220.000 |        | 220.000 |        | 220.000 |
| Cambio de bandas  |           | 40.000 | 40.000  | 40.000 | 40.000  | 40.000 | 40.000  |
| Pintura           |           | 60.000 | 60.000  | 60.000 | 60.000  | 60.000 | 60.000  |
| Lubricación       |           |        |         |        |         |        |         |

|                                 |           |         |         |         |         |         |         |
|---------------------------------|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
|                                 |           | 30.000  | 30.000  | 30.000  | 30.000  | 30.000  | 30.000  |
| <b>Mantenimiento chumaceras</b> |           | 50.000  | 50.000  | 50.000  | 50.000  | 50.000  | 50.000  |
| <b>Flujo de caja</b>            | 5.382.000 | 180.000 | 400.000 | 180.000 | 400.000 | 180.000 | 400.000 |
| <b>TIO</b>                      | 10%       |         |         |         |         |         |         |
| <b>VPN</b>                      | 5.545.636 |         |         |         |         |         |         |

Fuente. Elaboración Propia.

Esta herramienta también permitió calcular el VPN acumulado para diferentes periodos de utilización del sistema y evaluación del proyecto, es decir n=1, n=2, n=3, n=4, n=5 y n=6. La Ilustración 75 indica un aumento en dicho valor en función del periodo de utilización debido a los gastos de mantenimiento en lo que se incurre cada año.

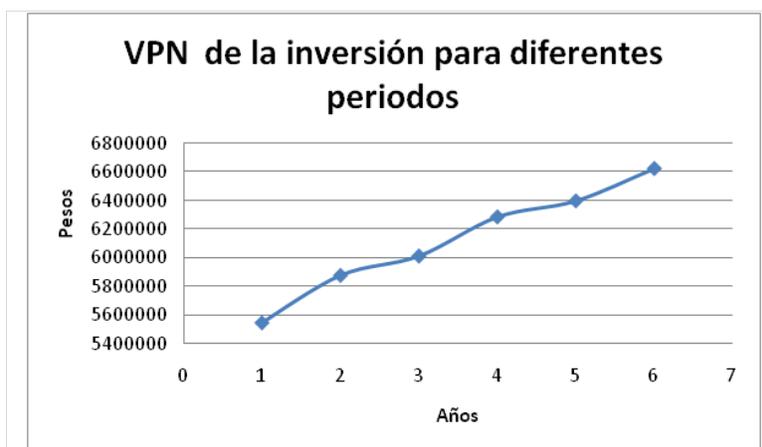


Ilustración 75. Valor presente neto acumulado -RHIOG

Fuente. Elaboración Propia.

Tabla 61. Valor presente neto para cada periodo.

| Valor Presente Neto acumulado para cada periodo |           |           |           |           |           |           |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|   | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6         |
| <b>VPN</b>                                      | 5.545.636 | 5.876.215 | 6.011.452 | 6.284.657 | 6.396.423 | 6.622.212 |

Fuente. Elaboración Propia.

La Tabla 62 que se presenta a continuación, indica el valor del vatio instalado correspondiente al costo total de la inversión (\$5.382.000) dividido entre la potencia efectiva del sistema (150W), y su valor correspondiente en USD dólares a una TRM=\$2000 pesos. Además se indica el valor de potencia generada y acumulada del sistema para

cada periodo con base a los estimativos realizados en la Tabla 59, con el fin de para determinar el costo del kilovatio de operación, es decir el valor del kilovatio entregado por el sistema en función del tiempo de operación, para lo cual dividió el valor presente neto para cada periodo – indicado en la Tabla 61 entre el valor de potencia generada, y finalmente con este valor se estimó el valor de consumo diario, mensual y anual para cada periodo.

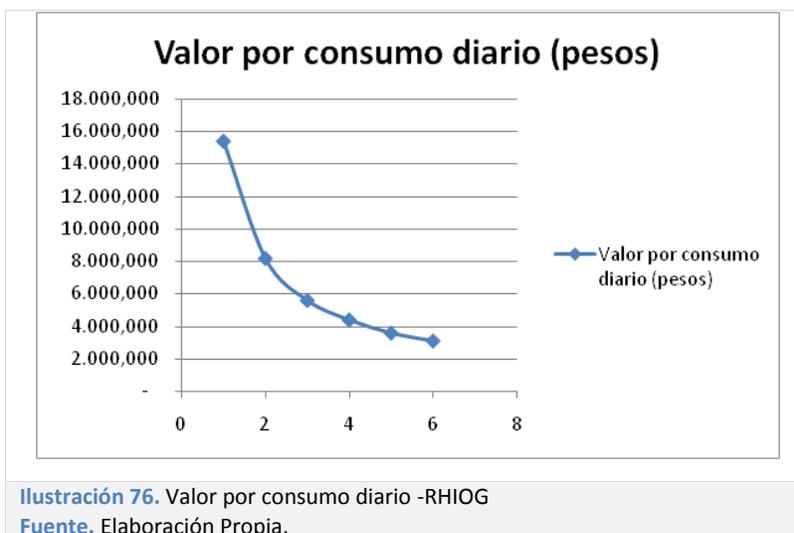
**Tabla 62.** Costo W instalado y costo del kW de operación - RHIOG

| Costo W instalado                 | Costo kW de operación |           |           |           |           |           |
|-----------------------------------|-----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                   | 35.880                | [pesos]   | 17.94     | [USD]     |           |           |
| Periodo de operación              | 1 año                 | 2 años    | 3 años    | 4 años    | 5 años    | 6 años    |
| Potencia generada [kW/periodo]    | 1296                  | 2592      | 3888      | 5184      | 6480      | 7776      |
| Costo del [kW/periodo]            | 4.279                 | 2.267     | 1.546     | 1.212     | 987       | 851       |
| Valor por consumo diario (pesos)  | 15.404                | 8.161     | 5.566     | 4.364     | 3.553     | 3.065     |
| Valor por consumo mensual (pesos) | 462.136               | 244.842   | 166.985   | 130.930   | 106.607   | 91.975    |
| Valor por consumo anual (pesos)   | 5.545.636             | 2.938.107 | 2.003.817 | 1.571.164 | 1.279.285 | 1.103.702 |

Fuente. Elaboración Propia.

La Ilustración 76 revela una notable disminución en el valor por consumo diario que un hogar con una demanda de 3,6 kW/día, paga al utilizar el sistema en los periodos evaluados. Es decir si el usuario utiliza el sistema por 5 años, la inversión que está haciendo equivale a pagar diariamente \$987 pesos, incluyendo los gastos de mantenimiento estimados.

Sin embargo para que este análisis sea concluyente en los siguientes párrafos se compara el costo de vatio instalado y los costos de kilovatio de operación, con productos similares y sustitutos.



### 5.2.1 Sistemas similares (competidores en el mercado)

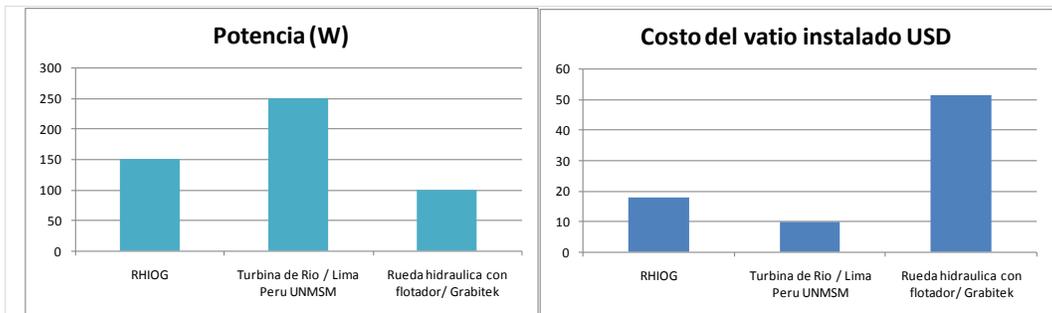
El costo del vatio instalado es el parámetro de comparación entre los sistemas similares existentes en el mercado. En la Tabla 63 que se presenta a continuación, se presenta el costo de vatio instalado de algunos productos existentes en el mercado con características similares al sistema diseñado.

**Tabla 63.** Comparación entre sistemas similares

| Sistema   | Velocidad Flujo (m/s) | Potencia (W) | C (USD/W inst.) | Costo | Tamaño del Sistema                    |
|---|-----------------------|--------------|-----------------|-------|---------------------------------------|
|  RHIOG                                   | 1,5                   | 150          | 17,94           | 2691  | 3,5m x 2,2 x 0,8 m<br>Sumergido: 0,2m |
|  Turbina de Rio / Lima Peru UNMSM        | 1                     | 250          | 9,8             | 2450  | Sumergido: 1,8 m                      |
|  Rueda hidraulica con flotador/ Grabitek | 1,8                   | 100          | 51,3            | 5130  | Turbina 150 x 112 x 86 cm.            |
|  Hydrovolts                              | 2                     | 5000         | 2               | 10000 | 1,6m x 4m                             |

**Fuente.** Elaboración Propia.

En la Ilustración 77 se muestra, que frente a los sistemas similares existentes en el mercado RHIOG presenta un costo de vatio instalado aceptable en comparación con los demás sistemas, aunque este indicador es menor para la turbina de río de Perú, RHIOG presenta ventajas en cuanto a la longitud sumergida en el río. Por otro lado frente a la turbina Garbitek, RHIOG presenta un mejor desempeño ya que a una velocidad menor entrega mayor potencia.



**Ilustración 77.** Comparación entre productos similares  
**Fuente.** Elaboración Propia.

### 5.2.2 Sistemas sustitutos

En el contexto nacional, y particularmente en Antioquia, actualmente se utilizan tres sistemas sustitutos para solucionar los problemas de no interconexión: (1) extensión de la red, (2) pequeñas centrales hidroeléctricas y (3) plantas eléctricas de gasolina o diesel.

La aplicación de estos sistemas depende de la demanda energética, la densidad poblacional y la distancia entre hogares.

En el caso de extensión de la red, pasar de las fuentes primarias a secundarias, tiene un costo de \$70.000.000 y de la fuentes secundarias a la casa, la instalación tiene costo de \$830.000 por vivienda, de los cuales 180.000 son cofinanciados por ONGs y 650.000 lo debe financiar los beneficiados por el servicio (Zapata, 2009). Esto hace que sea viable en las cabeceras de los pueblos o en zonas con una densidad poblacional suficiente para justificar la inversión.

Por otro lado, para las pequeñas centrales hidroeléctricas, se presenta el caso del proyecto realizado en La Encarnación corregimiento de Urrao, en el cual se construyó una

PCH de 55 kW para beneficiar 420 habitantes con un costo total del proyecto de \$713.500 USD a septiembre de 2009, lo cual indica un costo de vatio instalado de \$12,9 USD, sin embargo requiere de una caída de agua significativa y una densidad poblacional representativa para determinar la viabilidad de este tipo de soluciones. (IPSE, 2009).

En este orden de ideas, las plantas eléctricas son el caso de comparación más real con el sistema diseñado, ya que existen productos de este tipo que solucionan las necesidades de energía puntualmente de un hogar.

Por esta razón se realizó un análisis similar a al presentado en la Tabla 62. En la Tabla 64 se presentan algunas especificaciones técnicas de planta eléctrica a gasolina EF1000IS – Yamaha, disponible en el mercado local. Para esto se asume que la energía entregada por la planta se puede almacenar, con el fin de tener un parámetro de comparación con el sistema de generación analizado, asimismo se asumió un valor del galón de gasolina, estimado con base en el valor actual en zonas no interconectadas en la región de Urabá.

**Tabla 64.** Especificaciones de planta eléctrica a gasolina

| <b>Plantas eléctrica a gasolina - Yamaha EF 1000IS</b> |           |           |
|--|-----------|-----------|
| <b>Potencia Nominal [kW]</b>                           | 1         | 1         |
| <b>Autonomía [h]</b>                                   | 5         | 3,60      |
| <b>Capacidad [l]</b>                                   | 2,5       | 1,80      |
| <b>Capacidad [gal]</b>                                 | 0,660     | 0,475     |
| <b>Valor galón (pesos)</b>                             | 9000      | 9000      |
| <b>Potencia acumulada [kW]</b>                         | 5         | 3,6       |
| <b>Valor por consumo diario (pesos)</b>                | 5.942     | 4.278     |
| <b>Valor por consumo mensual (pesos)</b>               | 178.267   | 128.352   |
| <b>Valor por consumo anual (pesos)</b>                 | 2.139.210 | 1.540.231 |

**Fuente.** Elaboración Propia.

La Tabla 64 indica que para entregar una potencia similar a RHIOG (3,6 kW/día), la planta presenta un valor por consumo anual equivalente a \$1.540.000 pesos, sin embargo con el fin de estimar un valor que incluya el costo de la inversión y el mantenimiento periódico sugerido por expertos en el tema, se realizó un flujo de caja que se presenta en la Tabla 65

y un estimativo del costo del vatio instalado y el costo del kilovatio de operación, que se presentan en la Tabla 66.

**Tabla 65.** Flujo de caja de utilización de planta eléctrica

| Ítem                     | 0         | 1         | 2         | 3         | 4         | 5         | 6          |
|--------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|------------|
| <b>Inversión inicial</b> | 3.320.000 |           |           |           |           |           |            |
| <b>Gastos Variables</b>  |           |           |           |           |           |           |            |
| <b>Combustible</b>       |           | 1.540.231 | 1.540.231 | 1.540.231 | 1.540.231 | 1.540.231 | 1.540.231  |
| <b>Mantenimiento</b>     |           | 60.000    | 60.000    | 60.000    | 60.000    | 60.000    | 60.000     |
| <b>Flujo de caja</b>     | 3.320.000 | 1.600.231 | 1.600.231 | 1.600.231 | 1.600.231 | 1.600.231 | 1.600.231  |
| <b>TIO</b>               | 10%       |           |           |           |           |           |            |
| <b>VPN</b>               |           | 4.774.756 | 6.097.261 | 7.299.538 | 8.392.518 | 9.386.135 | 10.289.424 |

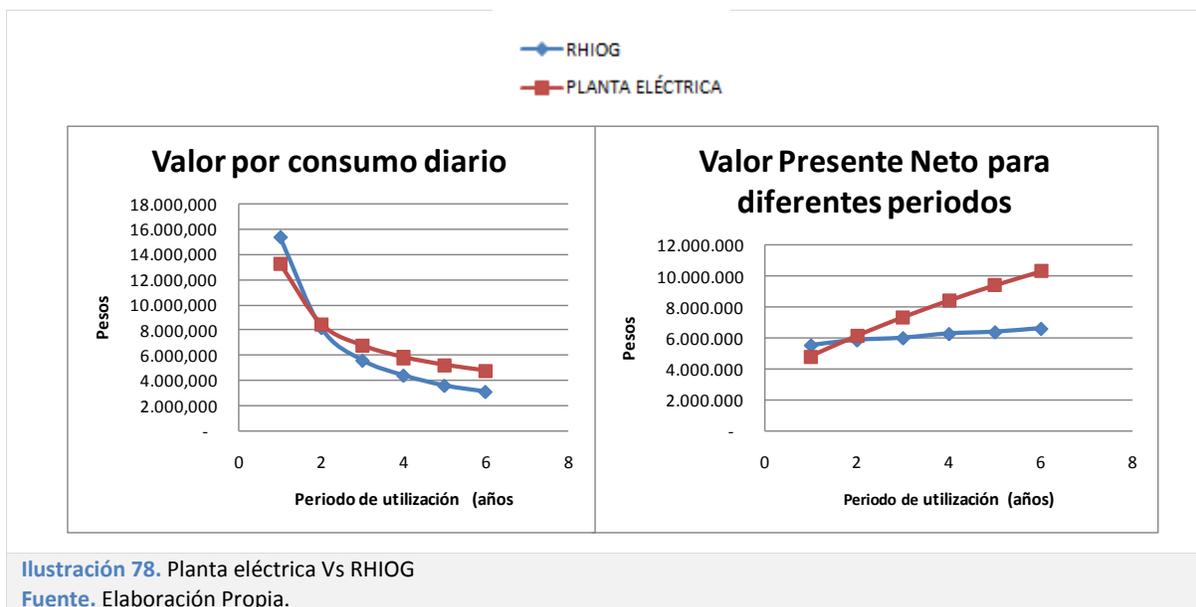
Fuente. Elaboración Propia.

**Tabla 66.** Costo W instalado y costo del kW de operación – Planta eléctrica.

| Costo W instalado                        | Costo kW de operación |               |               |               |               |               |
|--|-----------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
|  | 1 año                 | 2 años        | 3 años        | 4 años        | 5 años        | 6 años        |
| 4.775 pesos                              |                       |               | <b>2,387</b>  | USD           |               |               |
| <b>Periodo de utilización</b>            | <b>1 año</b>          | <b>2 años</b> | <b>3 años</b> | <b>4 años</b> | <b>5 años</b> | <b>6 años</b> |
| <b>Potencia generada (kW/periodo)</b>    | 1296,00               | 2592,00       | 3888,00       | 5184,00       | 6480,00       | 7776,00       |
| <b>Costo del kW/periodo</b>              | 3.684                 | 2.352         | 1.877         | 1.619         | 1.448         | 1.323         |
| <b>Valor por consumo diario (pesos)</b>  | 13.263                | 8.468         | 6.759         | 5.828         | 5.215         | 4.764         |
| <b>Valor por consumo mensual (pesos)</b> | 397.896               | 254.053       | 202.765       | 174.844,116   | 156.435,588   | 142.908,667   |
| <b>Valor por consumo anual (pesos)</b>   | 4.774.756             | 3.048.630     | 2.433.179     | 2.098.129     | 1.877.227     | 1.714.904     |

Fuente. Elaboración Propia.

Los datos presentados en las tablas anteriores permiten hacer una comparación entre la planta eléctrica analizada y RHIOG, que se sintetiza en las graficas presentadas en la Ilustración 78.



**Ilustración 78.** Planta eléctrica Vs RHIOG  
**Fuente.** Elaboración Propia.

A partir de estos resultados, se concluye que para periodos de utilización mayores a 2 años, el sistema de generación diseñado (RHIOG) es más rentable que la planta eléctrica. Si bien ésta presenta una menor inversión inicial y menores costos de mantenimiento, el suministro de combustible representa un gasto anual equivalente al 46% de su inversión inicial, por lo cual presenta un mayor valor por consumo diario frente al estimado para RHIOG. En términos porcentuales en el año 2 el valor por consumo diario para RHIOG representa el 96.4% del valor del consumo para la planta eléctrica, y este presenta una tendencia a la baja, ya que para el año 6 equivale al 64.4%.

Por otro lado, otras desventajas de la utilización de plantas eléctricas, se relacionan con el impacto ambiental negativo que éstas presentan por la contaminación y el ruido que generan, además éstas presentan limitaciones ya que dependen de la disponibilidad de combustible para operar.

El análisis realizado para evaluar económicamente a RHIOG, demostró su viabilidad económica, ya que presenta un costo de vatio instalado competente frente a los productos similares, y con respecto a los productos sustitutos, en especial con la planta eléctrica demostró ser más rentable, representando ahorros hasta de un 64% para un periodo de utilización de 6 años.

### 5.3 IMPACTO AMBIENTAL

Conforme con la normatividad ambiental vigente en Colombia, para evaluar las restricciones que puede tener el proyecto a nivel ambiental, se consideraron las siguientes leyes y decretos:

**Tabla 67.** Normatividad Ambiental Colombiana relacionada con el proyecto.

| NORMATIVIDAD AMBIENTAL COLOMBIANA |           |              |   |
|-----------------------------------|-----------|--------------|---|
| Leyes                             | 99/1993   | Nombre:      | Ley del Medio Ambiente  |
|                                   |           | Descripción: | Ley que describe la política ambiental colombiana, a la cual el proyecto debe ceñirse.  |
|                                   | 373/1997  | Nombre:      | Programa Para el Uso Eficiente y Ahorro del Agua  |
|                                   |           | Descripción: | Conjunto de proyectos y acciones que deben elaborar y adoptar las entidades encargadas de la prestación de los servicios de acueducto, alcantarillado, riego y drenaje, producción hidroeléctrica y demás usuarios del recurso hídrico.   |
| Decretos                          | 2811/1974 | Nombre:      | Código Nacional de recursos naturales renovables  |
|                                   |           | Descripción: | Incluye la normatividad asociada a la protección del medio ambiente y los Recursos Naturales Renovables (RR NN). Esto aplica para todos los proyectos que afectan directa e indirectamente los recursos naturales renovables mediante actividades de voladuras, tráfico de maquinaria pesada, destrucción de vegetación, movimiento de tierras, explotación de material de préstamo, ocupación de cauce, etc. |
|                                   | 1578/1984 | Nombre:      | Código Contencioso Administrativo   |
|                                   |           | Descripción: | Indica los procedimientos administrativos regulados por las leyes colombianas.  |
|                                   | 1541/1978 | Nombre:      | Dominio de las Aguas No Marítimas   |
|                                   |           | Descripción: | Describe todos los procedimientos asociados a permisos para aprovechamiento del agua no marítima. Aplica para proyectos que requieran, concesiones de agua, ocupación de cauces, desviación temporal o permanente de caudales, interrupciones de los flujos de aguas subterráneas.  |
|                                   | 155/2004  | Nombre:      | Reglamentación sobre tasas por utilización de aguas   |
|                                   |           | Descripción: | Incluye formulas y definiciones de los conceptos asociados a tasa por utilización de aguas.   |

Fuente. Elaboración Propia.

El decreto 1541 de 1978, indica que el sistema no requiere licencia ambiental ya que la potencia generada es menor a 1 kW..

No obstante, se requiere un trámite ante la autoridad ambiental competente – Corantioquia o Cornare, en el departamento de Antioquia -, para solicitar un permiso de ocupación de cauce, ya que el sistema opera en una fuente de agua permanente. Además como a nivel nacional no se tiene referente de un sistema similar al desarrollado, la autoridad ambiental puede exigir un estudio de impacto ambiental y un plan de manejo ambiental, así como un estudio hidrológico y un estudio hidráulico del cauce que se intervendrá según el sitio de instalación del sistema, con el fin de evaluar posibles permisos y autorizaciones adicionales.

Aparte de lo anterior, según el decreto 2811 de 1974, en el caso de fuentes de agua permanente se deben conservar un retiro entre 10 y 30 metros a partir de la cota histórica de crecimiento de la fuente. Esto debe ser contemplado para la ubicación de la obra civil del sistema de anclaje, así como para la longitud de los cables considerando la ubicación del sistema de control por fuera del retiro.

## 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El presente proyecto de diseño constituye el primer antecedente para el desarrollo de sistemas hidráulicos de generación de energía, en el departamento de Ingeniería de Diseño de la Universidad Eafit.

Se constituyen como los activos de conocimiento más valiosos derivados de la ejecución del presente proyecto, los citados a continuación:

- El seguimiento de la metodología propuesta y el aprendizaje de métodos de diseño formales en el área de estudio.
- Las experiencias adquiridas derivadas de las conversaciones con expertos realizadas a lo largo del proyecto.
- La información recopilada acerca de las organizaciones y entidades nacionales e internacionales relacionadas con el área de estudio.
- El aprendizaje adquirido en procesos de aplicación de modelos analíticos, virtuales y físicos.

### CONCLUSIONES DEL PROYECTO

- Para lograr el objetivo de este proyecto fue necesario aplicar desde la formación como ingenieras de diseño de producto, la habilidad de explorar diferentes áreas del conocimiento, obteniendo resultados valiosos, mediante la integración de aportes propios, con los desarrollos previos de distintos expertos en el tema.
- Durante el desarrollo del proyecto se tuvo dificultad para encontrar información relacionada con este tipo de sistemas hidráulicos, a nivel local, tanto en la industria como en la academia.
- Se identificó la oportunidad de explorar elementos como generadores de bajas potencias, y desarrollar este tipo de componentes como apropiación tecnológica, para ser usados en aplicaciones de energía renovable.

- En el proceso de diseño se hizo énfasis en la construcción del modelo funcional, por lo tanto para futuras intervenciones en el proyecto se podría profundizar en campos como la síntesis formal y los sistemas de control y anclaje.

### **CONCLUSIONES DE PRODUCTO**

- El modelo funcional y los resultados obtenidos del proceso experimental demuestran que la implementación de este tipo de sistemas hidrocinéticos para la generación de energía esta limitada a la generación en pequeñas potencias.
- El sistema cumple con las especificaciones de diseño. Además ofrece un valor agregado al usuario, ya que permite mejorar sus condiciones de vida al proveerle energía eléctrica, siendo amigable con el medio ambiente.
- El sistema además de cumplir con la función para la cual se diseñó, puede satisfacer otras necesidades para las cuales se requiere energía eléctrica tales como: bombeo de agua, sistemas de riego, iluminación exterior, asistencia en áreas de desastre y campamentos para el ejército. Estas representan futuras rutas hacia las cuales se puede dirigir un rediseño del sistema.

### **CONCLUSIONES DE LA EVALUACIÓN TECNICO-ECONÓMICA**

- Se demostró que el sistema es técnicamente viable, en principio porque cumple con la potencia establecida en las especificaciones de diseño de producto, y además porque presenta buenos valores de eficiencia. Sin embargo, éste presenta una limitante, ya que el generador no está disponible en el mercado nacional.
- Según los datos estimados en la matriz de componentes, el costo total de la inversión equivale a \$ 5.382.000, del cual la mayor inversión está representada por el sistema de anclaje con un 28% del costo total. Si bien es un componente necesario para el

funcionamiento del sistema, este podría variar según el contexto de operación. De ahí que un rediseño, representa una oportunidad para reducir los costos totales a futuro.

- RHIOG es económicamente viable comparado con productos similares y sustitutos, ya que presenta un costo de vatio instalado competente frente a los productos similares. Por otro lado, con respecto a los productos sustitutos, tales como plantas eléctricas, éste demostró ser más rentable con un valor de consumo anual menor al estimado para una planta con potencia similar.

### CONCLUSIONES DE LOS OBJETIVOS

Los resultados y conclusiones obtenidas del proyecto permitieron, entre otros aspectos que se trataran con mayor detalle en párrafos posteriores,(1) identificar la viabilidad técnica de aprovechar la energía disponible en los ríos para satisfacer las necesidades básicas de energía en un hogar ubicado en las zonas no interconectadas de Antioquia, (2) construir modelos físicos para estimar y verificar la magnitud de los flujos de energía al paso por los diferentes componentes del sistema, (3) conocer el estado actual del mercado local para la fabricación y consecución de los componentes del sistema y (4) depurar la metodología del proyecto para su aplicación en futuros proyectos de diseño afines con el área de estudio.

En la matriz que se presenta a continuación se aprecia la relación de las fases de la metodología con los objetivos específicos del proyecto, la cual indica el cumplimiento de los mismos.

**Tabla 68.** Matriz de correlación de objetivos.

| <b>MATRIZ DE CORRELACIÓN DE OBJETIVOS</b>   |          |          |          |
|---|----------|----------|----------|
| <b>FASES DE LA METODOLOGÍA</b>  | <b>1</b> | <b>2</b> | <b>3</b> |
| <b>OBJETIVOS ESPECÍFICOS</b>  |          |          |          |
| 1. Validar las especificaciones del producto, por medio de una investigación de campo en la que se considere opiniones de los interesados en el proyecto así como aspectos técnicos relacionados con el diseño del sistema. | X        | X        | X        |

|   |   |   |   |
|---|---|---|---|
| 2. Realizar el diseño conceptual del sistema, para identificar los componentes y sus relaciones.              |   | X |   |
| 3. Desarrollar modelos analíticos, virtuales y físicos que permitan seleccionar y detallar los componentes.   | X | X | X |
| 4. Construir un modelo funcional para realizar pruebas de campo y evaluar técnicamente el diseño del sistema. |   | X | X |

Fuente. Elaboración propia

## CONCLUSIONES DE LA METODOLOGÍA

- La metodología implementada representa un referente de integración de métodos de diseño de producto y métodos de diseño de turbinas hidráulicas.
- La aplicación de modelos físicos, analíticos y virtuales fue clave para la ejecución del proyecto. Por medio de estos fue posible cuantificar los flujos de energía de cada etapa del proceso de transformación, así como concluir en temas de los cuales se encontró poca información teórica.
- Esta metodología consistió en un proceso iterativo, en donde se aplicaron herramientas de forma cíclica para llegar al resultado final, esto se vio principalmente en la fase de desarrollar.

## CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

En relación con los resultados de la fase Explorar, afines con del objetivo específico 1, se puede concluir lo siguiente:

- Como parte del proceso exploratorio, la síntesis gráfica del estado del arte, sirvió como herramienta fundamental para conocer el estado de desarrollo de la tecnología a nivel mundial, la cual fue permanentemente empleada como fuente de información durante el proceso de diseño. Además, por medio de ésta se identificaron dos sistemas con especificaciones técnicas similares a las especificaciones de diseño del sistema diseñado: rueda hidráulica flotante (Garbitek) y turbina de río (Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú)
- Se realizó una investigación de campo para conocer el estado actual de las empresas locales para fabricar sistemas de nanogeneración, a partir de lo cual se identificaron

empresas con experiencia en el desarrollo de sistemas de mayor potencia, así como la disponibilidad de equipos y materiales para la fabricación de los componentes. Sin embargo no fue posible hallar en el mercado local y nacional fabricantes o proveedores del tipo de generador requerido para el sistema.

- El rotor de acción demostró ser el más adecuado para la situación de diseño, conforme a los resultados obtenidos mediante el empleo de modelos analíticos básicos y modelos experimentales, por medio de los cuales se evidencio como principal ventaja una menor profundidad de rio requerida para su funcionamiento frente a un rotor de reacción.
- Como resultado de la fase Explorar, se realizó una lista de las especificaciones de diseño jerarquizadas, que sirvió como punto de partida para la fase de desarrollo del diseño, enmarcó los criterios para la toma de decisiones y permitió ajustar los valores de las especificaciones durante la ejecución del proyecto.

En relación con los resultados de la fase Desarrollar, afines con el objetivo específico 2, se puede concluir lo siguiente:

- La estructura funcional fue el resultado más representativo del análisis funcional, ya que permitió: (1) Identificar los flujos de entrada y de salida del sistema, (2) conocer el proceso de transformación de energía que se presenta al interior del sistema y (3) identificar la estructura de elementos que componen el sistema: anclaje, rotor, transmisión, generador, baterías y sistema de control. Esta herramienta además sirvió como soporte para dimensionar la magnitud del flujo al paso por cada componente (subfase detallar) e identificar la eficiencia del sistema y sus componentes (subfase evaluar).
- El sistema diseñado requirió la realización de un desarrollo en paralelo de las subfases conceptualizar y detallar. Esto, debido a que para el diseño de la alternativa final fue necesario en primer lugar, detallar los componentes siguiendo el orden planteado en la estructura funcional.

- El modelo analítico empleado, desarrollado a partir de modelos propuestos por los autores (Fernandez, 2008), (Munson, Young, Okiishi, & Huebsch, 2009), (White, 2003), (Maldonado, 2005) y (Behrens, 2005), permitió: (1) dimensionar el rotor en función de la velocidad disponible en la fuente, (2) verificar una relación coherente entre los datos teóricos y los experimentales, y (3) construir la curva de potencia del sistema y estimar los valores de eficiencia. Sin embargo, si bien el modelo demostró ser confiable para describir el fenómeno de transformación de energía, las pruebas realizadas representaron un proceso de validación parcial. Es por esto que se recomienda estructurar un plan de pruebas con el fin de continuar su proceso de validación.
- El empleo de modelos virtuales, en conjunto con la realización de pruebas de laboratorio permitió seleccionar el perfil de pala cóncava, dimensionado según el modelo analítico y geometrizado con un ángulo de salida  $\beta=152$ , como el perfil que mejor aprovecha la energía disponible en el fluido, ya que arrojó mayores valores de fuerza frente a los demás perfiles analizados.
- Como resultado del proceso de diseño del rotor, las pruebas de campo demostraron ser una herramienta confiable para estimar las especificaciones técnicas necesarias para el diseño y selección de los demás componentes del sistema. Cabe resaltar que la fabricación de un torquímetro fue indispensable para hacer dichas estimaciones. En este orden de ideas, para continuar con la validación del modelo analítico y posibles mejoras del rotor, se recomienda hacer uso de este instrumento.
- Algunas metodologías proponen la síntesis formal como un proceso previo al diseño de detalle. Sin embargo, en este proyecto, este método se aplicó una vez definidos y detallados los componentes. Si bien este proceso representa una etapa importante para el diseño integral del sistema, debido al alcance del proyecto no se profundizó en este aspecto, por lo tanto para futuras intervenciones este es un campo en el que se podría ahondar.

- Las herramientas utilizadas para el diseño de detalle, demostraron que los modelos virtuales y gráficos son un método oportuno para facilitar la simulación de situaciones reales de funcionamiento y establecer las dimensiones adecuadas de los componentes.

En relación con los resultados de la fase Evaluar, afines con el objetivo específico 2, se puede concluir que:

- A partir de la prueba de laboratorio realizada, se pudo estimar satisfactoriamente la potencia efectiva entregada por el sistema. Estos datos demostraron que el sistema cumple con los valores de potencia esperados para satisfacer la demanda del escenario de consumo. No obstante, se considera oportuno, como paso a seguir, adecuar el modelo funcional para realizar pruebas de potencia eléctrica en campo.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

Behrens, R. (2005). *Articles: Backwoods Home Magazine*. Recuperado el 05 de Noviembre de 2009, de Backwoods Home Magazine:  
<http://www.backwoodshome.com/articles/behrens17.html>

Biomass Users Network. (2002). *Manuales sobre energía renovable: Hidráulica a pequeña escala*. San José, C.R.: Biomass Users Network (BUN-CA).

*Boletín informativo: EPM*. (7 de Octubre de 2008). Recuperado el Septiembre de 2009, de EPM: [www.epm.com.co](http://www.epm.com.co)

CORANTIOQUIA. (2009). *CORANTIOQUIA*. Obtenido de Temáticas:  
<http://www.corantioquia.gov.co>

CREG . (2004). *CREG* . Obtenido de CREG : [www.creg.gov.co](http://www.creg.gov.co)

Dávila, C., Vilar, D., Villanueva, G., & Quiroz, L. (2010). Lima: Soluciones Prácticas.

Doebelin. *Engineering Experimentation: Planning, Execution, Reporting*.

Duque, C., Macía, L. F., & Pelaez, C. (2009). *ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA APROPIACIÓN TECNOLÓGICA, DENTRO DEL MERCADO COLOMBIANO, DE UN AEROGENERADOR DE 400 W*. Universidad EAFIT, Ingeniería de diseño de producto, Medellín.

EPM. (2010). *Reunión de Inversionistas*. Medellín:  
[www.epm.com.co/epm/institucional/general/inversionistas](http://www.epm.com.co/epm/institucional/general/inversionistas).

Fernandez, P. (2008). *Libros: Biblioteca sobre Ingeniería Energética*. Recuperado el 20 de Enero de 2010, de Biblioteca sobre Ingeniería Energética: <http://libros.redsauce.net/>

*Fuentes Energéticas: IPSE*. (s.f.). Recuperado el 24 de Agosto de 2009, de IPSE:  
<http://www.ipse.gov.co>

HYDROVOLTS. (2009). *HYDROVOLTS*. Obtenido de HYDROVOLTS: [www.hydrovolts.com](http://www.hydrovolts.com)

IPSE. (2009). *IPSE*. Recuperado el 24 de Agosto de 2009, de Fuentes de energía: IPSE:  
[www.ipse.gov.co](http://www.ipse.gov.co)

IPSE. (2009). *IPSE*. Recuperado el 29 de Septiembre de 2009, de Fuentes de energía: IPSE:  
[www.ipse.gov.co](http://www.ipse.gov.co)

Jaramillo, M., & Raigosa, J. (2008). *SISTEMA DE COCCIÓN Y CALEFACCIÓN PARA HOGARES UBICADOS EN ZONAS AISLADAS SIN CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA*. Medellín: Proyecto de grado.

Jaramillo, M., & Raigoza, J. (2008). *SISTEMA DE COCCIÓN Y CALEFACCIÓN PARA HOGARES UBICADOS EN ZONAS AISLADAS SIN CONEXIÓN A LA RED ELÉCTRICA*. Medellín.

Maldonado, F. (2005). *Monografías: SISBIB*. Recuperado el 13 de Octubre de 2009, de SISBIB:  
[http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/Basic/maldonado\\_qf/maldonado\\_qf.htm](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtual/monografias/Basic/maldonado_qf/maldonado_qf.htm)

Miltornillos. (2010). *Tablas de resistencia a la tensión en cables metálicos*. Medellín.

Ministerio del Medio ambiente. (2002). *Ministerio del Medio ambiente*. Recuperado el 13 de Septiembre de 2009, de [www.minambiente.gov.c](http://www.minambiente.gov.c)

Mott, R. L. (2006). *Mecánica de Fluidos* (6ª edición ed.). Prentice Hall.

Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2009). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (Sexta Edición ed.). Iowa: John Wiley & Sons.

(2010). *Plan Estratégico Visión Colombia 2032*.

PLANEA. (06 de Junio de 2010). *Áreas: PLANEA*. Obtenido de [www.planea-antioquia.org](http://www.planea-antioquia.org)

Pugh. (1990). *Especificaciones de Diseño de Producto*.

Rexon. (2005). [www.rexon.com](http://www.rexon.com).

SIGOT. (2009). *Expedientes departamentales Antioquia: SIGOT*. Recuperado el 24 de Septiembre de 2009, de SIGOT: [sigotn.igac.gov.co](http://sigotn.igac.gov.co)

*tecnopedroches*. (s.f.). Obtenido de tecnopedroches:  
<http://tecnopedroches.iespana.es/apuntes/t4-4eso.pdf>

UCLM. (2002). *UNIONES POR TORNILLOS*. <http://www.uclm.es>: UCLM.

VDI. (1986). *Systematic Approach to Design of Technical Systems and Products*. Düsseldorf.

Verdant Power Canada. (2006). *Technology Evaluation Of Existing and Emerging Technologies: Water Current Turbines for River Applications Prepared for Natural Resources Canada June 15, Prepared by ULC* [www.verdantpower.com](http://www.verdantpower.com). Canada.

White, F. (2003). *Fluid mechanics* (Quinta Edición ed.). Boston: McGraw-Hill.

Wiemann, W., Müller, G., & Senior, J. (2006). *REVIEW OF CURRENT DEVELOPMENTS IN LOW HEAD, SMALL HYDROPOWER*. Southampton: Civil Engineering Department, University of Southampton.

Windblue power. (2008). *windbluepower*. Obtenido de Windblue power:  
[http://www.windbluepower.com/Permanent\\_Magnet\\_Alternator\\_Wind\\_Blue\\_High\\_Wind\\_p/dc-520.htm](http://www.windbluepower.com/Permanent_Magnet_Alternator_Wind_Blue_High_Wind_p/dc-520.htm)

Zapata, R. (14 de Octubre de 2009). Director de la Gerencia de Servicios Públicos de la Gobernación de Antioquia. (M. Aguilar, Entrevistador)